

Technologiebericht

3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch)

innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende

Antje Seitz

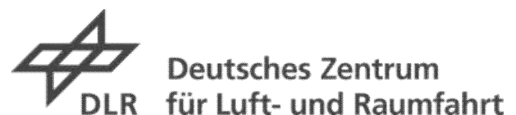
Stefan Zunft

Carsten Hoyer-Klick

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Seitz, A.; Zunft, S.; Hoyer-Klick, C. (2018): Technologiebericht 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Carsten Hoyer-Klick

Tel.: +49 711 / 6862 – 728

Fax: +49 711 / 6862 – 747

E-Mail: carsten.hoyer-klick@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfaffenwaldring 38-40

70569 Stuttgart

Review durch:

Peter Schossig (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	807
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	808
Tabellenverzeichnis	809
Abbildungsverzeichnis	810
Zusammenfassung (Steckbrief)	812
1 Beschreibung des Technologiefeldes	814
1.1 Einleitung	814
1.2 Thermische Energiespeicher	814
1.2.1 <i>Anwendungen</i>	814
1.2.2 <i>Technologien</i>	815
1.3 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)	817
1.3.1 <i>Anwendungen</i>	817
1.3.2 <i>Technologien</i>	818
2 Stand F&E in Deutschland	821
2.1 Thermische Energiespeicher	821
2.2 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)	825
3 Relevanz öffentlicher Förderung	826
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	826
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	828
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	835
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	835
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen	838
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	838
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	840
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	843
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	844
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	846
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	848
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	849
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	852
5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	856
5.1 Thermische Energiespeicher	856
5.2 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)	859
5.3 Querschnittsthemen	859
Literaturverzeichnis	861

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

ACAES	Adiabatic compressed air energy storage (Adiabate Druckluftspeicher-Kraftwerk)
ALAES	Adiabatic liquid air energy storage (Adiabate Flüssiglufspeicher-Kraftwerk)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CAES	Compressed air energy storage (Druckluftspeicher-Kraftwerk)
CSP	Concentrated solar power (Solarthermie-Kraftwerk)
EE	Erneuerbare Energie
EWK	Elektrowärmekraftwerk zur Stromspeicherung
FW	Flywheel (Schwungradspeicher)
GuD	Gas- und Dampf-Kombikraftwerk
KWK	Kraft-Wärmekopplung
LAES	Liquid air energy storage (Flüssiglufspeicher-Kraftwerk)
LWS	Latentwärmespeicher
PCM	Phase change material (Latentwärme-Speichermaterial)
PHES	Pumped heat electricity storage (Thermopotenzialspeicher)
PSW	Pumpspeicher-Kraftwerk
SWS	Strom-Wärme-Strom-Speicher
TCS	Thermochemische Speicher
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Einheiten und Symbole

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius


Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Techno-ökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien -----	817
Tab. 1-2	Entwicklung von Wärmespeichertechnologien -----	817
Tab. 1-3	Techno-ökonomische Kenndaten von Stromspeichertechnologien-----	820
Tab. 1-4	Entwicklung von Stromspeichertechnologien-----	820
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von thermischen Energiespeichern -----	827
Tab. 3-2	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von zentralen Kurzzeit-Stromspeichern-----	828
Tab. 3-3	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Thermische Energiespeicher -----	829
Tab. 3-4	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Thermische Energiespeicherung-----	831
Tab. 3-5	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Zentrale Stromspeicher-----	832
Tab. 3-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Zentrale Stromspeicher-----	834
Tab. 4-1	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Energiespeicher (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	836
Tab. 4-2	Analyse des globalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energiespeicher-----	836
Tab. 4-3	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Energiespeicher (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	837
Tab. 4-4	Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energiespeicher -----	837
Tab. 4-5	Geschätzter Wert von Speicheranwendungen -----	842
Tab. 4-6	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Energiespeicherung-----	844
Tab. 4-7	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energiespeicher – Input-Orientierung -----	845
Tab. 4-8	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Thermische Energiespeicher zum Status Quo (2015)-----	847
Tab. 4-9	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Zentrale Stromspeicher zum Status Quo (2015)-----	848
Tab. 4-10	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Thermische Energiespeicher -----	849
Tab. 4-11	Abhängigkeit des Technologiefeldes Thermische Energiespeicher von Infrastrukturen -----	851
Tab. 4-12	Abhängigkeit des Technologiefeldes Zentrale Stromspeicher von Infrastrukturen -----	852

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Klassifizierung der Technologien thermischer Energiespeicher -----	816
Abb. 1-2	Klassifizierung von Stromspeicher-Technologien -----	818
Abb.2-1	Unterschiedliche Arten von Warmwasserspeichern: links: Pufferspeicher für den dezentralen Einsatz, Mitte und rechts: saisonale Speicher für Wärmenetze -----	822
Abb.2-2	Flüssigsalzspeicher in einem solarthermischen Kraftwerk -----	822
Abb.2-3	Integration eines Feststoff-SchüttSpeichers in einem 300 MW GuD-KWK-Kraftwerk -----	823
Abb.2-4	Latentwärmespeicher – links: Mikroverkapselte Niedertemperatur-PCM als Baumaterial, rechts: Hochtemperatur-Kombi-Testspeicher mit sensiblem und latentem Teil zur Integration in ein Dampfkraftwerk -----	823
Abb.2-5	Thermochemische Speicher – links: Mobiler Energiespeicher basierend auf Sorption an Zeolithen, rechts: Laboranlage zur Speicherung von Hochtemperaturwärme basierend auf der Reaktion von Kalk mit Wasserdampf-----	824
Abb.2-6	Luftbasierte Stromspeicher – links: Adiabates Druckluftspeicher-Kraftwerk, rechts: Adiabates FlüssiglufSpeicher-Kraftwerk -----	825
Abb.4-1	Illustration der Sektorenkopplung-----	835
Abb.4-2	Vergleich der Speicherkosten mit den preissetzenden Konkurrenztechnologien -----	843

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch)	 Deutsches Zentrum DLR für Luft- und Raumfahrt						
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf							
Beschreibung des Technologiefeldes							
<p>A: Thermische Energiespeicher (TES)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensible Speicher/Wasserspeicher: TRL=9 (Pufferspeicher, große Speicher für Fernwärme) - Sensible Speicher/Hochtemperatur (Flüssig/Feststoff): TRL=4-9 (30 GWh CSP-Flüssigsalzspeicher) - Latente Speicher (LWS)/Niedertemperatur: TRL=6-9 (Eisspeicher, Feldtests in Gebäuden) - Latente Speicher (LWS)/Hochtemperatur: TRL=4-7 (einzelne Pilotspeicher) - Thermochemische Speicher (TCS): TRL=5-7 (Sorption), TRL 3-4 (Gas-Feststoff-Reaktionen) <p>B: Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strom-Wärme-Stromspeicher (SWS): TRL=2-5 (hohe elektrische Wirkungsgrade noch mit niedrigem TRL) - Adiabate Druckluftspeicher (ACAES): TRL=4 (2 diabate Anlagen bisher) - Adiabate Flüssigluftspeicher (ALAES): TRL=2 - Pumpspeicher (PSW): TRL=9 (bisher 31 Anlagen in D) - Schwungradspeicher: TRL=9 <p><i>(TRL=2-4: Technologieentwicklung, TRL=5-8: Demonstration, TRL=9: Kommerzialisierung)</i></p>							
<p>Kritische Aspekte/Komponenten: Speichermaterial, effiziente Subkomponenten (TES, Kompressor), Speicherintegration für maximale Systemdienstleistung und Nutzen im Prozess</p>							
Entwicklungsziele							
<p>A: Funktionsoptimierte Materialien, anwendungsoptimierte Speicherkonzepte, Kostensenkung</p> <p>B: Einbindung TES, Wirkungsgradsteigerung im System, Pilotisierung und Demonstration</p> <p>übergreifend: Technologieentwicklung zur Nutzung an den Sektorgrenzen (Strom und Wärme)</p>							
Technologie-Entwicklung							
Einheit	National GW	Internat. GW	National GWh	Internat. GWh	- Bedarfsanalysen zu thermischen Energiespeichern fehlen weitgehend - Studienlage zu Stromspeichern uneinheitlich		
Marktpotenzial (installierte Leistung)* A	-	-	Keine Angabe möglich				
Marktpotenzial (installierte Leistung)* B	20 - 55	310	-	-			
A) Thermische Energiespeicher							
B) Zentrale Stromspeicher							
	Heute	2030	2050	Heute	2030	2050	
Speicher-Wirkungsgrad	%	60-99 _{th}	65-99 _{th}	70-99 _{th}	35-80 _{el}	el 65-82 _{el}	
Speicherdichte (im System)	<i>kWh/m³</i>	15 - 200	15 - 300	15 - 400	irrelevant		
Typische Speichergröße	<i>MWh</i>	0,01 – 15.000			5.000		
Investitionskosten (Kapazität)	€/kWh	0,1-10 _{NT} 25-120 _{HT}	0,1-10 _{NT} 15-80 _{HT}	0,1-10 _{NT} 15-70 _{HT}	Größenabhängig		
Investitionskosten (Leistung)	€/kW	Nur relevant für Pufferspeicher			500-3.000	500-2.500	500-2.000
* Szenarienbereich DE_80 % bzw. INT_2° C (Min-Max)							
F&E-Bedarf							
<p>- A: Potenzialanalysen (insbesondere für Industrieprozesse), optimierte LWS/TCS-Materialien, Detailverständnis thermischer/mechanischer/chemischer Vorgänge im Speicher, Entwicklung effizienter & kostengünstiger Speicherkonzepte & Funktionsnachweis im Labor- und Pilotmaßstab, Demonstration im Anwendungsumfeld</p> <p>- B: Komponentenentwicklung (Kompressor, thermischer Energiespeicher), Entwicklung Systemkonfiguration, Demonstration als Gesamtsystem mit allen Komponenten</p>							

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen (gegenüber Referenz)
Indirekter Beitrag durch speichergestützte, bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme und Strom im Energiesystem, damit sind höhere Anteile erneuerbarer Energien systemkompatibel einsetzbar.
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> – Beitrag zur Effizienzsteigerung mittels thermischer Energiespeicher durch Abwärmenutzung in industriellen Prozessen, schöpfbare Potenziale sind noch nicht systematisch erfasst worden. – Kein Bedarf an kritischen Rohstoffen
Kosteneffizienz (gegenüber Referenz)
<ul style="list-style-type: none"> – A: Insgesamt niedrige kapazitive Investitionskosten (€/kWh), hohe volkswirtschaftliche Kosteneffizienz aufgrund hoher Anteile an Wärmebedarf in der Nutzenergie (> 50 %) – B: geringes Kostensenkungspotenzial bei etablierten Technologien (PSW), innovative Ansätze (ACAES, SWS) mit deutlichen Kostensenkungspotenzialen gegenüber Referenztechnologie (PSW)
Inländische Wertschöpfung
Große Wertschöpfungspotenziale werden beim Bau und Betrieb von Speichern im Industrieumfeld erwartet, derzeit noch nicht durch Studien belegbar (erste Studie für das BMWi in Arbeit).
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
<ul style="list-style-type: none"> – Bezüglich A & B führende Rolle im internationalen Umfeld mit hoher Anbindung an industrielle Nutzung, hohe landesspezifische F&E-Anteile jeweils bezüglich vielversprechender Technologien. – Insgesamt D führend bei F&E-Anstrengungen für Energiespeicher.
Gesellschaftliche Akzeptanz
<ul style="list-style-type: none"> – Marktakzeptanz abhängig von Erlössituation durch Speicherintegration und Situation aufgrund regulatorischer Rahmenbedingungen (CO₂-Vermeidungskosten, Strommarktdesign) – Hohes Risiko lokaler Akzeptanz bei Pumpspeichern, hohe Akzeptanz bei allen anderen Speichern.
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> – Geringe Pfadabhängigkeiten, da Speicherbedarf bei hohen Anteilen von EE unumstritten. – Reaktionsfähigkeit: lange Investitionszyklen bei Kraftwerken und industriellen Prozessen. – Bezüglich A große Robustheit durch breitgefächerte Nutzung als Querschnittstechnologie.
Abhängigkeit von Infrastrukturen
<ul style="list-style-type: none"> – Große Wärmespeicher bedingen Fernwärmenetze, ansonsten Wärmespeicher als lokale Technik – Stromspeicher verringern die Anforderungen an den Zubau von Stromnetzen.
Systemkompatibilität
<ul style="list-style-type: none"> – Integration von Speichern erfüllt einen Nutzen im System (Flexibilisierung, Effizienzsteigerung). – Speicher leisten an den Sektorengrenzen wertvolle Beiträge zur Stabilisierung.

1 Beschreibung des Technologiefeldes

1.1 Einleitung

Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien – im Wesentlichen aus PV und Wind – steigen die Anforderungen bei deren netzverträglicher Integration ins Energiesystem. Die nicht bedarfsgerechte Erzeugung stellt vor dem Hintergrund einer stabil zu haltenden Versorgungssicherheit eine große Herausforderung dar.

Im *Stromnetz* führt dies zu einem verringerten Grundlastanteil konventioneller Kraftwerke und zu erheblichen Residuallastschwankungen mit ausgeprägten Gradienten. Die angestrebte Dekarbonisierung der Sektoren Wärme und Verkehr mit Hilfe erneuerbaren Stroms wird das Problem weiter verschärfen.

Über 50 % der Endenergie wird für die *Wärmeversorgung* von Haushalten sowie gewerblichen und industriellen Prozessen eingesetzt. Abhängig vom jeweiligen Sektor setzt sich diese aus unterschiedlichen Anteilen aus Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zusammen. Lediglich knapp 15 % werden bisher aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt. Die Reduzierung des Wärmeverbrauchs und der anzustrebende Ersatz fossiler Energiequellen durch erneuerbare Wärme und erneuerbare Brennstoffe sowie Power-to-Heat-Technologien werden einen weiteren Flexibilisierungsbedarf schaffen und den Effizienzdruck erhöhen.

In einem zukünftigen Energiesystem wird diesen Anforderungen Rechnung getragen und eine Integration entsprechender Technologien zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung gewährleistet sein müssen. *Energiespeicher für Wärme und Strom* spielen dabei eine bedeutende Rolle.

Erzeugungseitig kann durch *thermische Energiespeicher* die Stromerzeugung z. B. in GuD-KWK- oder Kohlekraftwerken flexibilisiert sowie die Grundlastfähigkeit von solarthermischen Kraftwerken realisiert werden. Wärmespeicher-gestützte Power-to-Heat-Technologien ermöglichen eine Verschiebung von Stromlasten auf Verbrauchsseite. In gewerblichen und industriellen Prozessen können bisher ungenutzte Abwärmepotenziale mit Hilfe von Wärmespeichern gehoben und damit Effizienzsteigerungen erzielt werden. Im Niedertemperaturbereich kann durch Speicherung der erzielbare Energieeintrag erneuerbarer Energien signifikant erhöht werden.

Der von zentralen *Stromspeichern* zu leistende Beitrag fokussiert sich auf den Netzausgleich und die Netzstützung im Transport- und Verteilnetz.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten werden die hier dargestellten Technologien im Folgenden in *thermische Energiespeicher* und *zentrale Stromspeicher* gruppiert und getrennt voneinander behandelt.

1.2 Thermische Energiespeicher

1.2.1 Anwendungen

Thermische Energiespeicher kommen als Querschnittstechnologie in einem sehr breiten Anwendungsfeld zum Einsatz. Im Niedertemperaturbereich dient Wasser als kostengünstiges und effektives Speichermedium zur Pufferspeicherung im Gebäu-

debereich und in Fernwärmenetzen. Große unterirdische Speicher können zum Ausgleich saisonaler Schwankungen und zur Erhöhung der erneuerbaren Anteile an der Wärmebereitstellung für die Gebäudeversorgung beitragen. Phasenwechselspeicher werden für den Ausgleich von Temperaturschwankungen und in Low-Ex-Systemen in der Gebäudeklimatisierung eingesetzt. Im gewerblichen Bereich spielt auch die Kältespeicherung eine Rolle.

Für Hochtemperatur-Wärmespeicher gibt es einige seit langem etablierte Industrieanwendungen, etwa zur Effizienzsteigerung in Prozessen der Glas- oder Stahlindustrie. In den vergangenen Jahren haben sich außerdem Flüssigsalzspeicher für solarthermische Kraftwerke kommerziell durchgesetzt. Weiterer Bedarf ergibt sich im Hochtemperaturbereich für die Schöpfung von Abwärmepotenzialen in den Prozessen energieintensiver Industriebranchen. Fällt die Abwärme mit zeitlichem Versatz oder fluktuierend an, so ist eine Vergleichmäßigung mittels Wärmespeichern die Voraussetzung für Effizienzsteigerungen durch Reintegration oder Verstromung der Wärme. Weitergehende Beiträge zur CO₂-Einsparung werden in diesem Umfeld nur durch eine Dekarbonisierung von Industrierwärme leistbar sein. Entsprechende Power-to-Heat-Technologien erfordern speichergestützte Lösungen beim zeitlichen Ausgleich von Prozesswärmebedarfen und fluktuierend anfallendem Strom.

Auch Lösungen zur Flexibilisierung der Strom- und Wärmeerzeugung hängen häufig von Speichertechnologien für Hochtemperaturwärme ab, so etwa die Betriebsflexibilisierung von GuD- und Kohlekraftwerken, die Kraft-Wärmekopplung oder die adiabate Druckluftspeicherung. Insgesamt ist zu erwarten, dass an den Sektorgrenzen Speicherlösungen für eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme und Strom unter der Nutzung unterschiedlicher erneuerbarer Primärenergiequellen zunehmend an Bedeutung gewinnen werden.

Entsprechend der heterogenen Anwendungen ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an Wärmespeicher, die nur durch eine große technologische Breite an Wärmespeichern abgedeckt werden können. Durchsetzen wird sich die jeweils im spezifischen Fall am besten geeignete technische und betriebswirtschaftlich tragfähige Lösung.

1.2.2 Technologien

Im Vergleich zu Strom lässt sich Wärme verhältnismäßig einfach speichern. Gegenüber anderen Speichertechnologien sind vergleichsweise niedrige Kosten, eine große Robustheit, lange Lebensdauern und geringe Ressourcenansprüche zu verzeichnen.

Prinzipiell lassen sich drei Prinzipien zur Speicherung von thermischer Energie unterscheiden: sensible, latente und thermochemische Speicher (Abb. 1-1).

Im Fall *sensibler Speicherung* wird das Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. Die gespeicherte Energiemenge hängt damit von der spezifischen Wärmekapazität des Speichermediums, dessen Masse und der nutzbaren Temperaturänderung ab. Als Speichermedien kommen Flüssigkeiten oder Feststoffe in Frage. Die Anwendungsbreite ist groß und reicht, abhängig vom benötigten Temperaturbereich, von der Brauchwasser- und Gebäudeheizung bis zur Kraftwerksanwendung mittels hochtemperatur-beständiger Flüssigkeiten oder Feststoffen im Gigawattstunden-Maßstab.

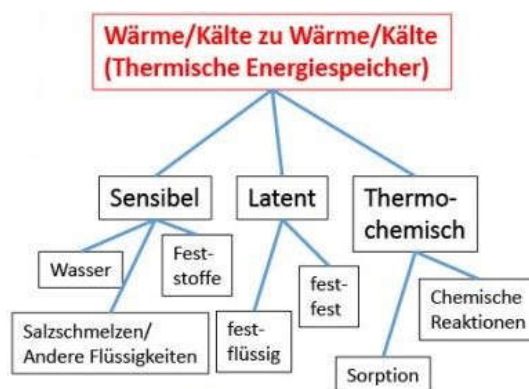


Abb. 1-1 Klassifizierung der Technologien thermischer Energiespeicher

Quelle: BVES (<http://www.bves.de/technologien-2/>)

Latentwärmespeicher nutzen den Enthalpieumsatz der Phasenänderung eines Speichermaterials. Meist handelt es sich dabei um den Übergang zwischen fester und flüssiger Phase. Damit kann eine große Energiemenge auf dem Temperaturniveau des Phasenwechsels zur Verfügung gestellt werden. Es werden verschiedene organische und anorganische Medien wie Paraffine, Salze oder Metalle eingesetzt, die den Temperaturbereich von etwa -50 bis über 600 °C abdecken. Anwendung sind Kühl- und Pufferspeicher in Gebäudeanwendungen sowie Prozesswärme- und Kraftwerksanwendungen mit Dampf.

Thermochemische Speicher nutzen die Enthalpieänderung einer physikalischen Umwandlung (Sorption) oder einer reversiblen chemischen Reaktion zur Speicherung. Da die thermische Energie in chemischer Form gespeichert ist, bleibt diese verlustfrei über beliebige Zeiträume hinweg speicherbar. Gleichzeitig lassen sich mit diesem Speicherprinzip hohe Speicherdichten erreichen. Neben den teilweise noch komplexen Reaktoren stellt insbesondere die Bereitstellung des gasförmigen Reaktionspartners eine Herausforderung dar. Die Vorteile thermochemischer Speicher lassen sich insbesondere bei der Langzeitspeicherung unter Verwendung kostengünstiger Speichermaterialien und durch die Integration vorhandener Prozessgasströme schöpfen. Beispiele hierfür sind Trocknungsprozesse oder die saisonale Speicherung im Gebäudebereich. Darüber hinaus kann das Temperaturniveau bei der Umwandlung gezielt angehoben werden, sodass eine Aufwertung von Wärme möglich wird. Daraus ergibt sich ein weiteres attraktives Anwendungsfeld für thermochemische Systeme. Auf Grund der gekoppelten Vorgänge sind erreichbare Leistungs- bzw. Energiedichten von thermochemischen Speichern grundsätzlich stark von den gewählten Prozessbedingungen abhängig. Diese sollten daher mit angegeben werden. Insgesamt befinden sich die thermochemischen Technologien bis auf einzelne Ausnahmen noch in einem frühen, vorkommerziellen Entwicklungsstadium.

Tab. 1-1 Techno-ökonomische Kenndaten von Wärmespeichertechnologien

	Einheit	Feststoff-speicher	Flüssig-speicher	Latent-wärme-speicher	Thermo-chemische Speicher
Spez. Energiespeicherdichte (abhg. vom Anwenderprozess)	kWh/m ³	70-150	70-200	~100	150-500
Spez. Leistungsdichte	kW/m ³	20-400	Keine Limi-tierung	15-80	-
Typ. realisierbare Speichergröße	MWh	1-1.000	500-5.000	0,1-500	-
Speicherwirkungsgrad	%	98	98	98	60-95
Verluste (% der Kapazität pro Tag)	%/d	2-4	2-4	2-4	0
Speicherdauer		Stunden bis Tage	Stunden bis Tage	Stunden bis Tage	Stunden bis Monate
Reaktionszeit		Minuten	Minuten	Minuten	Minuten
Lebensdauer (Zyklen)	-	>10.000	>10.000	>10.000	>10.000 (Sorption)
Lebensdauer (Jahre)	a	>20	>20	>20	-
Investition	€/kWh	15-40	20-50	40-80	-

Quelle: BVES und eigene Abschätzungen

Tab. 1-2 Entwicklung von Wärmespeichertechnologien

	Einheit	Thermische Energiespeicher		
		Heute	2030	2050
Speicher-Wirkungsgrad	%	60-99 _{th}	65-99 _{th}	70-99 _{th}
Speicherdichte (im System)	kWh/m ³	15-200	15-300	15-400
Typische Speichergröße	MWh	0,01-15.000		
Investitionskosten (Kapazität)	€/kWh	0,1-10 _{NT} 25-120 _{HT}	0,1-10 _{NT} 15-80 _{HT}	0,1-10 _{NT} 15-70 _{HT}
Investitionskosten (Leistung)	€/kW	Nur relevant für Pufferspeicher		

Quelle: Eigene Abschätzungen

1.3 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

1.3.1 Anwendungen

Stromspeicher erfüllen im Elektrizitätssystem eine Vielzahl von Funktionen beim Ausgleich von schwankender Erzeugung und bedarfsgerechter Bereitstellung von Strom sowie mit Netzdienstleistungen in Transport- und Verteilnetz, etwa zur Frequenz- und Spannungshaltung und Schwarzstartfähigkeit. Damit können sie zur Ver-

sorgungssicherheit und zur Integration erneuerbaren Stroms, etwa zur Direktvermarktung von EE oder der Vermeidung ihrer Abregelung, beitragen.

Zunehmende Bedeutung erhalten sie künftig bei weiter steigendem Flexibilisierungsbedarf im System, insbesondere wenn konkurrierende Maßnahmen wie Netzausbau und flexible Erzeugung ausgeschöpft oder nicht rechtzeitig umsetzbar sind. Die Studienlage zum Ausgleichsbedarf stellt sich mit etwa 60-309 GW bis zur Erreichung des 2 °C-Ziels (IEA 2014: 271) uneinheitlich dar und erfasst in der Regel den Bedarf im Verteilnetz nicht. Die zur Dekarbonisierung der Sektoren Verkehr und Wärme benötigte Sektorkopplung erhöht den Strombedarf und damit den Ausgleichsbedarf noch einmal erheblich.

Bisher sind wenige großmaßstäbliche Speichertechnologien in kommerzieller Nutzung. Die größten Kapazitäten stellen heute Pumpspeicherkraftwerke (PSW) mit etwa 37 GWh für die Bereitstellung von Regelleistung, Spitzenlasterzeugung und Netzdienstleistungen. Sie decken damit den Anwendungsbereich Kurz- und Mittelfristspeicher ab.

1.3.2 Technologien

Die zur Stromspeicherung zum Einsatz kommenden Technologien können nach ihrem physikalischen Prinzip oder nach typischer Beladedauer und Zweck unterteilt werden (Abb. 1-2). Bei den hier betrachteten Stromspeichern wird die zu speichernde Energie als kinetische, bzw. als mechanische und/oder thermische Energie gespeichert.

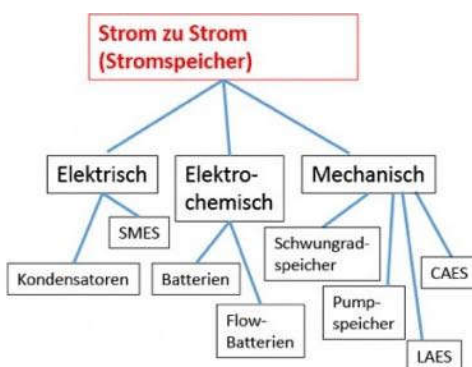


Abb. 1-2 Klassifizierung von Stromspeicher-Technologien

Quelle: BVES (<http://www.bves.de/technologien-2/>)

Pumpspeicherkraftwerke (PSW) nutzen die Höhendifferenz zwischen einem oberen und einem unteren Speicherbecken. Zur Speicherung wird das Wasser durch von Motorgeneratoren angetriebenen Pumpen über Rohrleitungen vom unteren in das obere Speicherbecken gepumpt und dort als potenzielle Energie (Lageenergie) gespeichert. Zur Stromerzeugung strömt das gespeicherte Wasser über die Rohrleitungen und Turbinen zurück in das untere Becken. Die Turbinen treiben Generatoren an, die den erzeugten Strom in das Stromnetz einspeisen. In Deutschland beträgt die maximale Höhendifferenz zwischen den beiden Speicherbecken – die sogenannte Fallhöhe – über 600 Meter. Die typische Entladedauer liegt bei 4-9 Volllaststunden.

Druckluftenergiespeicher (CAES) nutzen typischerweise in Kavernen gespeicherte Druckluft. Beim Beladen wird Luft auf hohe Drücke komprimiert und im Hohlvolumen gespeichert, bei Strombedarf wird sie in einer Turbine entspannt. In „*adiabaten*“ *Druckluftspeichern* (ACAES) wird zur Verbesserung des Wirkungsgrads und für die lokale Emissionsfreiheit die unvermeidlich anfallende Kompressionswärme gespeichert und beim Entladeprozess re-integriert. Typische Anlagenleistungen und Entladedauern liegen zwischen 10 und 300 MW_{el}, bzw. bei 4-10 Stunden. Drücke und Temperaturen variieren je nach Anzahl der Anlagenstufen. Der für die Salzkavernen benötigte Untergrund findet sich insbesondere in Norddeutschland und Nordwest-Europa. Aquifere sind eine Alternative und erhöhen das Potenzial weiter. Für kleinere Anlagen kommen auch Gasröhrenspeicher infrage.

Wie bei Druckluftenergiespeichern nutzt der *Flüssigluftenergiespeicher* (LAES) die Kompression und Expansion von Luft. Allerdings wird die Luft hier in verflüssigtem Zustand gespeichert. Dazu wird diese in einem Luftverflüssigungsprozess auf ca. -190 °C abgekühlt und anschließend in einem kryogenen Speichertank bei niedrigem Druck gelagert. Bei der Rückverstromung wird die flüssige Luft verdichtet, verdampft und erwärmt. Bei „*adiabaten*“ *Flüssigluftspeichern* (ALAES) wird durch die Speicherung und Wiedereinkopplung der Kompressionsabwärme eine erhebliche Wirkungsgradverbesserung und lokale Emissionsfreiheit erreicht. Typische Anlagenleistungen und Speicherkapazitäten erreichen ähnliche Werte wie CAES-Anlagen.

Bei *Strom-Wärme-Strom-Speichern* (SWS) wird die Stromspeicherung über einen Wärmespeicher realisiert. Eine vergleichsweise effiziente Variante sind *Thermopotenzialspeicher* (PHES): Sie nutzen zur elektrischen Speicherbeladung einen Wärmepumpenprozess; bei der Entladung wird die vom Speicher bereitgestellte Wärme zum Antrieb eines Turbinenprozesses eingesetzt. Als besonders aussichtsreich gelten Systeme, die auf einem Gasturbinen- oder Dampfturbinenprozess basieren. Es ist ein ähnlicher Leistungs- bzw. Kapazitätsbereich wie bei CAES denkbar. Eine technisch einfachere, allerdings weniger effiziente Variante, bei der der Wärmepumpenprozess durch eine elektrische Direktbeheizung ersetzt wird, wird als *Elektrowärmekraftwerk* (EWK) bezeichnet.

Die vorgenannten Systeme CAES, LAES und PHES können grundsätzlich ähnlich hohe Wirkungsgrade wie PSW erreichen und diese durch die Einbindung von Abwärme noch weiter erhöhen.

Schwungradspeicher speichern Strom als Rotationsenergie. Zum Speichern wird ein Rotor auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Beim Entladen treibt der Rotor einen Generator. Hauptanwendung ist die Leistungsbereitstellung. Typische Lade- bzw. Entladedauern liegen zwischen 20 Sekunden und 20 Minuten mit Leistungen bis 20 MW.

Pumpwasserkraftwerke, Druckluftspeicherkraftwerke, Flüssigluftkraftwerke und Strom-Wärme-Strom-Speicher sind Technologien, die vornehmlich auf Anwendungen als zentrale Speicher für den Netzausgleich (Regelenergie, Spitzenlastbereitstellung) und Netzstabilität im Transport- und Verteilnetz zielen. Mit typischen Speicherkapazitäten im Stundenbereich zählen sie zu den Kurzzeitspeichern.

Schwungradspeicher werden als Kurzzeitspeicher im Sekundenbereich in dezentrale Anwendungen zur Netzstabilisierung (Frequenzregelung) und unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) eingesetzt. In dieser Anwendung bieten sie gegenüber Batterien den Vorteil besserer Lebensdauern bei sehr hohen Zykluszahlen, sind allerdings aufgrund ihrer höheren Selbstentladeraten in ihrer Speicherkapazität begrenzt.

Tab. 1-3 Techno-ökonomische Kenndaten von Stromspeichertechnologien

	Einheit	Pump-speicher-KW	Adiab. CAES	Adiab. LAES	EWK	PHES	Schwungradspeicher
Typ. realisierbare Speichergröße	MWh	bis 800	5-5.000	5-5.000	5-5.000	5-5.000	bis 5
Speicherwirkungsgrad	%	75-80	60-70	50-65	35-45	50-70	80-95
Standverluste (% der Kapazität)			~3 %/d	~3 %/d	~3 %/d	~4 %/d	~5 %/h
Speicherdauer		Stunden	Stunden	Stunden	Stunden	Stunden	Minuten
Reaktionszeit		Minuten	Minuten	Minuten	Minuten	Minuten	<1s
Lebensdauer (Zyklen)	-	>20.000	>20.000	>20.000	>20.000	>20.000	>10.0000
Lebensdauer (Jahre)	a	>>30	30	30	30	30	>15
Investition	€/kW	500-2.000 ¹⁾	~ 1.300	1.100-3.000	800-1.000		900-1.300

1) FhG Metastudie 2015

*) zur Integration in bestehenden Kraftwerksblock

CAES = Druckluftenergiespeicher; LAES = Flüssiglufthochdruckspeicher; EWK = Elektrowärmekraftwerke; PHES = Thermopotenzialspeicher

Quelle: BVES und eigene Abschätzungen

Tab. 1-4 Entwicklung von Stromspeichertechnologien

	Einheit	Zentrale Stromspeicher		
		Heute	2030	2050
Speicher-Wirkungsgrad	%	35-80 _{el}		65-82 _{el}
Speicherdichte (im System)	kWh/m ³		irrelevant	
Typische Speichergröße	MWh		5000	
Investitionskosten (Kapazität)	€/kWh		größenabhängig	
Investitionskosten (Leistung)	€/kW	500-3.000	500-2.500	500-2.000

Quelle: Eigene Abschätzungen

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Thermische Energiespeicher

Wärmespeicher finden als Querschnittstechnologie in einem breiten Anwendungsspektrum Einsatz. Die F&E-Arbeiten zielen daher zum einen auf die Weiterentwicklung entlang der technologischen Entwicklungslinien für sensible, latente und thermochemische Speicher. Hier stehen insbesondere ein tieferes Verständnis und eine verbesserte Funktionalität der Speichermaterialien im Fokus. Deren Nutzung setzt sich in der Entwicklung effizienter und kostengünstiger Speicherkonzepte fort. Die Erarbeitung anwendungsspezifischer Lösungen, die einen größtmöglichen Nutzen des Speichers im Prozess erlauben, ist daher andererseits die Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz thermischer Energiespeicher in verfahrenstechnischen Prozessen.

Dementsprechend umfasst das F&E-Umfeld in Deutschland breite Forschungsaktivitäten im Materialbereich, die sich in den vergangenen Jahren insbesondere auf Phasenwechselmaterialien und thermochemische Materialien fokussiert haben. Hier findet im Rahmen europäischer und internationaler Projekte auch eine gute Vernetzung über Deutschland hinaus statt. Auf Seiten der Speicherentwicklung sind unterschiedliche kleinere Forschergruppen an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit Einzeltechnologien für jeweils spezifische Anwendungen aktiv. Es gibt nur wenige Forschungseinrichtungen (wie z. B. das DLR, das ZAE und das Fraunhofer ISE), deren Aktivitäten in diesem Bereich groß genug sind, um sich mit einem breiteren Spektrum an Technologien und Anwendungen befassen und entsprechende Synergiepotenziale schöpfen zu können.

Insgesamt nimmt die Forschung zu thermischen Energiespeichern in Deutschland an vielen Stellen eine europäisch und international führende Rolle ein. Hier wurden in den vergangenen 10 Jahren große technologische Fortschritte erzielt. Auch ist ein zunehmendes Interesse seitens der Industrie an dieser Technologie zu verzeichnen. Daraus resultieren zahlreiche Projekte mit Industriebeteiligung, die bereits bei noch niedrigen oder mittleren Technologiereifegraden (TRL 1-6) eine frühzeitige Einbindung der nutzerseitigen Anforderungen gewährleisten. Der Übergang neuer technologischer Lösungen vom Labor in die kommerzielle Anwendung insbesondere im Hochtemperaturbereich erfolgt bisher in wenigen Beispielen geförderter Projekte unter direkter Einbindung einzelner Firmen.

Für kommerziell verfügbare Lösungen wie Wasserspeicher oder Flüssigsalzspeicher erfolgt die Erarbeitung von Standards und Normen für die Industrie unter Einbindung des Wissens aus der Forschung.

Der F&E-Stand einzelner Technologien stellt sich in Deutschland wie folgt dar:

Wasserspeicher sind heutzutage bereits kommerziell (TRL 9) als drucklose Systeme mit einer maximalen Speichertemperatur von 100 °C, Niederdrucksysteme bis 150 °C und Ruths-Speicher mit typischen Drücken bis 40 bar und max. 250 °C verfügbar. Weitergehende Forschung erfolgt an Hochleistungs-Isolationsmaterialien für kleine Systeme, kostengünstigen Behältern und Untergrundlösungen für großskalige Speicher. Systemfragestellungen zu Pufferspeichern für solarthermische Anlagen werden

in Feldtests untersucht, und es werden Standards und Normen zur besseren Auslegung großer Systeme entwickelt.



Abb.2-1 Unterschiedliche Arten von Warmwasserspeichern: links: Pufferspeicher für den dezentralen Einsatz, Mitte und rechts: saisonale Speicher für Wärmenetze

Quelle: Kospel; ZAE; Arcon Sunmark

Hochtemperatur-Flüssigspeicher auf der Basis von Nitratsalzen werden seit einigen Jahren kommerziell in solarthermischen Kraftwerken eingesetzt (TRL 9). Gleichzeitig gibt es wenige Erfahrungen in Bezug auf die langfristige Stabilität der Salzmischungen und es wird an Kostensenkungspotenzialen durch eine Erweiterung des Temperaturbereichs und neuartige Speicherkonzepte geforscht. Die optimale Einbindung der Speicher in den Betrieb solarthermischer Kraftwerke ist ebenfalls Gegenstand der kooperativen Forschung. Als Technologietreiber im CSP-Bereich besitzt Deutschland diesbezüglich eine ausgeprägte Forschungslandschaft. Hochtemperatur-Flüssigspeicher auf der Basis von Flüssigmetallen (Natrium, Blei-Wismuth u. a.) sind bisher Nischenanwendungen vorbehalten. Entsprechende Forschungskapazitäten in Deutschland entspringen einem Technologietransfer aus dem Nuklearbereich.



Abb.2-2 Flüssigsalzspeicher in einem solarthermischen Kraftwerk

Quelle: DLR

Hochtemperatur-Feststoffspeicher werden in einzelnen Anwendungen, etwa in der Stahl- oder Glasindustrie oder zur Abluftreinigung, kommerziell eingesetzt. Ihr Einsatz in Kraftwerksprozessen befindet sich dagegen im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium und wird in einigen laufenden oder unlängst abgeschlossenen F&E-Projekten betrachtet, so etwa zur Flexibilisierung von GuD-Kraftwerken, für die Nutzung in CSP-Kraftwerken oder in adiabaten Druckluftspeicherkraftwerken (siehe Kapitel 2.1). In den genannten Anwendungen steht die Technologie vor der Demonstrationsreife (TRL 4-5). Im Solarturmkraftwerk Jülich ist die Technik im Pilotmaßstab realisiert. Zur Nutzung in Industriewärmeanwendungen (Stahl, Eisenguss)

gibt es Konzeptüberlegungen. Materialuntersuchungen zielen meist auf eine weitere Kostensenkung.

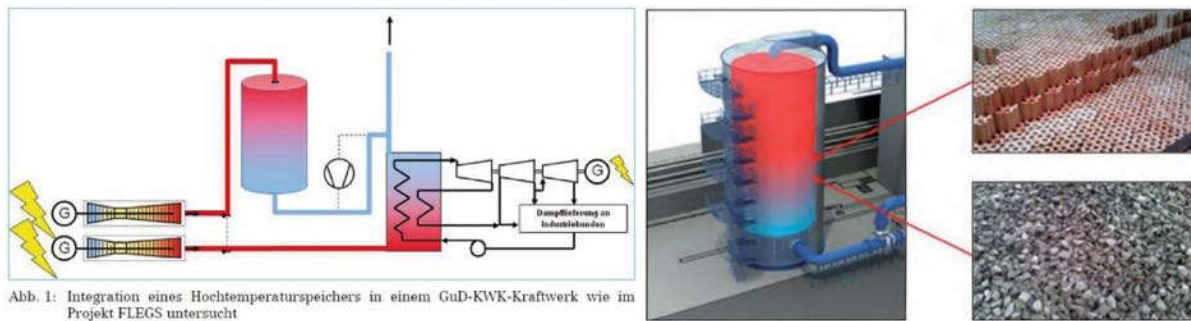


Abb. 1: Integration eines Hochtemperaturspeichers in einem GuD-KWK-Kraftwerk wie im Projekt FLEGS untersucht

Abb.2-3 Integration eines Feststoff-Schütttspeichers in einem 300 MW GuD-KWK-Kraftwerk

Quelle: RWE; DLR

Im Bereich von *Niedertemperatur-Latentwärmespeichern* kann ein breites Spektrum an Phasenwechselmaterialien als am Markt verfügbar betrachtet werden. Forschungsaktivitäten umfassen u. a. Arbeiten auf dem Gebiet der Materialverkapselung, der Erhöhung der Leistungsdichte und der Kostenreduktion. Sie zielen auf den Einsatz entsprechender Latentwärmespeicher in Low-Ex-Systemen im Gebäudebereich. Erste Umsetzungsbeispiele befinden sich in der Anwendung.

Passive *Hochtemperatur-Latentwärmespeicher* auf der Basis von Nitratsalz mit integriertem Rippenrohrwärmeübertragern für Dampfprozesse wurden in den vergangenen Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. Eine erste Demonstration im realen Anwendungsumfeld erfolgte durch die Integration eines 700 kW/700 kWh Experimentalspeichers in ein Dampfkraftwerk. Die Integration eines 6 MW/1,5 MWh-Leistungsspeichers zur Dampfbesicherung in einem Heizkraftwerk steht unmittelbar bevor (TRL 5). Laufende Entwicklungsanstrengungen adressieren Kostenreduktion und individuelle Anpassung der Technologie an spezifische Anwendungen.

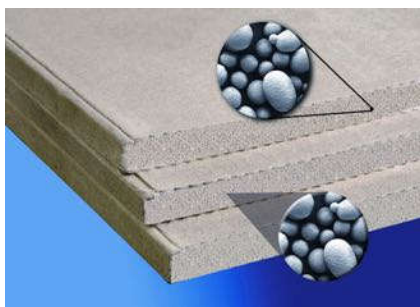


Abb.2-4 Latentwärmespeicher – links: Mikroverkapselte Niedertemperatur-PCM als Bauteil, rechts: Hochtemperatur-Kombi-Testspeicher mit sensiblem und latentem Teil zur Integration in ein Dampfkraftwerk

Quelle: BASF; DLR

Daneben zielen aktuelle Forschungsaktivitäten auf die Trennung von Leistung und Kapazität und die Stabilisierung der Entladekennlinie. Hierzu werden von einigen Forschergruppen (u. a. Fraunhofer ISE; DLR) vollständig neue, aktive Speicherkonzepte entwickelt. Diese aktiven Konzepte befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium (TRL 1-4). Es wird eine deutlich erleichterte Integration in zahlreiche Anwendungen sowie eine Vergrößerung der Anzahl potenzieller Anwendungen für Latentwärmespeicher erwartet.

Thermochemische Speicher befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium (TRL 3-4) und haben in den letzten 10 Jahren zunehmende Aufmerksamkeit und eine entsprechende Zunahme der Forschungsaktivitäten erfahren.

Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind im Bereich physikalischer Speichermaterialien zur Sorption sowie zu ausgewählten chemischen Reaktionssystemen zu verzeichnen. Zunehmenden Fokus erhielt die Untersuchung kombinierter Materialien zur Funktionsverbesserung sowie Fragestellungen zur Lebensdauer in Verbindung mit ggf. nachteiligen Materialveränderungen. Daneben adressierten einige Arbeiten die Reaktorentwicklung, insbesondere den Bereich der effizienten Wärmeübertragung vom/zum reaktiven Speichermaterial. Im Bereich der Entwicklung von Prototypen (TRL 3-4) wurden in den letzten Jahren einige nationale und europäische Forschungsprojekte abgeschlossen. Zielstellung war dabei jeweils der Funktionsnachweis spezifisch auf den Anwendungsfall angepasster Reaktorsysteme. Eine effiziente Integration in reale Systeme und eine entsprechende Skalierung ist ein noch ausstehender wichtiger Entwicklungsschritt – der nicht zuletzt auf Grund des frühen Entwicklungsstadiums dieser Technologie mit einem hohen Risiko und offenen wissenschaftlichen Fragestellungen verbunden ist.

Im Bereich der Kombination von Wärmespeicher und Wärmepumpe konnten nationale Projekte im Labormaßstab und bereits im Demonstrationsmaßstab erfolgreich abgeschlossen werden. Die wesentliche Herausforderung liegt auch hier im Bereich der effizienten Integration sowie der generellen Kostenreduktion.



Abb.2-5 Thermochemische Speicher – links: Mobiler Energiespeicher basierend auf Sorption an Zeolithen, rechts: Laboranlage zur Speicherung von Hochtemperaturwärme basierend auf der Reaktion von Kalk mit Wasserdampf

Quelle: ZAE; DLR

2.2 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Pumpwasserkraftwerke sind eine seit Jahrzehnten erfolgreich betriebene Stromspeichertechnologie (TRL 9). Ausgereifte Komponenten lassen nur noch geringe Verbesserungen bei Leistungsfähigkeit und Kosten erwarten. Die Überprüfung von Ideen nicht-konventioneller PSW – etwa unterirdischer Pumpspeicher – sind Gegenstand von Machbarkeitsstudien.

Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke sind heute Gegenstand von Entwicklungsprojekten (TRL 4-5). Einige der Komponenten sind aus den Betriebserfahrungen mit Kraftwerken der ersten Generation („diabate“ Druckluftspeicherkraftwerke) bekannt. Zu den neuen Komponenten Verdichterstrang und Wärmespeicher wurden in F&E-Aktivitäten der letzten 10 Jahre erhebliche Fortschritte gemacht. Adiabate Verfahrenskonzepte stehen vor der Demonstrationsreife. Die Investitionskosten wurden unter die Kosten von PSW gesenkt. Erfahrungen zum Gesamtsystem stehen noch aus und erfordern einen ersten Experimentalbetrieb.

Adiabate Flüssiglufthochdruckspeicherkraftwerke befinden sich mit Projekten in England in der Demonstrationsphase: eine erste Anlage („diabat“ geringer Wirkungsgrad, 500 kW) ist in Betrieb, eine zweite Anlage (5 MW) ist in der Bauvorbereitung. In Deutschland gibt es Entwicklungsanstrengungen in einem nationalen F&E-Projekt.

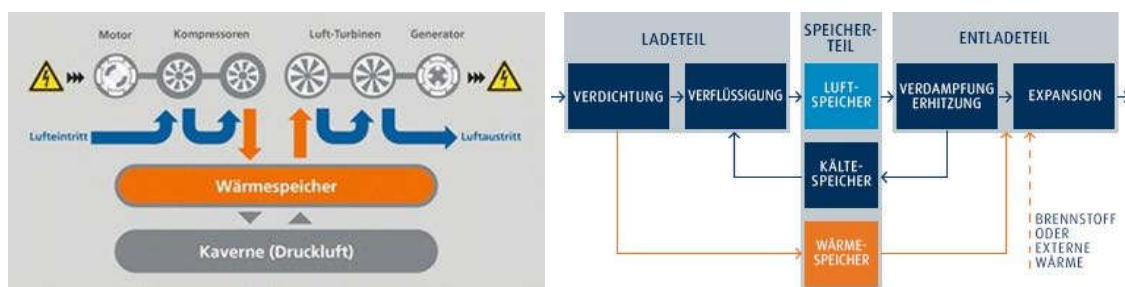


Abb.2-6 Luftbasierte Stromspeicher – links: Adiabates Druckluftspeicher-Kraftwerk, rechts: Adiabates Flüssiglufthochdruckspeicher-Kraftwerk

Quelle: DLR; Linde

Strom-Wärme-Strom-Speicher, d. h. *Thermopotenzialspeicher* und *Elektrowärmekraftwerke*, sind als Gesamtsystem in einem frühen Konzeptstadium. Unter Verwendung heutiger Technologie sind Systeme realisierbar, deren Wirkungsgrad jedoch erst durch die Einbindung innovativer Technologien in Wirkungsgradbereiche gebracht werden kann, die konkurrenzfähig sind. Dazu wurden von einigen Forschergruppen Konzeptüberlegungen und -berechnungen durchgeführt.

Schwungradspeicher sind kommerziell verfügbar (TRL 9). In den USA werden zwei 20 MW Anlagen zur Frequenzregulierung betrieben. In Deutschland wird ein 600 kW Speicher betrieben. Gleichzeitig gibt es F&E-Bedarf zur weiteren Senkung der Kosten und Erhöhung der Lebensdauer. Forschungsaktivitäten zielen etwa auf eine verbesserte Lagerung zur Verringerung der Selbstentladung und auf Materialentwicklungen zur Leistungssteigerung, etwa Magnetwerkstoffe und Verbundfasern für Rotoren.

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Die betrachteten Energiespeicher zur Speicherung von Wärme und Strom befinden sich in einem unterschiedlichen Nutzungsumfeld und werden daher separat betrachtet. Die einzelnen Technologien befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und werden daher z. T. ebenfalls separat betrachtet.

Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher decken bereits heute unterschiedlichste Aufgaben in sehr heterogenen Anwendungsumfeldern in Gebäuden und in Kraftwerks- oder Industrieprozessen ab.

In energieintensiven Industrieprozessen sind in der Regel Effizienzgewinne der Anreiz für ihren Einsatz. Mit künftig neu entstehenden Aufgaben bei KWK, der Verschiebung thermischer Lasten sowie der Dekarbonisierung der – heute im Wesentlichen fossil erzeugten – Industriewärme (siehe Kapitel 1.3.1) wird der Bedarf an thermischen Energiespeichern an der Sektorgrenze Strom-Wärme erheblich ansteigen. Umfassende Berechnungen zum Ausbaubedarf liegen, insbesondere im Bereich industrieller Prozesse, nicht vor. Erste, mit Unterstützung von Branchenvertretern durchgeführte Potenzialstudien sind angelaufen.

Bisher verfügbare kommerzielle Anlagen beruhen im Wesentlichen auf sensiblen Speichern. Im Hochtemperaturbereich sind diese Speicher auf den jeweiligen Anwendungsfall hin optimiert. Eine Anpassung für den Einsatz sensibler Hochtemperaturspeicher in anderen Anwendungen erfordert weitergehende technologische Lösungsansätze. Ebenso bedarf die Nutzung der spezifischen Vorteile latenter und thermochemischer Speicher einer vorhergehenden technologischen Weiterentwicklung – teilweise beginnend mit dem Verständnis grundlegender Fragestellungen. Die Dauer dieser Entwicklungsarbeiten hängt wesentlich von der Höhe der eingesetzten Fördergelder und den verfügbaren Forschungskapazitäten ab. Daran anschließend müssen erste Pilot- und Demonstrationsspeicher gemeinsam mit der Industrie im Anwendungsumfeld realisiert und umfassend getestet werden, um einer kommerziellen Einführung den Weg zu ebnen. Die Einordnung der Vorlaufzeiten erfolgt basierend auf Expertenwissen entsprechend der jeweils unterschiedlichen TRL auf Technologie-Ebene für

- Sensible Speicher / Hochtemperatur
- Latente Speicher / Niedertemperatur
- Latente Speicher / Hochtemperatur
- Thermochemische Speicher

Sensible Speicher im Niedertemperaturbereich (Wasserspeicher) sowie Latente Wärmespeicher als Kältespeicher (Eisspeicher) sind bereits heutzutage in kommerziellen Anlagen im Einsatz und werden daher nicht mehr in der Tabelle aufgeführt.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von thermischen Energiespeichern

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen...

Sensible Speicher / Hochtemperatur

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Latente Speicher / Niedertemperatur

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Latente Speicher / Hochtemperatur

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Thermochemische Speicher

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Derzeit werden noch keine zusätzlichen Stromspeicher zur Sicherung des Energiesystems benötigt, da die Erneuerbaren-Anteile noch ausreichend klein sind. Die Erlösmöglichkeiten sind für Stromspeicher wegen fehlender Anreizsetzung nicht gegeben und haben sich für die im Markt vorhandenen Speicherkraftwerke durch den Strompreisverfall der letzten Jahre eher verschlechtert.

Mit zunehmendem Anteil erneuerbaren Stroms werden Stromspeicher für Netzausgleich und Netzstabilität benötigt (siehe Kapitel 1.2.1). Einen groben Überblick über die Studienlage gibt die Metastudie Energiespeicher des Fraunhofer UMSICHT. Sie beschreibt Technologien und analysiert den Bedarf an Kurz- und Langfristspeichern, ohne spezifischer auf die Rolle einzelner Technologien einzugehen.

In den Studien werden für den Kurzzeit-Speicherbedarf häufig nur Pumpwasserkraftwerke adressiert. Die hier betrachteten Technologien ACAES, ALAES und SWS sind Alternativen und werden daher in der Bewertung als zentrale Kurzzeitspeicher für den Minuten- und Stundenbereich gesammelt betrachtet, siehe Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von zentralen Kurzzeit-Stromspeichern

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen...

Szenarienbereich DE_80 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Szenarienbereich DE_95 % bis 2020 bis 2030 bis 2040 bis 2050 nach 2050

Schwungradspeicher dienen im Energiesystem der Netzstützung und konkurrieren in dieser Funktion grundsätzlich mit Batterien. Eine Abgrenzung künftiger Marktanteile gegenüber Batterien hängt wesentlich von Kosten- und Lebensdauerentwicklung beider Technologien ab und ist derzeit nicht abschätzbar. Für die Vorlaufzeiten einer verstärkten Marktdurchdringung sind die Vorlaufzeiten von Lithium-Ionen-Batterien anzusetzen (siehe *Technologiefeld 3.3a: Energiespeicher (elektrisch und elektro-chemisch)*).

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Thermische Energiespeicher

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Die hier betrachteten Technologien zur thermischen Energiespeicherung besitzen unterschiedliche Entwicklungsgrade. Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums dieser Speicher ergeben sich zusätzliche Unterscheidungen im Entwicklungsgrad hinsichtlich des Temperaturbereichs. Es wird daher in Tab. 3-3 unterschieden in:

- T1 = Sensible Speicher / Wasserspeicher: Als Pufferspeicher sind diese sowohl in dezentralen Anlagen als auch in zentralen Anlagen in Verbindung mit Nah- und Fernwärmenetzen bereits kommerziell im Einsatz (TRL 9). Große saisonale Speicher befinden sich in Deutschland noch in der Demonstration (TRL 6-7), während sie in Dänemark bereits in kommerziellen Anlagen eingesetzt werden.
- T2 = Sensible Speicher / Hochtemperatur (Flüssigkeiten und Feststoffe): Es existieren kommerzielle Anlagen für einzelne ausgewählte Anwendungen (Regeneratoren für die Stahl- und Glasindustrie, Flüssigsalzspeicher für solarthermische Kraftwerke) mit TRL 9. Für andere Anwendungen in der Kraftwerkstechnik und in der Prozessindustrie wurden entsprechend angepasste, wirtschaftlich tragfähige Lösungen teilweise erst im Labor oder in der Anwendungsumgebung nachgewiesen (TRL 4-5).
- T3 = Latente Speicher / Niedertemperatur: Eisspeicher sowie erste passive Speicher zur Stabilisierung des Raumklimas sind bereits kommerziell im Einsatz (TRL 9), wohingegen sich Phasenwechselmaterialien in aktiven Speichern zur Gebäudeklimatisierung noch im Stadium erster Feldtests befinden (TRL 7-8).
- T4 = Latente Speicher / Hochtemperatur: Aufgrund nachhaltiger Förderung konnten passive Konzepte von Latentwärmespeichern für den Einsatz in Dampfprozessen bis zum Nachweis in anwendungsrelevanter Umgebung (TRL 6) weiterentwickelt werden. Aktive Konzepte wurden erst im Labor nachgewiesen (TRL 4).

Tab. 3-3 Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiegruppe Thermische Energiespeicher

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Grundlagenforschung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/ Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Demonstration		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionsfähigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TRL = Technology Readiness Level

T1 = Sensible Speicher / Wasserspeicher; T2 = Sensible Speicher / Hochtemperatur; T3 = Latente Speicher / Niedertemperatur; T4 = Latente Speicher / Hochtemperatur; T5 = Thermochemische Speicher / Sorption; T6 = Thermochemische Speicher / Gas-Feststoff-Reaktionen

- T5 = Thermochemische Speicher / Sorption: Abgesehen von einem einzelnen Beispiel (Geschirrspüler mit Zeolith), wurde die Funktionsweise von Sorptionssystemen bisher in anwendungsrelevanter Umgebung nachgewiesen und demonstriert (TRL 5-6).

- T6 = Thermochemische Speicher / Gas-Feststoff-Reaktionen: Die auf reversiblen chemischen Reaktionen beruhende Speicherung von Wärme wurde bisher für unterschiedliche Reaktionssysteme und mit unterschiedlichen Reaktorkonzepten im Labor nachgewiesen (TRL 3-4).

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Die *technischen Risiken* in der Entwicklung thermischer Energiespeicher sind entsprechend der unterschiedlichen Speichertechnologien unterschiedlich zu bewerten. Für *sensible Speicher* besteht ein eher geringes Risiko. Hier sind im Wesentlichen technologische Herausforderungen in Bezug auf Kostensenkungen zu lösen, wie z. B. der Einsatz von Schüttungen in Regeneratorspeichern oder die Verwendung des Eintankkonzepts mit Füllmaterialien als Ersatz des Zweitank-Systems bei Flüssigsalzspeichern. Disruptive Ansätze für den Hochtemperaturbereich mit alternativen Speichermaterialien (Halogensalzen, Flüssigmetallen) bergen ein höheres technologisches Risiko. Bei *latenten Speichern* stellt die Entwicklung effizienter Wärmeübertragungskonzepte die größte technologische Herausforderung dar. Deren Risiko ist insbesondere in Bezug auf aktive Konzepte als „hoch“ zu bewerten. Demgegenüber sind die zum Einsatz kommenden Phasenwechselmaterialien bereits gut erforscht. Das Entwicklungsrisiko *thermochemischer Speicher* ist als sehr hoch zu bezeichnen, da es hier sowohl auf Seiten des Speichermaterials als auch bei deren Nutzung mittels geeigneter Reaktorkonzepte noch grundlegende Fragestellungen zu klären gibt.

Die *wirtschaftlichen Risiken* für einen kommerziellen Einsatz thermischer Energiespeicher sind einerseits in der bisher nicht abzusehenden Kostensenkung in Laufe der Technologieentwicklung und durch Massenfertigung zu sehen. Andererseits hängen Investitionsentscheidungen von Speichern von der jeweiligen Erlössituation ab. Durch den vielfältigen Nutzen thermischer Energiespeicher sowohl zur Effizienzsteigerung als auch zur Flexibilisierung können Erlöse auf unterschiedliche Weise entstehen (Einsparung von Primärenergie, geringere Betriebskosten und längere Lebensdauern von Komponenten durch Speicher gestützte Betriebsweise, bessere Erlössituation in der Strom- oder Wärmeerzeugung etc.). Darüber hinaus spielen regulatorische Randbedingungen eine wesentliche Rolle bei der Quantifizierung des betriebswirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Nutzens. Das Risiko wurde daher für sensible Speicher als „eher hoch“ eingestuft. Latente Speicher und thermochemische Speicher haben höhere Investitions- und Betriebskosten, die sich nur im Falle eines entsprechend höher zu bewertenden Nutzens rechtfertigen lassen. Daher wurde das Risiko für diese beiden Technologien mit „hoch“ eingestuft.

Tab. 3-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Thermische Energiespeicherung

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Sensible Speicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Latente Speicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Thermochemische Speicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Generell haben thermische Energiespeicher kein nennenswertes Rohstoffrisiko, da ausschließlich kostengünstige Speichermaterialien zum Einsatz kommen. Insbesondere für Speicher mit niedrigen Zyklenzahlen müssen die Kosten des Speichermaterials so niedrig wie möglich liegen. Daher kommt hier z. B. im Niedertemperaturbereich bisher im Wesentlichen Wasser zum Einsatz. Für sensible Speicher im Hochtemperaturbereich gehen Bestrebungen ebenfalls in Richtung Einsatz von Naturmaterialien (Gestein) oder zur Verwendung von Abfallmaterialien (z. B. Schlacke aus der Stahlproduktion). Für die in latenten Speichern im Hochtemperaturbereich oder in Flüssigspeichern eingesetzten Salze besteht ebenfalls kein Rohstoffrisiko. Darüber hinaus werden als Feststoffe, die mit Gasen in einem physikalischen oder chemischen Prozess Wärme freisetzen, ausschließlich Rohstoffe eingesetzt, die in großen Mengen und kostengünstig verfügbar sind (z. B. Kalk).

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Die hier behandelten Stromspeicher haben deutlich unterschiedliche Reifegrade und daher auch unterschiedliche technologische Risiken.

Teilkriterien 2.1 Entwicklungsstadium und 2.2a Technisches F&E-Risiko

Pumpwasserkraftwerke sind eine etablierte Technologie und mit sehr geringem technischem Risiko behaftet.

Für *Druckluftspeicher-Kraftwerke mit adiabater Prozessführung (ACAES)* fehlt bisher die Demonstration in marktfähiger Größe. Insbesondere zu Hochdruck-Kompressor, Hochtemperatur-Speicher und Betriebsführung fehlen Erfahrungen. Auch ist die Technik bisher im Wesentlichen für den Kraftwerksmaßstab entwickelt und die bisherigen Konzepte nur begrenzt herunterskalierbar. Da auf vorhandener Technik aufgebaut werden kann, werden die technischen F&E-Risiken allerdings nur als moderat hoch eingeschätzt.

Tab. 3-5 Aktuelles Entwicklungsstadium der Technologiegruppe Zentrale Stromspeicher

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Grundlagenforschung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kommerzialisierung		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL = Technology Readiness Level

T1 = Pumpwasserkraftwerke (PSW); T2 = Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke (ACAES); T3 = Adiabate Flüssigluftspeicherkraftwerke (ALAES); T4 = Elektrowärmespeicherkraftwerke (EWK); T5 = Thermopotenzialspeicher (PHES); T6 = Schwungradspeicher (FW)

Flüssigluftspeicher mit adiabater Prozessführung (ALAES) stehen in England vor der Demonstration, wobei Ausführungsdetails nicht bekannt sind. In Deutschland

gibt es lediglich laufende Arbeiten zur Konzeption. Das technologische Risiko wird ähnlich wie bei ACAES-Anlagen eingeschätzt.

Thermopotenzialspeicher (PHES) sind bisher Gegenstand von Konzeptüberlegungen. Für Gasturbinen-basierte Prozesse wird - ähnlich wie bei ACAES-Anlagen - ein mit erhöhten Temperaturen arbeitender, bisher nicht verfügbarer Gas-Kompressor benötigt. Zu dem für einen Dampfturbinen-Prozess benötigten Dampfverdichter gibt es bisher keine Vorarbeiten. Zu Gesamtsystem und Betriebsführung gibt es bisher kaum Untersuchungen. Das technologische Risiko wird deshalb als hoch eingeschätzt. Für *Elektrowärme kraftwerke (EWK)* gibt es derzeit Demonstrationsaktivitäten. Die Technik benötigt weniger unbekannte Komponenten. Hier sind Wärmespeicher und die Hochskalierung von Power-to-Heat-Techniken die risikobehafteten Komponenten. Das technologische Risiko ist eher gering.

Schwungradspeicher sind weltweit in kommerziellem Einsatz. Laufende Arbeiten zielen auf Technologieverbesserungen. Das technische Risiko ist daher gering.

Teilkriterium 2.2b Wirtschaftliches F&E-Risiko

Für die vorgenannten Speicher bestehen derzeit keine günstigen Erlösbedingungen. Die künftigen Randbedingungen für ihren Einsatz und die Entwicklung konkurrierender Flexibilitätsmaßnahmen sind unsicher. Eine künftige Anreizsetzung ist derzeit nicht absehbar. Trotz der recht hohen - auch vom gewählten Szenario abhängigen - Wahrscheinlichkeit für einen künftigen Bedarf besteht daher erhöhtes wirtschaftliches F&E-Risiko.

Für *Schwungradspeicher* sind künftige Marktanteile in der Konkurrenz mit Batteriespeichern unsicher. Eine Kombination der Technologie mit Batterien zur Optimierung der Lebensdauer erscheint allerdings aussichtsreich. Es verbleibt daher ein eher hohes wirtschaftliches Risiko.

Tab. 3-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologiefeld Zentrale Stromspeicher

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Pumpwasserkraftwerke						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ACAES, ALAES						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Elektrowärmekraftwerk						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Thermopotenzialspeicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwungradspeicher						
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilkriterium 2.3 Rohstoffrisiken

Kritische Rohstoffabhängigkeiten sind für keine der behandelten Speichertechnologien bekannt. Grundsätzlich kommen ähnliche Materialien wie im Kraftwerksbau zum Einsatz. Für die in den Stromspeicherkonzepten eingesetzten Wärmespeicher werden – schon aus Kostengründen – gut verfügbare Materialien bis hin zu Natursteinen und Abfallstoffen verwendet.

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Thermische Energiespeicher

Im Bereich der Wärmespeicher gibt es keine belastbaren Studien, da deren Einsatz von vielen regulatorischen, ökonomischen und situativen Randbedingungen abhängt. Insbesondere im Hochtemperaturbereich gibt es aktuell noch keine systematischen Erhebungen. Erste Studien sind aktuell angelaufen (siehe auch Kapitel 3.1). Auch sind die Beiträge, welche Speicher zur Effizienzsteigerung in Industrieprozessen beitragen können, bisher nicht systematisch erfasst worden.

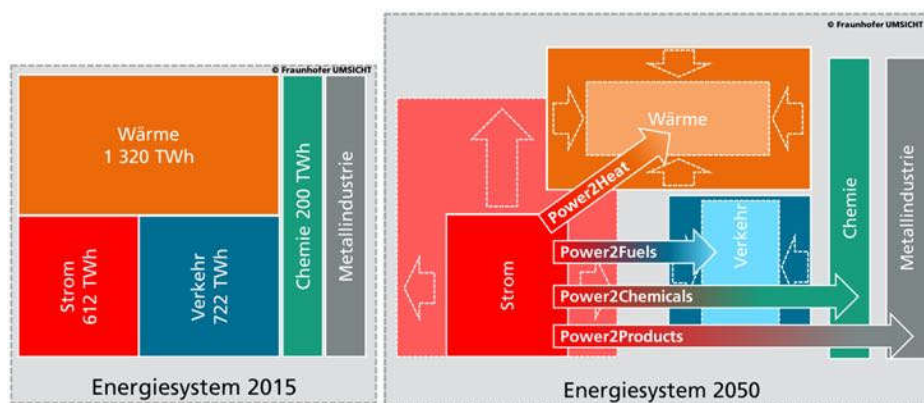


Abb.4-1 Illustration der Sektorenkopplung

Quelle: Fraunhofer UMSICHT

Die Kopplung der Sektoren wird den Bedarf an Speichern weiter erhöhen, da Speicher in der Regel die Schnittstelle zwischen den Sektoren darstellen (IEA 2014: 267).

Im Niedertemperaturbereich werden Warmwasserspeicher heute sowohl dezentral als auch zentral mit Wärmenetzen schon in Verbindung mit Solarthermie, Geothermie und Wärmepumpen eingesetzt. Im Hochtemperaturbereich gibt es einige Anwendungen für industrielle Prozesse (Cowper-Speicher, Regeneratoren in der Glasindustrie, Ruhspeicher) und für CSP-Kraftwerke.

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Da aufgrund des bestehenden Kraftwerksparks die fluktuierende Einspeisung der erneuerbaren Energie noch gut ausgegletzt werden kann, gibt es aktuell keinen dringenden Speicherbedarf – im Gegenteil sind die Speichernutzungen der bestehenden Pumpspeicherkraftwerke eher rückläufig. Dies wird sich mit steigendem Anteil der erneuerbaren Einspeisung und dem Erreichen der Lebensdauern der bestehenden Kraftwerke ändern. Die meisten Studien rechnen zwischen 2030 und 2040 mit einem deutlich steigenden Bedarf an Stromspeichern im Stromsystem. Langfristig zeigen alle Szenarien einen Bedarf an Stromspeichern, ein zukünftiges Energiesystem wird nicht ohne Speicher auskommen.

Die bestehende Studienlage differenziert kaum zwischen unterschiedlichen Speichertypen, oft werden nur „Energiespeicher“ ausgewiesen. Die unterschiedlichen räumli-

chen und zeitlichen Anforderungen an Speicher können im Rahmen dieser Erhebung nur schwierig erfasst werden. Die Zahlen für das im Folgenden genannte internationale Marktpotenzial stammen aus den „IEA Energy Technology Perspectives 2014“. Leider gibt es aus den Szenarien keine detaillierten Zahlen, nur im Speicherkapitel wird der Speicherbedarf für 2050 extrahiert. Die nationalen Zahlen entstammen aus den in der Metastudie Energiespeicher betrachteten Szenarien.

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Tab. 4-1 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Energiespeicher (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2°C (IEA ETP 2014, 2DS)		Szenarienbereich INT_besser_2°C (IEA ETP 2014, Breakthrough)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2014			85		85	
2020						
2030						
2040						
2050				309		521

Tab. 4-2 Analyse des globalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energiespeicher

Jahr	Szenarienbereich INT_2°C		Szenarienbereich INT_besser_2°C	
	Min	Max	Min	Max
2014 - 2050		224		436
CAGR 14-50		4 %		5 %

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

Tab. 4-3 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für das Technologiefeld Energiespeicher (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW		GW	
Einheit	Min	Max	Min	Max
2020	8,3	9,3	8,3	9,3
2030	9,3	11,9	9,3	11,9
2040	9,3	15,7	9,3	15,6
2050	9,3	15,7	9,3	15,7

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	TWh		TWh	
Einheit	Min	Max	Min	Max
2020	2	4,1	2,5	4,1
2030	1,4	4,5	3,7	4,5
2040	3	5,4	3	6
2050	4,6	6	4,5	8

Tab. 4-4 Analyse des nationalen Marktpotenzials für das Technologiefeld Energiespeicher

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW		GW	
Einheit	Min	Max	Min	Max
2014 – 2020	0	1	0	1
2021 – 2030	1	2,6	1	2,6
2031 – 2040	0	3,8	1	3,7
2041 – 2050	0	0	1	1
CAGR 14-50	0 %	2 %	0 %	2 %

Der Minimalausbau in Deutschland geht noch von einer geringen Erweiterung der vorhandenen Pumpspeicherkapazitäten aus. In den anderen Szenarien gibt es einen moderaten Zubau verschiedener Kurzzeitspeicher, die allerdings nicht differenziert ausgewiesen werden, dabei gibt es keine wesentlichen Unterschiede für die 80 % und 95 % Reduktionswelten.

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen

Die Emissionsminderung lässt sich für Energiespeicher als „Enabling Technology“ nur schwer quantifizieren. Daher werden die beiden unterschiedlichen Technologiefelder nur anhand qualitativer Aussagen beurteilt.

Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher tragen in dreierlei Hinsicht zum Erreichen der Klimaziele (CO₂-Reduzierung) bei:

- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (Solarthermie, Geothermie) zur Erzeugung von Niedertemperatur-Wärme im Gebäudesektor durch den Einsatz von Pufferspeichern und großen (saisonalen) Speichern
- Einsparungen oder Ersatz fossiler Primärbrennstoffe zur Erzeugung von Prozesswärme durch
 - Speicher-gestützte Power-to-Heat-Technologien (unter Verwendung von erneuerbarem Strom)
 - Nutzung Speicher-gestützter solarer Prozesswärme
 - Nutzung aufgrund des Einsatzes thermischer Speicher zusätzlich erschlossener Abwärmepotenziale
- Bereitstellung regelbaren erneuerbaren Stroms aus solarthermischen Kraftwerken mit thermischem Speicher im europäischen und internationalen Kontext

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Stromspeicher tragen zu Klima- und Emissionszielen bei:

- Erhöhung des erneuerbaren Anteils an der Stromerzeugung durch die netzkompatible Integration fluktuierender Stromerzeugung aus Wind und PV, Vermeidung der Abregelung von Wind und PV
- Verringerte Emissionen durch Vermeidung von ineffizienten Betriebspunkten beim Betrieb konventioneller Kraftwerke, etwa in der Nähe der Mindestlast.

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Auch der Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz lässt sich für Energiespeicher auf Grund der fehlenden Studienlage nicht qualitativ bewerten. Daher wird dieses Kriterium ebenfalls nur qualitativ bewertet.

Thermische Energiespeicher

Teilkriterium 5.1 Energieeffizienz

Der Beitrag thermischer Energiespeicher zur Energieeffizienz beinhaltet zwei Aspekte:

- In industriellen Prozessen können zusätzliche Effizienzpotenziale geschöpft werden, indem zeitlich oder im Temperaturniveau fluktuierend anfallende Abwärme durch den Einsatz thermischer Speicher nutzbar gemacht werden kann.
- Durch den Einsatz von KWK-Anlagen wird die eingesetzte Primärenergie mit höheren Effizienzgraden zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt. Erst der Einsatz thermischer Energiespeicher ermöglicht die bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme und Strom und führt zu einem breiteren Einsatz dieser Anlagen.

Teilkriterium 5.2 Ressourceneffizienz

Insgesamt werden für thermische Energiespeicher keine kritischen Rohstoffe eingesetzt. Außerdem werden diese durch die Nutzung zur thermischen Energiespeicherung nicht verbraucht, sondern können dem Ressourcenkreislauf wieder zugeführt werden. Darüber hinaus leisten thermische Energiespeicher direkte und indirekte Beiträge zur Ressourceneffizienz:

- Naturmaterialien oder Abfallprodukte (z. B. Schlacke) können direkt als thermisches Speichermaterial eingesetzt werden. Damit werden diese einer zusätzlichen Nutzung zugeführt. Gleichzeitig werden die Materialien während des Einsatzes zur thermischen Speicherung nicht verändert, so dass keine Entsorgungsproblematik entsteht.
- In zentralen fossilen Kraftwerken und industriellen Prozessen ermöglichen thermische Energiespeicher eine flexiblere Betriebsweise bei gleichzeitig geringerer Lastspreizung und niedrigeren Gradienten. Dies ermöglicht längere Lebensdauern einzelner Prozess-Komponenten und führt damit indirekt zu einer verbesserten Effizienz der eingesetzten Ressourcen.

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Teilkriterium 5.1 Energieeffizienz

Stromspeicher schaffen im Kraftwerkspark zusätzliche Flexibilität. Diese führt zu Effizienzgewinnen, da die verbliebenen konventionellen Kraftwerke bei günstigen Betriebspunkten betrieben werden. Insbesondere werden Betriebszustände bei Minimallast, hohe Lastgradienten und Kaltstarts vermieden.

Teilkriterium 5.2 Ressourceneffizienz

Stromspeicher tragen zur Ressourceneffizienz bei: Sie erhöhen die effektive Volllaststundenzahl fluktuierender Erzeuger und verringern damit deren Bedarf an Ausbauleistung. Sie tragen auch zur Vermeidung von Netzausbau bei, insbesondere im Verteilnetz.

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Aufgrund der vielfach noch fehlenden Marktreife von Energiespeichern und fehlender Studien wird dieses Kriterium nur qualitativ bewertet. Prinzipiell sind beim Einsatz von Speichern kostenseitig einerseits die Investitions- und Betriebskosten der Speicher anzusetzen. Diesen Kosten müssen andererseits die jeweiligen Erlöse im Nutzerprozess gegenübergestellt werden. Die Kosteneffizienz gegenüber einer Referenztechnologie oder einem Betrieb der Prozesse ohne Speicher lässt sich demnach nur unter Berücksichtigung beider Seiten beziffern.

Speicher an den Schnittstellen der Sektoren Strom und Wärme bzw. Strom und Verkehr tragen zu einer systemweiten Optimierung bei, bei dem die Gesamtflexibilität des Energiesystems erhöht wird. Wärme kann kostengünstiger gespeichert werden, im Sektor Verkehr können höhere Preise für Brennstoffe erlöst werden.

Thermische Energiespeicher

Teilkriterium 6.1 Einsparung direkter und indirekter Kosten

Generell lässt sich festhalten, dass im Jahr 2015 laut AGE-B-Datenlage 55,7 % der Endenergie für die Erzeugung von Wärme und Kälte eingesetzt wurden. Dies entspricht einem Gesamtwert von rund 1.350 TWh. Im Industriesektor wird laut Szenarienlage nicht von einem wesentlichen Rückgang des Energieverbrauchs ausgegangen, während im Gebäudesektor Effizienzsteigerungen von knapp 50 % erwartet werden. Insgesamt lässt sich damit jedoch auch im Jahre 2050 in einer 95 % Reduktionswelt von einem Verbrauch an Endenergie für die Erzeugung von Wärme und Kälte von über 1.000 TWh ausgehen. Dies bedeutet, dass der Wärmebereich einen erheblichen Hebel in den volkswirtschaftlichen Kosten darstellt.

Unabhängig von der jeweiligen thermischen Speichertechnologie lassen sich folgende spezifische Aussagen treffen:

- Die kapazitätsbezogenen Investitionskosten für thermische Energiespeicher sind generell niedriger als vergleichbare Kosten für andere Energiespeicher (Stromspeicher). Dies wird insbesondere an der Sektorgrenze Strom-Wärme zu neuen Speicheranwendungen führen.
- Thermische Energiespeicher können als Multi-Funktionsspeicher in bestimmten Prozessen einen Mehrfachnutzen – z. B. zur Effizienzsteigerung und Netzstabilisierung – erfüllen. Daraus lassen sich mehrfache Erlöse generieren, die sich kostenseitig positiv auswirken.
- Teilweise stellt der Einsatz von thermischen Energiespeichern im Vergleich zu anderen Optionen die kostengünstigste Lösung dar. So können bestehende fossile Kraftwerke mit Hilfe thermischer Energiespeicher sehr kostengünstig flexibilisiert und damit für eine Nutzung in der Übergangszeit zu höheren Anteilen erneuerbarer Stromerzeugung ertüchtigt werden.

Teilkriterium 6.2 Externe Kosten

Durch die Unterstützung in der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien und damit eingespartem CO₂ tragen thermische Energiespeicher zur Reduzierung oder Vermeidung externer Kosten bei.

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Teilkriterium 6.1 Einsparung direkter und indirekter Kosten

Stromspeicher können vielfältige Aufgaben im Energiesystem der Zukunft übernehmen. Dies sind (IEA 2014: 247 ff.):

- Im Rahmen der Erzeugung
 - Saisonale Speicher
 - Arbitrage
 - Integration von PV- und Winderzeugung
- Im Rahmen des Systembetriebs
 - Spannungs- und Frequenzhaltung
 - Lastfolgebetrieb
 - Reservekapazität
 - Schwarzstartfähigkeit
- Im Rahmen von Transmission und Verteilung
 - Engpassmanagement
 - Aufschub von Netzausbauinvestitionen

Diese Dienstleistungen stehen in einem Wechselverhältnis zueinander und zu anderen Flexibilitätsoptionen und deren jeweiligen Regulierungen. Die Kosteneffizienz von Stromspeichern hängt daher sehr stark von den jeweiligen regulativen Rahmenbedingungen, den Förderbedingungen und vom Zustand des Stromnetzes (Netzarchitektur, Lastprofile, Wetterbedingungen und Erzeugungsmix) ab, in dem sie eingesetzt werden (IEA 2014: 250). Speicher stehen dabei im Wettbewerb mit anderen Technologieoptionen, welche ähnliche Dienstleistungen anbieten können (z. B. Netzausbau, Smart-Grids, Erzeugungs- und Lastmanagement und thermische Speicher in thermischen Kraftwerken). Die Kostenwirkung lässt sich daher schon im Einzelfall nur schwer bestimmen, noch schwieriger ist daher eine grundsätzliche Aussage abzuleiten.

Eine grobe Abschätzung lässt sich durch die preissetzenden Technologien in den jeweiligen Anwendungen erreichen (IEA 2014: 251):

Tab. 4-5 Geschätzter Wert von Speichieranwendungen

Anwendung	Preissetzende Technologie	Wert USD/MWh
Saisonale und Langzeitspeicherung	LCOE Gas CCGT	70-105
Arbitrage	LCOE Gas CCGT	70-91
Frequenzregulierung	Markt	45-51
Lastfolge	LCOE Gas CCGT	99-193
Kurzzeitreserve	Markt	8-22
Kapazitätsreserve	Markt	4-8
Spannungshaltung	Langfristverträge	2-6
Investitionsaufschub für Transmission und Verteilung	LCOE CCGT	89-105
Netzferne Speicher	Dieselelgenerator	250-420

Bemerkungen: Die Bandbreite der Kosten für LCOE von Gas CCGT berücksichtigt verschiedene Volllaststunden, Gaspreise rangieren im Bereich von 4 – 10 USD per Mio. BTU. Marktpreise stammen aus 2005 von US Netzen in Kalifornien, ERCOT und New York.

Quelle: IEA (2014: 251)

In den „Energy Technology Perspectives 2014“ hat die IEA eine erste Abschätzung zu den Speicherkosten im Vergleich zu den preissetzenden Vergleichstechnologien durchgeführt (Abb.4-2).

Die hier betrachteten Technologien Pump- und Druckluftspeicher sowie Schwungradspeicher erreichen dabei sowohl heute als auch in 2030 den Kostenbereich der jeweils preissetzenden Technologie, sie können also die Dienstleistungen (tägliche Preisarbitrage, Unterstützung beim Engpassmanagement, Lastfolgebetrieb, Frequenzhaltung) der konventionellen Kraftwerke weitgehend kostenneutral ersetzen. In einem 2 °C-Szenario ist von der Steigerung des Wertes auszugehen (IEA 2014: 260).

Einer der wesentlichen Vorteile der Speichertechnologien ist, dass sie Nutzen in verschiedenen Anwendungen aggregieren können, so können z. B. die Bereitstellung von Reservekapazität und Schwarzstartfähigkeit komplementär zu anderen Anwendungen sein, so dass sich die Erlöse aus verschiedenen Anwendungen addieren können.



Abb.4-2 Vergleich der Speicherkosten mit den preissetzenden Konkurrenztechnologien

Quelle: IEA (2014: 259)

Teilkriterium 6.2 Externe Kosten

Durch die Unterstützung in der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien und damit eingespartem CO₂ tragen zentrale Stromspeicher Energiespeicher zur Reduzierung oder Vermeidung externer Kosten bei.

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Die bestehenden Studien zur Wertschöpfung beziehen sich vor allem auf die erneuerbaren Energieträger. Speicher sind dort bislang nicht untersucht worden. Sie werden erstmalig in der aktuellen Studie „Makroökonomische Wirkungen und Verteilungsfragen der Energiewende“ im Auftrag des BMWi analysiert. Noch gibt es hierzu keine Ergebnisse.

Da Wärmespeicher für Industrieprozesse in der Regel sehr anlagenspezifisch sind, ist von einem hohen Anteil inländischer Wertschöpfung auszugehen. Deutschland hat international eine führende Stellung im Spezialanlagenbau. Weitere Anteile betreffen den Hochbau, der in der Regel auch eine hohe inländische Wertschöpfung aufzeigt.

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Im Bereich thermischer Energiespeicher ist die deutsche Industrie wettbewerbsfähig bzw. hat in einigen kommerziell im Einsatz befindlichen Technologien und Anwendungsfeldern auch die Technologieführerschaft inne.

Für zentrale Stromspeicher besteht ebenfalls Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. An neueren Technologien besteht ein großes Interesse seitens der Industrie, so dass hier Wettbewerbsfähigkeit im Zuge der Kommerzialisierung zu erwarten ist.

Tab. 4-6 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Energiespeicherung

Thermische Energiespeicher	<input checked="" type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen
Zentrale Stromspeicher	<input type="checkbox"/> Technologieführerschaft	<input checked="" type="checkbox"/> wettbewerbsfähig
	<input type="checkbox"/> nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig	<input type="checkbox"/> abgeschlagen

Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Deutschland nimmt in der F&E für Energiespeicher eine deutlich führende Rolle ein. Deutschland ist das Land mit der zweithöchsten absoluten Energiespeicherförderung in der OECD, es wird nur von Japan übertroffen. In Japan ist die Förderung in den letzten Jahren allerdings rückläufig. In den geschätzten Zahlen des Jahres 2015 hat Deutschland Japan bereits überholt. Vergleichbar hohe Fördersummen für Energiespeicher werden außerdem noch in Kanada (27 M€), Korea (27 M€), Großbritannien (23 M€) und Frankreich (21 M€) eingesetzt.

Tab. 4-7 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Energiespeicher – Input-Orientierung

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene für Energiespeicher		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2014)	M€	37,422
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ €/a	19,930
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	28 %
Davon thermische Speicher (keine Trends, da erst ab 2014 in der IEA-Datenbank ausgewiesen)	M€	6,762
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	M€	834,812
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	4,5 %
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	9,7 %
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets für Energiespeicher in Japan		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	€	39,326
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ €/a	-10,44
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	-13 %
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	€	2638,98
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	1,5 %
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	22 %
F&E-Förderung der jeweiligen Technologie im OECD-Durchschnitt		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (2015)	€	359,104
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ €/a	24,44
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	9 %
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	€	15469,319
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	2,3 %
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	2,0 %

Teilkriterium 8.3 F&E-Outputs

Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands wurde keine quantitative Analyse der Veröffentlichungen und Patente durchgeführt. Dennoch ist aufgrund der Aktivitäten der Autoren in wissenschaftlichen und industriellen Netzwerken eine quantitative Bewertung der beiden Technologiefelder möglich:

Durch die seit einigen Jahren guten Förderbedingungen wurden in Deutschland Personal- und Wissens-Kapazitäten in diesem Bereich aufgebaut, die eine wissenschaftliche Führungsrolle sowohl im europäischen als auch im internationalen Umfeld er-

möglichen. Durch die in Deutschland vorhandene Mischung aus universitärer und außeruniversitärer Forschung werden gleichermaßen alle Ebenen von den Grundlagen bis zur anwendungsnahen Forschung bedient. Aufgrund des insgesamt hohen Interesses an innovativen Technologien zur Flexibilisierung im Strom- und Wärmesektor sowie zur Effizienzsteigerung finden sich auch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten seitens der Industrie. Dies ermöglicht im Vergleich zu anderen Ländern eine schon frühzeitig auch von der Anwendungsseite geprägte Entwicklung thermischer Energiespeicher und innovativer Stromspeicher wie ACAES, LAES und SWS.

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Thermische Energiespeicher

Die Einschätzung für thermische Energiespeicher wird entsprechend deren Anwendungen unterteilt, da sich hieraus sehr unterschiedliche Randbedingungen ergeben. In der Bewertung spielt vielfach die gesamte Anwendung eine Rolle, da der thermische Speicher erst im Gesamtsystem seinen Nutzen erbringen kann – also z. B. für Warmwasserspeicher die Nutzung von Solarthermie.

Tab. 4-8 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Thermische Energiespeicher zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)
Puffer-Warmwasserspeicher in Privat-Gebäuden (Bewertung basierend auf FVEE Positionspapier)	Mittlere Akzeptanz (3)	Vielfach persönlich motivierte Investitionsentscheidungen, Anreize durch regulatorischen Rahmen nicht ausreichend, Änderungen im Gebäudebestand schwierig, Alternativenmaßnahmen im Neubau	Eher hohe Akzeptanz (2)	Solarthermie wird nicht negativ diskutiert, allerdings erfährt PV aufgrund des Preisverfalls mehr Aufmerksamkeit	Hohe Akzeptanz (1)	Integration in Nebenräumen von Gebäuden bis zu einer gewissen Größe einfach möglich
Große (saisonale) Warmwasserspeicher (Bewertung basierend auf FVEE Positionspapier)	Mittlere Akzeptanz (3)	Zu heutigen Preisen wird die Re-Finanzierung über Brennstoff-Einsparung nicht erreicht. Technologie erfolgreich in Dänemark installiert.	Eher hohe Akzeptanz (2)	Solarthermie wird nicht negativ diskutiert, allerdings erfährt PV aufgrund des Preisverfalls mehr Aufmerksamkeit	Eher hohe Akzeptanz (2)	Kaum sichtbarer Eingriff bei Untergrundspeichern, Flächenverbrauch überschaubar bei überirdischen Speichern
Sensible Hochtemperatur-Speicher in industriellen und Kraftwerksprozessen	Mittlere Akzeptanz (3)	Ausgewählte Beispiele vorhanden (CSP, Stahl/Glas-Industrie, KWK), andere Bereiche noch nicht abschätzbar	Hohe Akzeptanz (1)	Thermischer Speicher wird nicht als relevante Einzelkomponente wahrgenommen	Eher hohe Akzeptanz (2)	Installation im industriellen Umfeld, keine (stark) gefährdenden Materialien, daher keine negative Auswirkung auf die Umgebung
Speichergestützte Power-to-Heat-Anwendungen	Mittlere Akzeptanz (3)	Einzelne Beispiele vorhanden (z. B. Elektrodenkessel für Fernwärme), ansonsten noch nicht abschätzbar	Hohe Akzeptanz (1)	Thermischer Speicher wird nicht als relevante Einzelkomponente wahrgenommen	Eher hohe Akzeptanz (2)	Installation im industriellen Umfeld, keine (stark) gefährdenden Materialien, daher keine negative Auswirkung auf die Umgebung

Bewertung mittels 5-stufiger Skala:

Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Tab. 4-9 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologiefeld Zentrale Stromspeicher zum Status Quo (2015)

Technologien	Ebene Markt		Ebene Gesellschaft		Lokale Ebene	
	Marktakzeptanz		Sozialpol. Akzeptanz		Lokale Akzeptanz	
	Kunden, Haushalte, Nutzer, Industrie: Wie viel investieren Marktakteure?		Sozio-politische Entwicklungen, gesellschaftliche Stimmung / Diskurse; Image		Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)	Bewertung	Begründung/Quelle (Studien)
Pumpspeicherkraftwerke	mittlere Akzeptanz (3)	Preisdifferenzen sind zur Zeit im Markt zu gering für weitere Investitionen (z. B. Attdorf)	mittlere Akzeptanz (3)	Pumpspeicher werden in der öffentlichen Debatte nicht negativ diskutiert. Wesentlicher Kritikpunkt ist der Landschaftseingriff (s. lokale Akzeptanz)	niedrige Akzeptanz (5)	Massive Eingriffe in die Landschaft (z. B. Diskussion im Pumpspeicherkraftwerk Attdorf)
Thermopotenzialspeicher	noch keine Erfahrungen					
Druckluftenergiespeicher	mittlere Akzeptanz	Preisdifferenzen sind zur Zeit im Markt zu gering	eher hohe Akzeptanz (2)	Bisher kaum diskutiert, aber auch kaum Auswirkungen auf die Gesellschaft.	eher hohe Akzeptanz (2)	Kaum sichtbare Eingriffe in die Landschaft
Schwungradspeicher	eher hohe Akzeptanz	Eine Anlage bereits im Betrieb, Marktpreise sind wie bei allen Speichertechnologien aktuell kritisch.	eher hohe Akzeptanz (2)	Bisher kaum diskutiert, kaum Auswirkungen auf die Umgebung.	eher hohe Akzeptanz (2)	Kaum Auswirkungen auf die Umgebung.

Bewertung mittels 5-stufiger Skala:

Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Thermische Energiespeicher

Niedertemperaturspeicher für Gebäude und Haushalt

Pufferspeicher für den dezentralen Einsatz sind heutzutage Standardkomponenten und haben daher sehr geringe Planungs- und Bauzeiten. Die Planung und der Bau großer (saisonaler) Speicher benötigt etwas mehr Zeit. Die Nutzungsdauer von Warmwasserspeichern liegt bei etwa 20 Jahren.

Hochtemperaturspeicher in Industrie und Kraftwerkstechnik

Die Planungszeit von thermischen Speichern hängt stark davon ab, ob Standardlösungen verwendet werden können, oder ob es sich um spezifische Einzellösungen

handelt. In beiden Fällen liegt die Planungs- und Bauzeit jedoch im Rahmen weniger Monate. Die Nutzungsdauer der Speicher entspricht derjenigen der industriellen Anlagen oder Kraftwerke und liegt somit bei 10 bis 40 Jahren.

Die Anlagen der Prozesse, in die ein Speicher integriert werden soll, haben teilweise sehr lange Investitionszyklen (Stahlindustrie), hohe Investitionsaufwendungen (Kraftwerke, Stahlindustrie, Chemie) oder können nicht abgeschaltet werden (z. B. Glasindustrie). Dadurch reduziert sich die Möglichkeit zur Nachrüstung von Anlagen oder es ist eine nachträgliche Integration von Speichern im laufenden Betrieb nicht möglich. Langfristig und bei kommerzieller Verfügbarkeit thermischer Speicher ist eine Integration bereits in der Planungsphase der Anlagen möglich.

Tab. 4-10 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit des Technologiefeldes Thermische Energiespeicher

Variable	Einheit	Niedertemperaturspeicher			Hochtemperaturspeicher		
		Heute	2030	2050	Heute	2050	2050
Planungszeit	Monate		1-3		1-3		
Bauzeit	Monate		1-6		2-6		
Heute übliche ökonomische Nutzungsdauer	Jahre		15-20		10-40		
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /kWh	0,1-10	0,1-10	0,1-10	25-120	15-80	15-70

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Zentrale Stromspeicher im Kraftwerksmaßstab benötigen für ihre Planung und Errichtung eine Vorlaufzeit, die derjenigen von Kraftwerken ähnelt und bei etwa 2-3 Jahren liegt. Der heutige Ausbau eines nicht flexibilisierten Kraftwerksparks verhindert den künftigen Bau flexiblerer Kraftwerke. Nachrüstmöglichkeiten sind unter Umständen begrenzt.

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Thermische Energiespeicher

Für die Bewertung werden 3 Anwendungsfälle definiert, die ebenfalls im sich anschließenden Kriterium 12 zur Systemkompatibilität verwendet werden.

- **Niedertemperaturspeicher (Warmwasserspeicher)** für Gebäude und Haushalte
Nah- und Fernwärme-Netze sind die Voraussetzung für eine Verteilung von Niedertemperaturwärme, die z. B. in solarthermischen Anlagen mit saisonaler Speicherung erzeugt wird. Auch fluktuierende Abwärme aus industriellen Prozessen, die über eine Zwischenspeicherung zur Wärmeversorgung von Gebäuden nutzbar gemacht wird, benötigt Nah- oder Fernwärmenetze zur Verteilung. Dezentrale Pufferspeicher für Einzelgebäude sind dagegen unabhängig von Infrastrukturen.

- **Hochtemperaturspeicher in Industrie und Kraftwerkstechnik**
Durch die Integration thermischer Speicher verändert sich die notwendige Infrastruktur für den Betrieb industrieller Anlagen und Kraftwerke üblicherweise nicht.
- **Speichergestützte Power-to-Heat-Anwendungen in industriellen Prozessen**
Bei einer zukünftig stark erhöhten Nutzung von Power-to-Heat-Anwendungen zur Bereitstellung bisher aus fossilen Brennstoffen erzeugter Prozesswärme ist eine Anpassung der Gas- und Stromleitungen für den industriellen Standort notwendig.

Tab. 4-11 Abhängigkeit des Technologiefeldes Thermische Energiespeicher von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Dezentrale Pufferspeicher (Warmwasser)		
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Große (saisonale) Warmwasserspeicher für Nah- und Fernwärme		
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hochtemperaturspeicher für industrielle und Kraftwerksprozesse		
Die Nutzung der Technologie(n) ist unabhängig von Infrastrukturen möglich.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von bestehenden Infrastrukturen abhängig.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen bestehende Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen neue Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Power-to-Heat-Anwendungen für industrielle Prozesse		
Die Nutzung der Technologie(n) ist unabhängig von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von bestehenden Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen bestehende Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen neue Infrastrukturen gebaut werden.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Stromspeicher hängen für ihre Nutzung von der Netzinfrastruktur ab und stellen für diese wiederum ein stabilisierendes Element dar.

Tab. 4-12 Abhängigkeit des Technologiefeldes Zentrale Stromspeicher von Infrastrukturen

	Ja	Nein
Die Nutzung der Technologie(n) ist <i>unabhängig</i> von Infrastrukturen möglich.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von <i>bestehenden</i> Infrastrukturen abhängig.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>bestehende</i> Infrastrukturen ausgebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen <i>neue</i> Infrastrukturen gebaut werden.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Thermische Energiespeicher

Für die Bewertung werden folgende Anwendungsfälle definiert:

- Niedertemperaturspeicher (Warmwasserspeicher) zur Pufferung oder zum saisonalen Ausgleich von Schwankungen in der Wärmeerzeugung (Heizwärme, Warmwasser)
- Hochtemperaturspeicher zur Effizienzsteigerung oder Flexibilisierung in industriellen oder Kraftwerksprozessen
- Speichergestützte Power-to-Heat-Anwendungen zur Bereitstellung von Prozesswärme oder Prozessdampf

Bei allen Anwendungsfällen wird die Systemgrenze so gewählt, dass unter dem System „thermischer Energiespeicher“ der Speicher inklusive der wärmeübertragenden Einheit und eventuell notwendiger Zusatzkomponenten, die für die Integration notwendig sind (z. B. Pumpen, Verdampfer, etc.), verstanden wird. Das thermische Speichersystem ist in den jeweiligen Nutzer-Prozess eingebettet – also z. B. die Solaranlage und Hausenergieversorgung, den industriellen Prozess, das Kraftwerk. Teilweise ist der Betrieb des thermischen Speichersystems von der Infrastruktur abhängig - teilweise kann das Speichersystem unabhängig betrieben werden (siehe Kriterium 11).

Anwendungsfall 1: „Niedertemperaturspeicher (Warmwasserspeicher) zur Pufferung und zum Ausgleich saisonaler Schwankungen in der Wärmeerzeugung“

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Grundsätzlich treten durch die Integration thermischer Speichersysteme keine unerwünschten oder negativen Auswirkungen auf solar- oder geothermische Anlagen, die Gebäudetechnik oder Wärmenetze auf.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Da der kosteneffiziente Einsatz saisonaler Speichersysteme nach heutigem Entwicklungsstand ausschließlich in großen Skalen sinnvoll ist, werden die entsprechenden

Nah- oder Fernwärmenetze benötigt. Erzeuger- und abnahmeseitig müssen die notwendigen Regeleinheiten installiert werden, um einen effizienten Betrieb komplexer Systeme zu gewährleisten.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Der Einbau thermischer Speichersysteme in Wärmenetze führt zu einer besseren Regelbarkeit durch den Ausgleich von fluktuierender Erzeugung (z. B. durch Solarthermie) und verbrauchsspezifischer Abnahme. Bei einer hohen Durchdringung der Wärmeversorgung mit Wärmenetzen steigt der Anteil erneuerbarer Energien (Solarthermie, Geothermie und PV), die speichergestützt systemkompatibel eingebunden werden können. Diese Technologien stehen in Konkurrenz mit einer Biomassebasierten Wärmeerzeugung.

Gleichzeitig sind der Einsatz energieeffizienter Gebäudetechnik und damit eine Reduzierung des thermischen Energiebedarfs im Gebäudebereich an sich notwendig.

Anwendungsfall 2: „Hochtemperaturspeicher zur Effizienzsteigerung oder Flexibilisierung in industriellen oder Kraftwerksprozessen“

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Die Integration thermischer Speichersysteme hat keine unerwünschten oder negativen Auswirkungen auf industrielle Anlagen sowie zentrale oder dezentrale Kraftwerke. Da es sich in vielen Fällen um die Speicherung von im Prozess auftretender Wärme handelt, welche die Prozessgrenze meist nicht verlässt, treten auch keine Rückwirkungen mit andern Systemkomponenten auf.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Zur Auskopplung von Hochtemperaturwärme aus Industrieprozessen werden entsprechende Wärmeübertrager benötigt. Insbesondere für die Übertragung aus partikel- oder schadstoffbelasteten Abwärmeströmen mit sehr hohen Temperaturen ist eine Weiterentwicklung gegenüber dem heutigen Stand der Technik notwendig. Wird die gespeicherte Wärme aus Industrieprozessen als solche wieder in den Prozess reintegriert, sind keine zusätzlichen Technologien notwendig. Im Falle einer Umwandlung der Wärme in Kälte oder Strom werden die entsprechenden Umwandlungsaggregate benötigt. Die Abgabe der gespeicherten Wärme als Niedertemperaturwärme setzt einen Anschluss an vorhandene Wärmenetze bzw. deren Ausbau voraus.

Für die Flexibilisierung von Kraftwerksprozessen hängt die Integration von Speichern von detaillierten Untersuchungen der Kraftwerkskonfigurationen und des speichergestützten Kraftwerksbetriebs ab, denn der Speicher als Zusatzkomponente hat weitreichende Rückwirkungen auf den dynamischen Betrieb anderer Komponenten. Es sind außerdem Anpassungen der Wärmespeichertechnologien an die spezifischen Anforderungen nötig. Für Steinkohlekraftwerke werden diese Aufgaben in einem ersten, kürzlich angelaufenen BMWi-Projekt adressiert.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Die Integration von thermischen Energiespeichersystemen konkurriert sowohl in industriellen Prozessen als auch in Kraftwerken mit anderen Optionen zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung. Gleichzeitig sind die Optionen innerhalb dieser verfahrenstechnischen Prozesse aufgrund deren Komplexität und expliziter Betriebsweise vielfach sehr limitiert, sodass nicht jede Technologie beliebig zum Einsatz kommen kann. Mit der Flexibilisierung von Kraftwerken können thermische Energiespeicher einen netzdienlichen Beitrag zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energiequellen liefern und damit den notwendigen Netzausbau reduzieren.

Anwendungsfall 3: „Speichergestützte Power-to-Heat-Anwendungen zur Bereitstellung von Prozesswärme oder Prozessdampf“

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Bei einem hohen Anteil des Ersatzes von bisher mit fossilen Brennstoffen erzeugter Prozesswärme durch speichergestützte Power-to-Heat-Systeme werden entsprechend höhere Mengen erneuerbaren Stroms benötigt. Da dieser vermutlich nicht an den entsprechenden Industriestandorten erzeugt werden kann, würde ein Ausbau der Stromnetze notwendig.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Abhängig vom konkreten Anwendungsfall (industriellen Prozess) muss eine Hybridisierung oder Elektrifizierung der entsprechenden wärmeerzeugenden Komponenten erfolgen.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Abhängig von der Größe des thermischen Energiespeichers können entsprechend flexibilisierte industrielle Anlagen zum Demand-Side-Management genutzt werden und damit Netzdienlichkeit zur Verfügung stellen. Damit werden Industriebetriebe zu aktiven Teilnehmern des Strommarktes, indem sie unterschiedliche Flexibilitätsprodukte anbieten.

Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Für die Bewertung wird folgender Anwendungsfall definiert:

- Stromspeicher mit einer Speicherkapazität von 4-9 Stunden zum Ausgleich von Erzeugung und Lastschwankungen bzw. zur Nutzung von Preisdifferenzen am Strommarkt (Arbitrage).

Anwendungsfall 4: „Stromspeicher 4-9 Stunden“

Teilkriterium 12.1 Rückwirkungen

Grundsätzlich stehen Stromspeicher in Wechselwirkung mit dem Stromnetz. Die Rückwirkungen hängen dabei von ihrem Betriebszweck ab. Bei einem netzdienlichen Betrieb – etwa im Verteilnetz – können Überlastungssituationen vermieden und so

erheblich zur Netzstabilisierung beigetragen werden. Bei der Veredlung von nicht steuerbarer „Grundlast“ treten Stromspeicher im Falle der Einspeicherung und Auspeicherung als zusätzliche Lasten bzw. Erzeuger im Stromsystem auf, so dass ggf. eine höhere Netzbelastung erwartet werden kann.

Teilkriterium 12.2 Anpassungsbedarf

Stromspeicher lassen sich wie andere Verbraucher und Erzeuger in das Stromnetz integrieren. Grundsätzlich führen sie zu einer verbesserten Robustheit des Gesamtsystems. Bei der Veredlung von Grundlast und Bereitstellung von Reserveleistung können zusätzliche Netzbelastungen durch geeignete Positionierung der Speicher im Netz klein gehalten werden.

Teilkriterium 12.3 Wechselwirkungen

Stromspeicher erhöhen vor allem die Flexibilität des Gesamtsystems und unterstützen daher die Integration von nicht flexibler Erzeugung und Last in das Gesamtsystem, in dem sie zum Zeitpunkt der Einspeisung nicht nutzbare Energie aufnehmen und zum Zeitpunkt des Lastbedarfs nicht bereitstehende Erzeugung ersetzen können.

Sie stehen dabei in Konkurrenz zu anderen Optionen der Systemflexibilisierung wie Demand Side Management, Sektorenkopplung sowie einer Flexibilisierung der konventionellen Erzeugung. Ebenfalls in Konkurrenz stehen dabei zentrale Großspeicher im Übertragungsnetz mit Stromspeichern im Verteilnetz bzw. innerhalb des Einflussbereiches der Stromkunden.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Die im Vorgängerprojekt „Energietechnologien 2050“ (Wietschel et al. 2010) für das Technologiefeld „Speicher“ ausgesprochenen Empfehlungen haben technologisch breit angelegte F&E-Anstrengungen mit Schwerpunktsetzungen bei Druckluftspeicher-Kraftwerken, H₂-GuD-Kraftwerken, Redox-Flow-Batterien, Lithium-Ionen-Batterien und thermischen Speichern gefordert. Außerdem wurden stabile legislative, politische und energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen für Investitionen zur technischen Umsetzung der Technologien angemahnt.

Die technologische Entwicklung wurde mit der „Förderinitiative Energiespeicher“ und im „6. Energieforschungsprogramm“¹ adressiert. Anreizsetzungen in den Sektoren Strom und Wärme fehlen allerdings bisher weitgehend. Zusammen mit den – insbesondere an den Strommärkten – gesunkenen Erlösaussichten für Speicherinvestitionen führt dies dazu, dass die Entwicklung bei Pilotprojekten hinter den Erwartungen zurückbleibt.

Wärme- und Stromspeicher sind für ein Gelingen der Energiewende unverzichtbar; sie werden mittel- und langfristig integrale Bestandteile des Energiesystems sein. Für eine zeitgerechte Verfügbarkeit sind heute die erforderlichen F&E-Anstrengungen anzustoßen. Ein kommerzieller Betrieb von Speichern ist heute nur in Nischenanwendungen möglich. Um ein Stocken der Innovationsprozesse in den Demonstrationsphasen zu vermeiden, ist die Markteinführung zu unterstützen.

Aus den Ergebnissen der obigen Abschnitte leiten sich die nachfolgenden technologiespezifischen F&E-Empfehlungen ab.

5.1 Thermische Energiespeicher

Unterschiedliche Technologien zur Speicherung thermischer Energie werden in verschiedenen jeweils von großer Heterogenität und hoher Komplexität geprägten Anwendungsumfeldern eingesetzt. Einzelne, insbesondere sensible thermische Speicherlösungen haben sich bereits für spezifische Anwendungen kommerziell durchgesetzt. Weiterführende Ansätze sensibler, latenter und thermochemischer Speicher befinden sich noch auf einem niedrigeren technologischen Reifegrad. Gleichzeitig sind die Randbedingungen und Potenziale auf Anwendungsseite vielfach noch nicht systematisch erfasst und unterliegen einem stetigen Wandel aufgrund des sich verändernden Energiesystems.

Es ergeben sich daher zwei Stoßrichtungen für F&E-Empfehlungen in Bezug auf die Weiterentwicklung und den gewinnbringenden Einsatz von thermischen Energiespeichern:

¹ Siehe dazu Bundesanzeiger BAnz AT 30.12.2014 B1, Abschnitt 3.8.

- 1 | Zum einen bedarf es der *Weiterentwicklung sensibler, latenter und thermochemischer Speicher innerhalb der Technologielinien* entsprechend des jeweiligen Entwicklungsstandes (TRL) mit Blick auf die Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungen. Der Forschungsbedarf umfasst hier im Einzelnen die folgenden Punkte:
 - Effizienzsteigerung und Kostensenkung von großen Warmwasserspeichern müssen durch Minimierung der thermischen Verluste, Verwendung kostengünstiger Fertigungsmethoden und Standardisierung in der Auslegung und Umsetzung der Speicher erreicht werden.
 - Bei sensiblen Hochtemperaturspeichern muss die Entladedynamik und der Temperaturbereich durch ein angepasstes Speicherdesign an die Erfordernisse der Anwendungen angepasst werden. Darüber hinaus sind die Kosten weiter zu senken und hohe Lebensdauern sicherzustellen. Dabei sind sowohl der Einsatz von kostengünstigen Speichermaterialien oder Materialien für einen breiteren Temperaturbereich als auch neue Speicherkonzepte zu untersuchen.
 - Latente Speicher im Niedertemperaturbereich müssen insbesondere für Anwendungen mit niedrigem treibendem Temperaturgefälle (Low-Ex-Anwendungen) optimiert und in Feldtests für einen Einsatz im Gebäudebereich qualifiziert werden. Darüber hinaus sind weitere Verbesserungen der eingesetzten Phasenwechselmaterialien in Bezug auf die Wärmeübertragung und die Zyklenfestigkeit zu erreichen. Dabei ist ein Augenmerk auf die Verkapselung der Materialien zu richten, was Kosten und Langzeitstabilität angeht.
 - Im Hochtemperaturbereich müssen der Wärmeübergang in latenten Speichern verbessert, der Ladezustand bestimmt und die Kosten gesenkt werden. Dazu sind neue Speicherkonzepte zu entwickeln, die einerseits eine Entkopplung von Leistung und Kapazität des Speichers und andererseits eine kontrollierte Leistungsabgabe während der Entladung ermöglichen (aktive Konzepte). Auch sind „Hybrid-Konzepte“ zu entwickeln, mit welchen der sensible und der latente Anteil des Speichermaterials genutzt werden kann.
 - Die in thermochemischen Speichern eingesetzten Materialien müssen unter Anwendungsbedingungen charakterisiert werden. Anhand dieser Daten muss ein vertieftes Verständnis der Überlagerung von chemischer Reaktion, Wärme- und Stofftransport erarbeitet werden. Dem schließt sich die Entwicklung von Reaktorkonzepten an, welche die spezifischen Vorteile thermochemischer Systeme nutzbar macht. Die intelligente Prozessintegration insbesondere auch des gasförmigen Reaktionspartners stellt einen weiteren Schwerpunkt dar. Insbesondere bei der Langzeitspeicherung ist ein kritischer Blick auf die LCA der eingesetzten Materialien zur Speicherung, aber auch des Reaktors dringend geboten.
- 2 | Zum anderen sind Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen aus den unterschiedlichen Anwendungen heraus notwendig, um vorhandene Potenziale systematisch zu erheben, Prozessrandbedingungen zu erfassen und schlussendlich *optimierte Konzepte zur Integration thermischer Speicher* zu erarbeiten. Für die Betrachtung dieser Fragestellungen sollte prinzipiell Neutralität bezüglich der unterschiedlichen thermischen Energiespeichertechnologien gewährleistet sein. Für die unterschiedlichen Anwendungsfälle ergeben sich folgende Aspekte:

- In Wärmenetzen muss durch den Einsatz von Niedertemperaturspeichern der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeerzeugung erhöht werden. Gleichzeitig müssen smarte Systemkonfigurationen unter Einbeziehung unterschiedlicher Technologien zur Kopplung des Stromsektors mit dem Wärmesektor erarbeitet werden, welche die bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme gewährleisten.
- Die Flexibilisierung von Kraftwerksprozessen durch den Einsatz von thermischen Energiespeichern in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen stellt ein wichtiges Bindeglied zwischen dem Strom- und dem Wärmemarkt dar. Die Weiterentwicklung innovativer Speichertechnologien sollte sichergestellt werden, um die Systemdienlichkeit dieser Anlagen weiter zu verbessern, auch wenn deren Wirtschaftlichkeit aktuell nicht immer gegeben ist. In fossilen Kraftwerken muss der Einsatz thermischer Energiespeicher als eine Nachrüst-Option zur Flexibilisierung untersucht werden. Dafür sind kostengünstige und zyklenstabile Hochtemperaturspeicher notwendig.
- Zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung energieintensiver industrieller Prozesse müssen diese gemeinsam mit den Prozessbetreibern detailliert analysiert werden, um die realisierbaren Potenziale systematisch zu erfassen. Soweit möglich müssen daraus standardisierte, Branchen-übergreifende Lösungen für die Integration thermischer Energiespeicher entwickelt werden.
- An der Sektorengrenze zwischen Strom und Wärme muss der Beitrag speicher-gestützter Power-to-Heat-Anwendungen untersucht werden. Dabei sind nicht nur Niedertemperaturanwendungen zu betrachten, sondern auch neue Lösungen im Hochtemperaturbereich zur Bereitstellung von Prozesswärme oder Prozessdampf zu erarbeiten. Diese müssen einerseits unter Berücksichtigung der industriellen Randbedingungen in die Prozesse integrierbar sein und bedingen andererseits die entsprechenden technologischen Speicherlösungen.
- Für alle Anwendungen sollte die Ökonomie der unterschiedlichen Speicheranwendungen untersucht werden, unter welchen Randbedingungen sich für Speicher lohnenswerte Geschäftsmodelle entwickeln lassen. Dabei geht es sowohl um die Ausgestaltung der Prozesse als auch der politischen Rahmenbedingungen, welche Speicher lohnenswert machen.

Aus den Ergebnissen der Forschung und Entwicklung in den beiden oben genannten Bereichen lassen sich die jeweils technisch und ökonomisch am meisten versprechenden thermischen Speicherlösungen für die unterschiedlichen Anwendungsfälle ableiten. Daraus ergibt sich eine dritte wichtige Stoßrichtung für die Entwicklung, damit ein kommerzieller Markteintritt dieser innovativen neuen Ansätze erreicht werden kann:

- 3 | Dabei handelt es sich um die *Realisierung und Demonstration* neuartiger Lösungsansätze für thermische Energiespeicher im jeweiligen Anwendungsumfeld. Vielfach handelt es sich dabei um sogenannte „First-of-its-kind“-Anlagen, die mit einem hohen technischen und wirtschaftlichen Risiko behaftet und damit auf eine öffentliche Förderung angewiesen sind. Die hierfür notwendigen Pilot- und Demonstrationsprojekte erbringen wichtige Betriebserfahrungen der Testspeicher, ermöglichen eine Bewertung und gegebenenfalls eine Verbesserung deren

Charakteristik im Anwendungsprozess und dienen gleichzeitig als Leuchttürme für einen breiteren Markteintritt.

5.2 Zentrale Stromspeicher (mechanisch und thermisch)

Der in Studien errechnete Ausbaubedarf für Stromspeicher variiert stark mit den zugrunde gelegten Annahmen. Bei aktuellem Marktdesign werden Stromspeicher ab etwa 2025-2030 eine Rolle spielen. Für dezentrale Speicher im Verteilnetz ist ein früherer Markteintritt möglich. Danach wird der Speicherbedarf allerdings schnell ansteigen: ab etwa 40 %-igem Anteil Erneuerbarer an der Stromversorgung läge der Speicherbedarf deutlich über der heutigen Speicherkapazität von etwa 40 GWh.

Zwar konkurrieren Speicher mit anderen Flexibilitätsmaßnahmen (etwa Kraftwerksflexibilisierung, Lastverschiebung, Ausbau Stromnetze), allerdings sind die Nutzungspotenziale der Alternativen beschränkt bzw. Speicher und ihre Alternativen stellen eine gegenseitige Ergänzung dar.

Da für die Entwicklung, Erprobung im Pilotmaßstab und Realisierung der Stromspeichertechnologien erhebliche Zeitvorläufe erforderlich sind, sollten F&E-Anstrengungen heute fortgesetzt und forciert werden. Für die vorgenannten Speicher bestehen derzeit keine günstigen Erlösbedingungen. Ein Erhalt des bisher erreichten Wissensstands und ein weiterer Ausbau hängt daher von einer Förderung – insbesondere auch bei der Pilotisierung – ab. Diese sollte auch dann ermöglicht werden, wenn aufgrund derzeit ungünstiger Erlösbedingungen die industriellen Beiträge geringer ausfallen.

Die F&E-Arbeiten zu *adiabaten Druckluftspeicher-Kraftwerken* (ACAES) haben einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand und erhebliche Kostensenkungen erreicht. Sie erfordern weitere Anstrengungen zur Systemerprobung und Betriebsführung.

Adiabate Flüssigluftspeicher (ALAES) und *Thermopotenzialspeicher* (PHES) stellen weniger entwickelte Alternativen dar, die standortunabhängig realisiert werden können. Sie erfordern F&E-Anstrengungen zu Komponenten (Turbomaschinen, Wärmespeicher, Kältespeicher für ALAES) und zur Systemebene (Entwicklung leistungsfähiger Prozessvarianten, Betriebsführung).

Elektrowärmekraftwerke (SWS) stellen eine technisch weniger anspruchsvolle Übergangslösung mit geringerem Wirkungsgrad dar. Hier sind F&E-Anstrengungen zur direktbeheizten Speicherkomponente sowie zu Systemerprobung und Betriebsführung nötig.

Schwungradspeicher sind für Speicherdauern im Minutenbereich heute die Technologie mit der besten Lebensdauer bei hohen Zyklenzahlen. Ihre Vorteile sind daher komplementär zu denen von elektrochemischen Systemen. Ein Betrieb im Verbund mit größerem Batteriesystem ist daher aussichtsreich. Weitere F&E zur Verbesserung von Energiedichte, Lebensdauer und Kosten ist daher erforderlich.

5.3 Querschnittsthemen

Die Entwicklung der Speicher im Energiesystem wird stark vom regulatorischen Rahmen beeinflusst. Es bedarf daher weiterer Forschungsanstrengungen, wie die regulatorischen Rahmenbedingungen ausgestaltet werden sollten, damit sowohl ther-

mische Energiespeicher als auch Stromspeicher ihre Rolle zur Dekarbonisierung des Energiesystems beitragen und Systemstabilität gewährleisten können.

Das Potenzial der *thermischen Energiespeicherung in Industrieprozessen* zu Dekarbonisierung ist noch relativ wenig erforscht. Hier bedarf es weiterer branchenübergreifender, systematischer Erhebungen zur Erfassung der Potenziale zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung. In diesem Zusammenhang sind die Zusammenarbeit wissenschaftlicher Institutionen und industrienaher Forschungsgruppen (z. B. der Verbandforschungsinstitute) sowie die direkte Einbindung einzelner Industrieunternehmen von grundlegender Bedeutung. Basierend auf diesen Analysen muss erarbeitet werden, wie systematische Anreizstrukturen geschaffen werden können, damit energieintensive Industrieunternehmen einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten und gleichzeitig international konkurrenzfähig bleiben können.

Literaturverzeichnis

- DLR; Fraunhofer IWES; IfnE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht an das BMU vom 29.03.2012. FKZ 03MAP146.
- EASE; EERA (2015): Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030, <https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/148885-EASE-recommendations-Roadmap-04.pdf>.
- EASE; EERA (2017): Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030 – Update, Veröffentlichung im Frühsommer 2017. <http://ease-storage.eu/event/ease-eera-energy-storage-technology-development-roadmap-workshop/>.
- FVEE Positionspapier (2015): Erneuerbare Energien im Wärmesektor – Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven. http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/15.EE-Waerme/15_FVEE-Positionspapier_EE-Waerme.pdf.
- Genoese, F.; Wietschel, M. (2011): Großtechnische Stromspeicheroptionen im Vergleich. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 61 (6) 26-31.
- IEA (2014): *Energy – Technology Perspectives 2014*.
- IEA (2014): *Technology Roadmap Energy Storage*. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): *Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit*. Berlin, Karlsruhe.
- Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Dötsch, Christian; Herkel, Sebastian; Krewitt, Wolfram; Markewitz, Peter; Möst, Dominik; Scheufen, Martin (2010): *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*. ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. <https://www.energietechnologien2050.de>