

Rolle thermischer Speicher im zukünftigen Energiesystem



ZAE
Dr. Stefanie Tafelmeier
stefanie.tafelmeier@zae-bayern.de

DLR
Dr. Stefan Zunft
stefan.zunft@dlr.de

Fraunhofer ISE
Stefan Gschwander
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de

Thermische Energiespeichertechnologien

Die Motivation für eine nachhaltige Energieversorgung ist so groß wie noch nie. Neben dem Klimaschutzgesetz der Bundesrepublik, rückt mit der Reduktion der Gasversorgung die Notwendigkeit alternativer Energieversorgung weiter in den Vordergrund. Der zu deckende Energiebedarf in Deutschland beläuft sich auf etwa 2.300 TWh im Jahr [1], welche für über 700 Mio. Tonnen Kohlendioxid-(CO₂)-Emissionen jährlich verantwortlich sind. Diese CO₂-Emissionen lassen sich den Verbrauchssektoren zuordnen, darunter den privaten Haushalten (> 21 %), der Industrie (> 32%), dem Transport (> 24%) sowie Handel und Gewerbe (> 15%). Der Energieverbrauch entfällt dabei zu ca. 24 % auf elektrische Anwendungen, zu 24 % auf Mobilitätsanwendungen und zu mehr als 50 % auf thermische Anwendungen für die Bereitstellung von Wärme und Kälte [2].

Bedarf und Angebot sind nicht immer zeitgleich und lokal miteinander gekoppelt. Ein Ausgleich kann durch Speicherung gelingen. In verschiedenen Anwendungsbereichen können Energiespeicher systemdienlich und zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit eingesetzt werden und sowohl die Integration von erneuerbaren Energien als auch die Steigerung der Energieeffizienz optimieren. Während der Ausbau elektrochemischer Speicher in den letzten Jahren Fahrt aufgenommen hat [3], bleiben thermische Energiespeicher wie die Wärmewende als Ganzes noch deutlich hinter ihren technischen Möglichkeiten zurück.

Bei einer steigenden Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien sind ein steigender Flexibilisierungsbedarf und damit eine steigende Bedeutung für Wärmespeicher zu erwarten [4], etwa auf der Sektorengrenze Strom-Wärme. Entsprechend werden jetzt die Aktivitäten in diesem Forschungsbereich verstärkt.

Es werden diese thermischen Speichertechnologien unterschieden: sensible Energiespeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische/sorptive Speicher (► *Abbildung 1*).

Sensible Wärmespeicher nutzen die sensible (fühlbare) Wärmespeicherkapazität von Materialien. Ausführungen wie der Warmwasserspeicher sind lange erprobt, robust und kostengünstig. Allerdings ist die spezifische Speicherkapazität, also die Kapazität Wärme bzw. Kälte pro Volumen oder Masse zu speichern, niedrig. Neben Wasser als Speichermedium, werden auch Feststoffe oder Flüssigsalze verwendet, die das Potenzial haben, Hochtemperaturwärme zu speichern.

Latentwärmespeicher hingegen nutzen den Phasenwechsel eines Materials und die dabei umgesetzte latente Wärme. Phasenwechsel bedeutet den Übergang eines Materials, zum Beispiel von fest nach flüssig. Den Effekt des Phasenwechsels zu nutzen bringt mehrere Vorteile: Das Material hat eine hohe Energiespeicherdichte im Temperaturbereich des Phasenwechsels und die Wärme/Kälte-Übertragung findet bei konstanter Temperatur statt. Auch hier ist Wasser in Form eines Eisspeichers ein bekanntes Anwendungsbeispiel. Bei 0 °C Phasenwechseltemperatur ist eine theoretisch 12-mal höhere Speicherkapazität möglich im Vergleich zu einem sensiblen Kalt-Wasserspeicher gleicher Masse mit einer Temperaturspreizung von 6 °C bis 12 °C.

Eine Vielzahl von organischen und anorganischen Stoffen in Form von Reinstoffen oder Mischungen decken einen weiten Temperaturbereich ab.

Auf Grund der relativ geringen Wärmeleitfähigkeit haben Latentwärmespeicher eine niedrige Entladeleistung. Eine passive Temperaturkontrolle ist damit gut umsetzbar, aktive Wärmebereitstellung verlangt jedoch nach einem guten Speicherkomponentendesign.

Thermochemische Speicher nutzen entweder die Reaktionsenthalpie von chemischen Reaktionen oder die von Absorptions- bzw. Adsorptionsreaktionen, dann werden sie auch sorptive Speicher genannt.

Beispiele sind die Hydratation von Kalk $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ oder die Adsorption von Wasserdampf an Zeolith. Damit lassen sich hohe Energiespeicherdichten erzielen, die deutlich über denen der

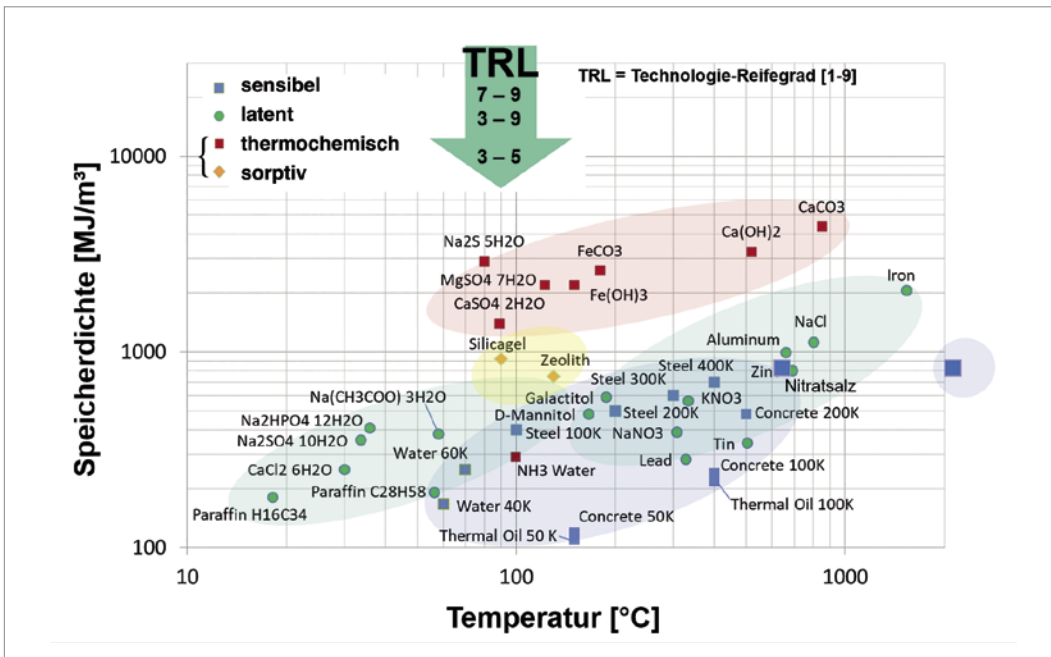


Abbildung 1
Energiespeicherdichte unterschiedlicher thermischer Speichermedien.
 Die Energiespeicherdichte ist abhängig vom Temperaturbereich, in dem die Medien angewendet werden.
 (Quelle: angelehnt an Diagrammquelle Fraunhofer ISE)

vorgenannten Speicher liegen, insbesondere wenn ein Teil der Energie beim Laden an die Umgebung oder einen anderen Prozess abgegeben wird und beim Entladen von dort wieder bezogen wird. Der Speicherprozess wirkt dabei als Wärmepumpe. Wenn die Umgebungsbedingungen passen, können gute Wirkungsgrade und Entladetemperaturen erreicht werden, die über den Ladetemperaturen liegen. Die Speicherdauer hat kaum Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Wirtschaftlich attraktiv sind diese Speicher dann, wenn sie optimal in eine vorhandene Prozessumgebung eingebunden werden können.

Beitrag thermischer Speicher zur Integration erneuerbarer Energien und Energieeinsparung

Energie-Unabhängigkeit kann zum einen durch den Beitrag (lokaler) erneuerbarer Energieerzeuger erreicht werden, aber auch durch eine Reduktion des Energiebedarfs in Folge erhöhter Energie-Effizienz. Der steigende Anteil erneuerbarer Energien mit unterschiedlichem Verfügbarkeitsbild bringt die

Herausforderung einer optimalen Integration von sowohl elektrischer als auch thermischer Energie mit sich. Mit den oben beschriebenen Eigenschaften der Speichermaterialien ist für Letztere eine Anwendung von thermischen Energiespeichern naheliegend. Für die Steigerung der Energie-Effizienz bieten thermische Speicher jedoch ein ebenso breites Anwendungsfeld. Neben dem Einsatz in industriellen Prozessen, in denen Abwärme weiter nutzbar gemacht wird, können thermische Speicher die Klimatisierung sowohl in Gebäuden als auch für Transportmittel effizienter gestalten. Der Temperaturbereich ist dabei ein entscheidender Faktor bei der Materialwahl. Benötigte Speicherdauer, -Kapazität und Leistungsabgabe bestimmen zudem die Speicher-ausführung (► *Abbildung 2*).

Die Energiespeicherkonfiguration in Anwendungen lässt sich vereinfacht in das Energieangebot (Angebot), den thermischen Energiespeicher (TES) und den Energieverbraucher (Bedarf) unterteilen. Das Angebot kann beispielsweise elektrische Leistung sein oder als Abwärme/-Kälte von industriellen Prozessen vorliegen. Solarthermische Wärmequellen

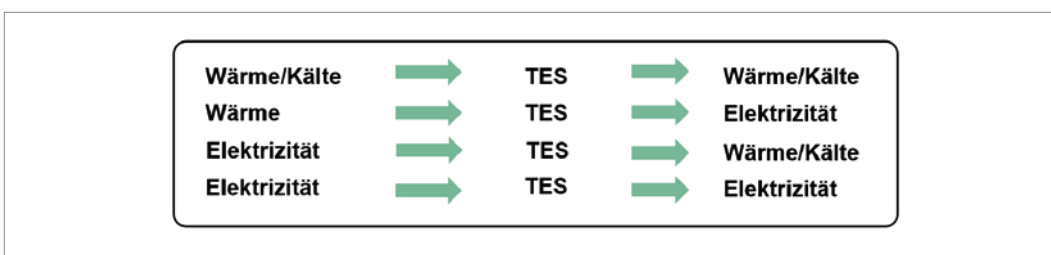


Abbildung 2
Thermische Energiespeicher-Konfiguration

Abbildung 3
**Testanlage für
 thermische Energie-
 speicherung mit
 Flüssigsalz**
 (Quelle: DLR, Projekt TESIS)



sind ebenso denkbar. Der Bedarf kann ebenso elektrischer als auch thermischer Natur sein. Um den Gedanken näher zu bringen, sind im Folgenden vier Beispiele für je eine Anwendungskonfiguration nach dem Muster „Angebot - TES - Bedarf“ dargestellt:

- Wärme – TES – Elektrizität:
 Konzentrierende Solarthermie Anlagen mit sensiblen Flüssigsalzspeicher (► *Abbildung 3*) speichern Wärme, die bei Bedarf an einen Wasserdampf-Kreislauf übertragen wird. Über Dampfturbinen wird so elektrische Energie bereitgestellt.
- Elektrizität – TES – Kälte:
 Lastverschiebung durch kleine Latentwärmespeicher in Kühl-/Gefrierkombination werden bei Überschussstrom geladen und entladen, wenn ein Mangel an Energie vorliegt [5].
- Elektrizität – TES – Elektrizität:
 Diese Energiespeicherkonfiguration wird auch Carnot-Batterie genannt. Das Überangebot an elektrischer Energie wird in Form von Wärme zum Beispiel mit Hilfe eines sensiblen Flüssigsalz- oder Feststoffspeichers gespeichert. Die Wärme des Speichers ist ausreichend, um ein Medium zu verdampfen und über eine Turbine wieder elektrischen Strom zu erzeugen.
- Wärme – TES – Wärme:
 Abwärmenutzung eines Schmelzofens einer Gießerei durch Laden eines sensiblen Speichers aus Feststoffschüttung und Thermo-Öl. Die gespeicherte Wärme dient der Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme sowie Prozesskälte [6].

Diese Beispiele zeigen konkrete Umsetzungen von thermischen Energiespeicherkonfigurationen. Die Vielfalt der Anwendungen mit ihren unterschiedlichen Randbedingungen und die Vielfalt möglicher Technologien machen es schwierig, das Potenzial der thermischen Energiespeicher allgemein abzuschätzen.

Verfügbarkeit, Hemmnisse und Anreize thermischer Energiespeicher

Industrielle Abwärme steht laut Grote et al [7] mit einem Potenzial von 225 TWh/a zur Verfügung. Dies entspricht laut BVES und Umweltbundesamt [8] [9] 45 % des Wärmebedarfs deutscher Haushalte. Das Potenzial der Abwärme im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C liegt bei knapp 70 TWh. Das Potenzial bis zu 100 °C ist bereits teilweise für die Wärmebereitstellung im Gebäudesektor erschlossen [10].

Große Warmwasserspeicher, wie in Dänemark installiert, weisen mitunter 50 cent/kWh geringe Speicherkapazitätskosten auf [11]. Technologien für große sensible Energiespeicher sind bereits global an vielen Standorten umgesetzt. Inwieweit es in Deutschland geeignete Standorte gibt, gilt es zu prüfen, um das Potenzial optimal auszunutzen.

Im Hochtemperaturbereich (> 100 °C) kann laut einer Studie [10] besonders mit Hilfe von Latentwärmespeichern eine Effizienzsteigerung der Prozesse erzielt werden. Im Rahmen dieser Studie wurde ein

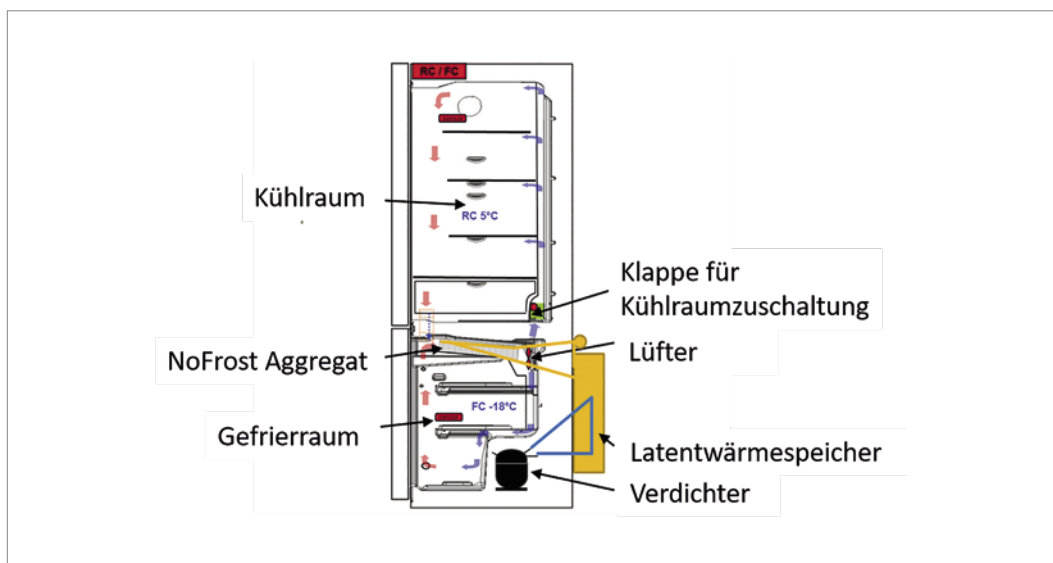


Abbildung 4

Gefrier-/Kühlkombination mit Speicher:

Design einer Testversion

(Quelle: ZAE, Projekt DiTES4Grid)

Potenzial von knapp 7TWh bis Temperaturen von 600 °C geschätzt. Latentwärmespeicher für solche Anwendungen sind bisher nicht kommerziell verfügbar, die Umsetzbarkeit wurde bereits in Demonstrationsspeichern gezeigt.

Sensible Hochtemperatur-Wärmespeicher sind hierfür ebenso einsetzbar und weiter entwickelt als die Latentwärmespeicher. Auch thermochemische Speicher sind in diesem Temperaturbereich einsetzbar, jedoch ist hierfür noch Forschungsaufwand nötig. Unabhängig davon, in welchem Temperaturbereich ein innovativer thermischer Speicher zum Einsatz kommt, fehlt bisher die Langzeiterfahrung in der industriellen Anwendung. Dadurch stellt die Investition noch ein Risiko dar. Gezielte Förderung von Pilotprojekten könnte das Risiko abfangen und die wissenschaftlichen Betrachtungen würden der Optimierung der Speicherauslegung und des Speicher-managements dienen.

Haushalte sind für mehr als 20% der CO₂-Emissionen verantwortlich. Wärme- und Kältebereitstellung ist ein Hauptteil des Energiebedarfs. In gewissen Grenzen können thermische Energiespeicher zur Entlastung elektrischer Verteilnetze beitragen, indem sie bei Überangebot Energie aufnehmen. Ein Beispiel sind Gefrier-Kühlkombinationen, die mit Latentwärmespeichern ausgerüstet sind (► *Abbildung 4*). Der Betrieb dieser Speicher erfordert allerdings einen lastabhängig variablen Strompreis. Mit solchen Lösungen ließe sich der Eigenstromverbrauch optimieren oder durch ein Vernetzen vieler solcher Geräte eine gezielte Lastenverschiebung ermöglichen.

Eine in diesem Kontext interessante Entwicklung ist eine Speichertechnologie, welche die Diskrepanz zwischen PV- bzw. Windstromüberschüssen und dem

Heizwärmebedarf von Gebäuden im Winter ausgleichen kann. Die Grundlage dafür bildet die reversible chemische Reaktion zwischen gebranntem Kalk und Wasser(dampf) – die Technologie basiert also auf sehr gut verfügbaren, kostengünstigen und ökologisch unbedenklichen Materialien [12]. Unter Aufnahme von Hochtemperaturwärme (ca. 500 °C) setzt das Material Wasserdampf frei, wodurch die Energie mit hohen Energiedichten und über lange Zeiträume gespeichert werden kann. Bei Bedarf kann die nun als chemisches Potenzial vorliegende Energie durch erneute Zugabe des Reaktionspartners freigesetzt werden („Kalklöschchen“). Hierbei sind sehr hohe Reaktionstemperaturen von 600 °C und mehr erreichbar, wenn Wasserdampf als Reaktionspartner verwendet wird. Verfahrenstechnisch deutlich einfacher ist jedoch die Entladung mit flüssigem Wasser, die Temperaturen um ca. 100 °C erreicht und damit noch ausreichend hoch ist für die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden.

Weiteres Potenzial zur Netzlastenverteilung wäre die Kombination aus Wärmepumpe und Wärmespeicher. Ein Anteil der in Zukunft installierten Wärmepumpen, geplant sind 0,5 Millionen pro Jahr ab 2024 [13], könnte Wärmespeicher beladen, sobald ein Überangebot an elektrischer Energie vorliegt. Liegt wenig vor, kann der Speicher entladen und die Wärmepumpe ausgeschaltet werden. Ein Hemmnis für die einfache Integration von thermischen Speichern in der Gebäudetechnik ist die zum Teil fehlende schnelle Bewertung der spezifischen Praxistauglichkeit von Wärme- und Kältespeichern. Um Kennzahlen und die Prüfung thermischer Energiespeicher zu definieren, lief 2022 das Verbund-Projekt VKTES an.

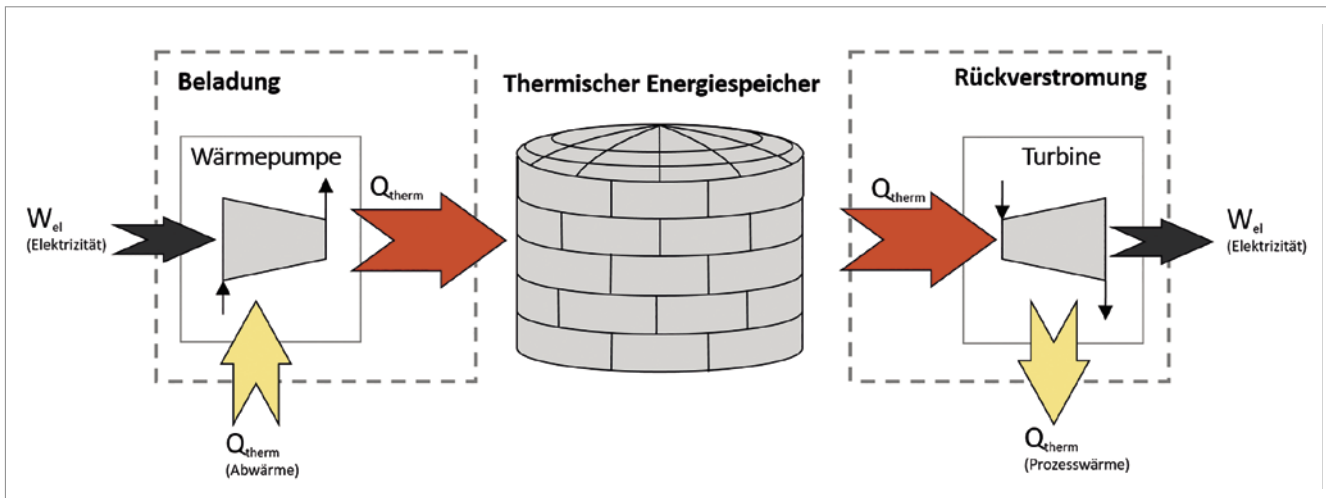


Abbildung 5
Carnot-Batterie
 (Quelle: DLR)

Neben den thermischen Energiespeichertechnologien, welche eine temporäre Koppelung zwischen Verbraucher und Nutzer herstellen, wurden bereits Technologien zur lokalen Koppelung erprobt. Sowohl mobile sorptive Speicher [14] als auch mobile Latentwärmespeicher [15] wurden bereits umgesetzt. Die Wirtschaftlichkeit dieser Techniken ist unter den veränderten Randbedingungen mit steigenden Gaspreisen und im Kontext Betriebssicherheit neu zu bewerten.

Neu diskutiert werden in diesem Zusammenhang auch wärmespeicherbasierte Verfahren zur großmaßstäblichen Stromspeicherung („Carnot-Batterien“, „Elektrowärmekraftwerke“). Neben der reinen Strombereitstellung kann dieser Prozess auch Abwärme aufnehmen und Fern- bzw. Industriewärme bedarfsgerecht bereitstellen (► *Abbildung 5*). Eine auf diese Art zwischen den Sektoren „Strom“ und „Wärme“ positionierte Technologie bietet besondere Chancen: Es können so die Flexibilitätsbedarfe beider Sektoren bedient werden. Damit sind im Vergleich zu reinen Strom- oder Wärmetechnologien grundsätzlich höhere Nutzungsgrade, eine verbesserte Jahresauslastung und damit eine günstigere betriebswirtschaftliche Ausgangsposition möglich.

Es existieren dazu eine größere Zahl von Entwicklungsarbeiten und einige Aktivitäten mit industrieller Ausprägung. Mit dem Ziel der kostengünstigen elektrischen Energiespeicherung im Multi-MW-Maßstab entwickelt die Firma Malta Hochtemperatur Wärmepumpen Stromspeicher GmbH ein Speicherkonzept. Es nutzt einen Brayton-Wärmepumpenprozess zur Beladung und einem Brayton-Wärmekraftprozess zur Rückverstromung. Die thermische Energie wird auf der heißen Seite in Flüssigsalzspeichern und auf der kalten Seite in Kältemittelspeichern unter 0°C gespeichert. Es wird ein Strom-zu-Strom Wirkungs-

grad von etwa 60% angestrebt [16]. MAN Energy Solutions entwickelt ein kombiniertes Energiespeicher- und Wärme- sowie Kälteversorgungskonzept (Etes), das auf einem transkritischen CO_2 -Wärmepumpenprozess zur Stromaufnahme und einem CO_2 -Wärmekraftprozess zur Rückverstromung beruht. Beide Prozesse laufen zwischen einem Eisspeicher auf der kalten Seite und einem kaskadierten Wasserspeicher bis etwa 120°C auf der warmen Seite [17]. Eine Testanlage einer Carnot-Batterie auf Basis eines Rankine-Prozesses wurde kürzlich in Betrieb genommen [18].

Fazit

Das Potenzial thermischer Energiespeicher ist vielseitig. Sie reißen sich neben der elektrischen Energiespeicherung und der Speicherung durch das Synthetisieren von Brennstoffen in die Gruppe der Energiespeicher ein. Bei der Pufferung kurzfristiger Fluktuationen in der Energieversorgung thermischer Systeme bieten sie eine wirtschaftlich attraktive Alternative. Sie sind ebenso ein Werkzeug zur Sektorenkopplung und Effizienzsteigerung. Daher sollten sie sowohl im Energierecht als auch den geltenden Förderrichtlinien berücksichtigt werden, damit ihr Potenzial langfristig die Umsetzung der Energiewende ermöglichen kann.

Referenzen

- [1] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2021,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- [2] M. Rasch, A. Regett, S. Pichlmair, J. Conrad, S. Greif, A. Guminski, E. Rouyrre, C. Orthofer und T. Zipperle, „Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz – Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems, Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE,“ 2017.
- [3] P. Stenzel, L. Kotzur, D. Stolten, J. Figgner, D. Haberschusz, D. Sauer, V. Gottke, F. Valentin, A. Velten, F. Schäfer und S. Zunft, „Energiespeicher - Jahresüberblick 2021 BWK,“ Springer, 2021.
- [4] F. Ausfelder, S. von Roon, A. Seitz, „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II. Analyse, Technologien, Beispiele. Bericht des AP V.&. „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ im Kopernikus-Projekt „SynErgie“, 2019.
- [5] A. Krönauer, S. Hiebler, P. Hook, S. Pöllinger, F. Bailly und M. Laudahn, „Abschlussbericht Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, Energiespeicherung / BSH Haugeräte GmbH, Thermische Speicher als verschiebbare Lasten in elektrischen Netzen – DiTES4Grid“.
- [6] R. Gurtner, D. Eckl und R. Jennes, „Abschlussbericht: Industrielle Abwärmenutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess 2022.
- [7] L. Grote, P. Hoffmann und G. Tänzer, „Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge,“ Saarbrücken, 2015.
- [8] BVES, „Energiewende braucht Wärmewende – Wärmewende braucht Energiespeicher“ 2021.
- [9] Umweltbundesamt, „Endenergieverbrauch privater Haushalt,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- [10] F. Toro, E. Jochem und O. Lösch, „Bewertung der thermischen Energiespeicher (Latentwärmespeicher) als eine Komponente industrieller Abwärmenutzung FuE-Bedarf, Marktpotentiale, Hemmnisse und Empfehlungen – ein Statuspapier“ 2022.
- [11] T. Yang, W. Liu, G. Kramer und Q. Sun, „Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 139, 2021.
- [12] M. Schmidt und M. Linder, „A Novel Thermochemical Long Term Storage Concept: Balance of Renewable Electricity and Heat Demand in Buildings“ Frontiers in Energy Research, 2020.
- [13] Bundesverband Wärmepumpen e.V. , „BMWSB & BMWK: 500.000 Wärmepumpen jährlich bis 2024“ 30.6.2022. [Online]. Available: <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/bmwsb-bmwk-500000-waermepumpen-jaehrlich-bis-2024>.
- [14] E. Lävemann, „Abschlussbericht: Mobile Sorptionsspeicher zur industriellen Abwärmenutzung Grundlagen und Demonstrationsanlage: MobS II“ 2015.
- [15] swilar-eetec, 5.10.2022. [Online]. Available: <https://swilar-eetec.de/>.
- [16] B. Bollinger , „Malta Pumped Heat Electricity Storage (PHES) for Coal Exit Transition from Fossil to Renewable Energy,“ in 2nd International Workshop on Carnot Batteries, 2020.
- [17] L. Garcia, E. Jacquemend und P. Jenny, „Thermo-Economic Heat Exchanger Optimization for Electro-Thermal Energy Storage Based on Transcritical CO₂ Cycles.“ in 3th European supercritical CO₂ Conference, Paris, 2019.
- [18] D. Bauer und M. Johnson, „Design, build and initial operation of the CHESTER system,“ in 3rd International Workshop on Carnot Batteries, DLR Stuttgart, 2022.