

# Hochtemperatur-Wärmespeicher – der Schlüssel zu erneuerbarer und bedarfsgerechter Industriewärme



**DLR**

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

Stefano Giuliano  
stefano.giuliano@dlr.de

Dr. Panagiotis Stathopoulos  
panagiotis.stathopoulos@dlr.de

**CAE**  
michael.brueetting  
@cae-zeroarbon.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Thomas Fluri  
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

**KIT**  
Dr. Klarissa Niedermeier  
klarissa.niedermeier@kit.edu

**ZAE Bayern**  
Michael Brütting  
michael.brueetting@zae-bayern.de

Rund 510 Terawattstunden (TWh) benötigt die Industrie in Deutschland jährlich für die Erzeugung von Prozesswärme [1]. Diese Energiemenge entspricht 22% des deutschen Energiebedarfs und deren Erzeugung ist für etwa zwei Drittel des industriellen Treibhausgases verantwortlich. Eine rasche Wärmewende bzw. Umstellung der Industriewärmeerzeugung auf erneuerbare Energie ist daher zentral, um den Erdgasverbrauch und die Treibhausgasemissionen kurz- bis mittelfristig signifikant zu verringern.

Dabei stellen die verschiedenen Industriezweige und -prozesse höchst unterschiedliche Anforderungen an das Temperaturniveau: Während das Trocknen von Papier bereits ab etwa 160°C möglich ist, benötigen Brenn- und Schmelzprozesse Temperaturen bis zu deutlich über 1.000°C [2].

Insbesondere für den Temperaturbereich unterhalb von 400°C stehen verschiedene technologische Lösungen zur Verfügung: Einbindung von regenerativen Wärmequellen, wie z. B. (konzentrierender) Solarwärme und Elektrifizierung mit erneuerbarem Strom über Wärmepumpen und/oder Elektrodenkessel.

Für Temperaturen oberhalb 400°C stehen als Technologieoptionen neben der stark diskutierten Nutzung alternativer Energieträger, wie z. B. grünen Wasserstoffs, die Nutzung solarer Hochtemperaturwärme und die Einbindung erneuerbaren Stroms über Power-to-Heat-Lösungen zur Verfügung. Zentral bei jeder dieser Optionen ist die Frage nach dem Ausgleich zwischen erneuerbarer Erzeugung und Wärmebedarf. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die Rolle des Wärmespeichers in diesem Kontext und bietet einen kompakten Überblick über vorhandene Speichertechnologien, sowie aktuelle Hemmnisse.

## Beitrag von Wärmespeichern zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Industriebereich

- *Schlüssel zu bedarfsgerechter erneuerbarer Industriewärme*

Egal ob Solarturm oder Niedertemperatur-Solkollektoren, die Wärmeezeugung durch Solarsysteme fluktuiert sowohl im Tagesablauf als auch saisonal. Daher kann solare Wärme nur in Kombination mit Wärmespeichern zuverlässig und bedarfsgerecht bereitgestellt werden.

Unterhalb von 400°C kommen Solarkollektoren wie z. B. Parabolrinnen zum Einsatz, welche in Kombination mit Wärmespeichern auch in Mitteleuropa signifikante Deckungsanteile von über 30% ermöglichen.

Für höhere Temperaturen kann die Solarturm-Technologie – insbesondere an Standorten mit hoher Solareinstrahlung und in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmespeichern – wirtschaftlich hohe solare Deckungsgrade bis hin zu einem 24/7-Betrieb erlauben. Das DLR entwickelt dazu z. B. Partikelbasierte Receiver – und Speicherkonzepte z. B. für Prozesswärme zur Pastaherstellung [3] oder die thermische Vorbehandlung von Mangan-Erzen [4].

Eine weitere Möglichkeit der erneuerbaren Wärmebereitstellung im Hochtemperaturbereich kann über die Elektrifizierung der Wärmeversorgung mit erneuerbarem Strom erfolgen (Power-to-Heat). Dabei wird der fluktuierende erneuerbare Strom (aus PV, Wind, etc.) über eine Wärmepumpe (bis ca. 250°C), Elektrodenkessel oder Elektroerhitzer in Hochtemperaturwärme gewandelt. Über den Hochtemperatur-Wärmespeicher wird dann eine bedarfsgerechte Wärmebereitstellung ermöglicht, welche der Last des Industrieprozesses angepasst ist. Großtechnische Wärmespeicher sind hierbei das entscheidende Element, um aus dem fluktuierenden erneuerbaren Strom eine gesicherte Wärmeleistung für

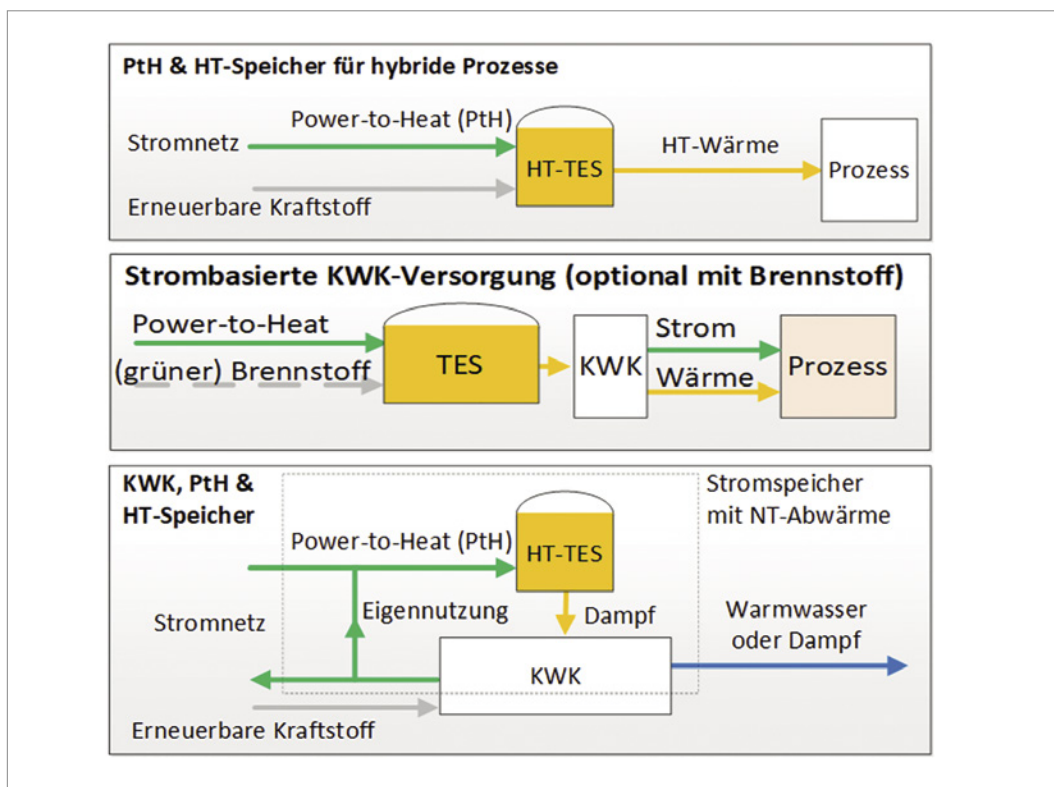


Abbildung 1  
**Rolle des Wärmespeichers an der Schnittstelle zwischen der Strom- und Wärmeversorgung**  
 (Quelle: DLR)

den Industriestandort bereitzustellen. Auch hier stehen für die verschiedenen Industriewärmeanwendungen verschiedene Speichersysteme zu Verfügung, die sich im Einsatz der Speichermedien und ihrem einsetzbaren Temperaturbereich unterscheiden (bis >1000 °C). Der entscheidende Vorteil ist, dass man Wärme in Wärmespeichern deutlich wirtschaftlicher im Vergleich zu Strom speichern kann.

- *Flexibilisierung des Strombedarfs für die industrielle Wärmeversorgung*

Hochtemperaturwärmespeicher spielen in Kombination mit Power-to-Heat-Systemen auch eine wichtige Rolle an der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmeversorgung. Die – im Vergleich zu reinen Power-to-Heat-Systemen – deutlich höhere Flexibilisierung des Strombedarfs unterstützt über eine netzdienliche Betriebsweise die Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien im Stromnetz. Durch die Speicherintegration können die entsprechenden Power-to-Heat-Einheiten zudem deutlich kleiner ausgelegt werden, was zu einer weiteren Entlastung des Stromnetzes führt.

Hochtemperatur-Wärmespeicher bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die eingespeicherte Wärme bzw. den eingespeicherten erneuerbaren

Strom bei Bedarf in thermischen Kraftwerken wieder in Strom umzuwandeln und gleichzeitig Wärme auf dem benötigten Niveau auszukoppeln. Im Kontext der Industriewärme bieten solche Power-to-Heat-to-Power-Lösungen (Wärmespeicherkraftwerke (WSK) oder Carnot-Batterien mit Wärmeauskopplung) Industriestandorten die Option der Eigenstromerzeugung, insbesondere wenn erneuerbarer Netzstrom nicht vorhanden ist. Neben der Entlastung der Netze bietet das den Betreibern auch eine höhere Planungssicherheit bzgl. der Energiekosten und –bereitstellung [5].

- *Steigerung der Effizienz durch Abwärmenutzung*

Obwohl die Integration von erneuerbarer Energie den größten Hebel zur Reduktion der Emissionen bei der Wärmeversorgung in der Industrie darstellt, ist die Einbindung von Abwärme weiterhin ein wichtiger Faktor, um diese Aufgabe wirtschaftlich bewältigen zu können und die Anforderungen an den Ausbau von erneuerbarer Energie zu reduzieren.

Je nach Anwendung kann die Temperatur der Abwärme dabei über eine Wärmepumpe angehoben werden oder die Wärme direkt in den Prozess reintegriert werden. Auch hier sind Speicher ein entscheidendes Element, um die Unterschiede zwischen dem Aufkommen und dem Bedarf der

	Regenerator	Regenerator	Flüssigsalz	Ruths	PCM	Flüssigmetall
Speichermaterial	Keramik	Naturstein-schüttung	Nitratsalz flüssig	Druckwasser	Nitratsalz fest/flüssig	Festkörper-schüttung
Energiedichte in kWh/m <sup>3</sup>	75 - 200	75 - 200	75 - 200	bis 100	50 - 200	75 - 200
Kapazität	bis 1000 MWh	k.A.	bis 4500 MWh	bis 30 MWh	bis 500 MWh	100 kWh
Typ. Temperaturen	400-1600 °C	200-800 °C	170-560 °C	150-230 °C	130-330 °C	100-700 °C
Typ. Wärmeträger	Gase	Gase	WÜ für überhitzter Dampf	Sattdampf, Druckwasser	Dampf, max. Überh. 330 °C	Flüssigmetall, WÜ für überhitzter Dampf
Investitionskosten TES in €/kWh	15 – 40	k.A.	15 – 70	70 – 300	40 – 80	k.A.
Technologiereife	6 – 9 TRL	4 – 5 TRL	4 – 9 TRL	8 – 9 TRL	4 – 5 TRL	3 – 4 TRL

*Tabelle 1*  
**Portfolio der Wärmespeichertechnologien**  
und deren Eigenschaften  
(Quelle: DLR)

Abwärme auszugleichen und die erneuerbare Energie, die am Anfang der Prozesskette eingeflossen ist, möglichst effizient zu nutzen. Speicherkonzepte zur Abwärmenutzung gibt es schon länger und erste Pilotprojekte sind in Planung [6] oder umgesetzt [7], der große Durchbruch ist bisher aber oft an den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gescheitert. Aufgrund steigender Energiepreise und erhöhtem Druck zur Dekarbonisierung sind diese aber zunehmend interessant.

### Zur Verfügung stehende thermische Speichertechnologien

Genau wie bei der Industrie-Wärmeerzeugung besteht auch bei der Industrie-Wärme-Speicherung keine „One-Fits-All“-Lösung. Für die Auswahl des Hochtemperaturspeichers müssen für jede Anwendung individuell verschiedene Bewertungskriterien beachtet werden:

- prozesstechnische (z. B. Temperatur, Wärmeträgermedium ...) und räumliche (z. B. Aufstellungsfläche) Möglichkeiten für die Einbindung in bestehende oder geplante Anlagen/Infrastruktur
- technische und betriebsbedingte Einsatzgrenzen (Temperaturniveau, Temperaturspreizung, dynamisches Verhalten ...)

Um diese gesamte Bandbreite an Anwendungen zu bedienen, steht ein breites Portfolio an Wärmespeichertechnologien zur Verfügung. Ein Überblick ist in ► **Tabelle 1** gegeben.

Feststoffwärmespeicher – meist auf der Basis von stapelbaren Formsteinen aus Feuerfestkeramiken mit Luft als Wärmeträger – können zur Wärmespeiche-

rung bei Temperaturen bis über 1000 °C eingesetzt werden und daher hohe Energiespeicherdichten erzielen. Heutige Anwendungen finden sich z. B. in der Stahl-, Glas- und Baustoffherstellung. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen auf Kostensenkungen durch die Verwendung von Schüttungen und die Nutzung von Naturstein und die Lösung der damit einhergehenden Entwurfsfragen [8]. Weitere Aktivitäten erarbeiten Lösungen für die Integration der Speicher mit Power-to-Heat-Technologie [9,10]. Feststoffspeicher auf der Basis bewegter, sandähnlicher Partikel sind eine Sonderform des sensiblen Feststoffspeichers, die für die Hochtemperaturspeicherung in solarthermischen Kraftwerken untersucht wird [11].

Für den Temperaturbereich von 170 °C bis 560 °C eignen sich Flüssigsalz-Speicher, heute Stand der Technik in thermischen Solarkraftwerken. Aktuelle Entwicklungen zielen auf eine Erweiterung des Einsatzbereichs bis zu 620 °C, sowie auf eine Kostenreduktion durch den Einsatz von Eintankkonzepten, z.B. mit einer beweglichen Trennschicht oder das Ersetzen eines Teils des Salzes durch Feststoffkörper [12]. Ähnliche Festbetspeicherkonzepte wurden auch für den Einsatz mit Thermo-Öl als Wärmeträgermedium für den Temperaturbereich 200–450 °C demonstriert. Auch Flüssigmetall-basierte Systeme bieten die Möglichkeit in einem relativ breiten Temperaturbereich durch die hervorragenden Wärmeübertragungseigenschaften effizient Wärme an eine keramische Schüttung zu transportieren, welche die Wärme speichert.

Herausforderungen sind v.a. die Kompatibilität mit den relevanten Komponenten (z. B. Ventile) und der Messtechnik. Daher wird in Kooperation mit dem Hersteller KSB beim DLR der Einsatz von Pumpen und Ventilen jenseits des Stands der Technik bei bis zu 700 °C erprobt [13].

PCM-Speicher runden das Portfolio ab mit hohen Energiedichten aufgrund des Phasenwechsels. Auch hier wurden in den letzten Jahren mehrere Konzepte demonstriert mit dem Fokus auf die Entwicklung von Hochleistungskomponenten. [14,15].

### Herausforderungen beim Transfer in die Praxis

Die Kernherausforderungen bei der Umsetzung von Wärmespeichern in der Industrie sind nachfolgend kompakt zusammengefasst:

- keine "One-Fits-All"-Lösungen
- fehlende Tools für einen systematischen Speichervergleich, sowie fehlende F&E-Programme für solche Potenzialstudien zur Prozessdetailbetrachtung
- genehmigungstechnische und sicherheitstechnische Lücken in Regelwerken für neue Speicher
- fehlende Anreize für erstmalige Demonstration neuer Konzepte in Anwendung
- niedrige Energiepreise und hoher Wettbewerbsdruck erschwere Amortisation
- hohe Anfangsinvestitionskosten im Vergleich zu erneuerbaren Kraftstoffen und fehlende Contracting-Lösungen, um eventuelle fehlende Erfahrung mit dem Betrieb von Energieversorgungsanlagen auszugleichen

### Zusammengefasst: Hochtemperatur-Wärmespeicher für Prozesswärme

- sind ein Schlüsselement zur Integration großer Solar- und Windanteile in der Wärmeversorgung sowohl in Kombination mit WP, CSP als auch PTH
- bieten sehr hohes Potenzial für Flexibilität am Strommarkt / Sektorkopplung
- sind bereits als Feststoffspeicher und Speicher mit flüssigen Medien bis zu 600 °C verfügbar und zum Teil etabliert oder demonstriert
- Größere Demonstrationsprojekte sind aber weiterhin erforderlich, um Vertrauen für den Einsatz in Industrie-Prozesswärme-Anwendungen zu generieren.
- Im Hinblick auf die erforderliche Größe von Industrie-Speichern besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich Hochskalierung im Multi-MWh-Bereichs, sowie hinsichtlich noch kompakterer, leistungsstärkerer und kostengünstigerer Konzepte und höheren Temperaturen (>600 °C).

### Referenzen

1. Agora Industrie, FutureCamp (2022): Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie
2. Prozesswärme-Bedarf in der Industrie – NRW. Energy4Climate
3. DLR - Institut für Solarforschung – HiFlex
4. Energy efficient, primary production of manganese ferroalloys through the application of novel energy systems in the drying and pre-heating of furnace feed materials | A.SPIRE (aspire2050.eu)
5. BMWK-gefördertes Projekt SWS-SYS, FKZ 03EI3045
6. Industrielle Abwärmennutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess – iAST – Schlussbericht – Gurtner, Richard / Eckl, Dietmar / Jennes, Ralf, 2022
7. FENOPTHES – Füllkörperentwicklung und -optimierung für thermische Speicher – Fraunhofer ISE
8. Krüger, Michael und Haunstetter, Jürgen und Hahn, Joachim und Knödler, Philipp und Zunft, Stefan (2020) doi: 10.3390/en13226092. ISSN 1996-1073.
9. Dreißigacker, Volker und Belik, Sergej (2021) Entwicklung und Erprobung eines elektrisch beheizten Hochtemperaturspeichers im Rahmen des Projekts Energy Lab 2.0. ISBN 978-3-949169-02-1
10. Belik, Sergej (2021) Development of high-performance air heater based on an inductively heated packed bed. XIX International UIE-Congress, 01.–03. September 2021, Plzen, Tschechien
11. Hertel, Julian D. und Zunft, Stefan (2022) Applied Thermal Engineering, 206 (118092). Elsevier.
12. BMWK-gefördertes Projekt VeNiTe, FKZ 03EE5043A
13. BMWK-gefördertes Projekt LIMELISA, FZK 03EE5050
14. BMWK-gefördertes Projekt PROLATENT, FKZ 0325549A
15. EU-gefördertes Projekt – CHESTER (chester-project.eu)