Wärmespeicher: Flexibilität für das Wärmenetz

FfE Whitepaper

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

WARAN
Wärme anbinden und netzdienlich nutzen

Kurzzusammenfassung

Mit der Dekarbonisierung der Fernwärme wachsen Strom- und Wärmesektor enger zusammen. Schwankende Strompreise schlagen dadurch stärker auf die Wärmegestehungskosten durch, und ein flexibler Betrieb von Wärmenetzen wird wirtschaftlich attraktiver. Wärmespeicher machen diese Flexibilität nutzbar, weil sie Wärme für wenige Stunden bis hin zu mehreren Monaten zwischenspeichern. Jede Bauform hat dabei ihr eigenes Einsatzfeld: Behälterspeicher gleichen vor allem kurz- bis mittelfristige Schwankungen aus, während Erdbeckenspeicher mit ihren großen Volumina in der saisonalen Speicherung ihre Stärke haben. Aquifer- und Kavernenspeicher versprechen ebenfalls hohe Kapazitäten bei kaum oberirdischem Flächenbedarf, sind aber stark auf passende geologische Bedingungen und Genehmigungen angewiesen und technologisch noch nicht ausgereift. Welche Technologie geeignet ist, ergibt sich daher aus Speicherdauer, Temperaturniveau, Flächenverfügbarkeit, Geologie und den Anforderungen des jeweiligen Wärmenetzes. Die Beitragsreihe wendet sich an Stadtwerke und Fernwärmeversorger, die sich einen Überblick über die Flexibilitätspotenziale der Fernwärme verschaffen wollen, sowie an alle weiteren Interessierten.

Drei Haupt-Aussagen aus dem Whitepaper:

1. **Behälterspeicher beherrschen den deutschen Speichermarkt für Wärmenetze**

2. **Die Speicherkapazität in Deutschland steigt seit Jahren kontinuierlich**

3. **Behälter-, Erdbecken-, Aquifer- und Kavernenspeicher ergänzen sich**

Inhaltsverzeichnis

Wärmespeicher: Flexibilität für das Fernwärmenetz **4**

1 Wärmespeicher als Enabler der Nutzung von Energieflexibilität in der Fernwärme 4

2 Technologieübersicht über Wärmespeicher 5

2.1 Sensible Wärmespeicher 6

2.2 Latente Wärmespeicher 6

2.3 Thermochemische Wärmespeicher 7

3 Aktueller Stand von Wärmespeichern in deutschen Fernwärmenetzen 7

4 Ausblick 8

5 Vertiefung: Sensible Wärmespeicher 8

5.1 Behälterspeicher (TTES: Tank thermal energy storage) 9

5.2 Erdbeckenspeicher (PTES: Pit Thermal Energy Storage) 9

5.3 Aquiferspeicher (ATES: Aquifer Thermal Energy Storage) 10

5.4 Kavernenspeicher (CTES: Cavern Thermal Energy Storage) 10

6 Zusammenfassung 10

Literaturverzeichnis **11**

Abbildungsverzeichnis **12**

Wärmespeicher: Flexibilität für das Wärmenetz

Die zunehmende Dekarbonisierung der Fernwärme führt zu einer steigenden Sektorkopplung zwischen dem Strom- und Wärmesektor. Dadurch steigt auch der Einfluss des volatilen Strompreises auf die Wärmegestehungskosten in der Fernwärme, wodurch die wirtschaftlichen Vorteile eines flexiblen Fernwärmebetriebs steigen. Diese Beitragsreihe beschäftigt sich deshalb mit den verschiedenen Flexibilitäten in der Fernwärme und ihren jeweiligen Einschränkungen. Des Weiteren werden die beschriebenen Flexibilitäten mit den realen Hemmnissen der Fernwärmebranche durch Interviews kritisch beleuchtet. Diese Beitragsreihe richtet sich an Stadtwerke und Fernwärmeversorger, die einen Überblick über die Flexibilitätspotenziale in der Fernwärme erlangen wollen sowie an all diejenigen, die sich für die Fernwärmeversorgung interessieren.

1 Wärmespeicher als Enabler der Nutzung von Energieflexibilität in der Fernwärme

Der Hauptnutzen von Wärmespeichern in der Fernwärme besteht in der zeitlichen Entkopplung von Wärmeerzeugung und Wärmebedarf. Durch diese Entkopplung ermöglichen Wärmespeicher eine deutlich verbesserte Nutzung von Energieflexibilitätspotenzialen in der Wärmeversorgung, wodurch die Wärmeerzeugung stärker an externe Einflussgrößen, wie beispielsweise Strompreise, angepasst werden kann. Darüber hinaus können Wärmespeicher Lastspitzen glätten, indem sie einen Teil der benötigten Wärmeleistung bereitstellen. Dadurch kann der Einsatz kostenintensiver Spitzenlastwärmeerzeuger reduziert oder vermieden werden. Beim Anschluss von Wärmespeichern hinter Netzengpässen können diese zudem zur Entlastung stark ausgelasteter Netzabschnitte beitragen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei der Integration von Abwärmequellen in Wärmenetze, da deren Einspeiseprofile häufig nicht mit dem Wärmebedarf des Netzes übereinstimmen. Durch den Einsatz von Wärmespeichern können Erzeugungs- und Bedarfsprofile zeitlich aufeinander abgestimmt werden. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen zur Nutzung von Flexibilitätspotenzialen zeichnen sich Wärmespeicher durch ihre hohe Speicherkapazität sowie ihren vergleichsweise einfachen Betrieb aus. Eine Anpassung der Wärmelast auf Verbraucherseite im Rahmen des Demand-Side-Managements ist demgegenüber deutlich komplexer und wirtschaftlich häufig nur für sehr große Verbraucher sinnvoll.

Die Gründe für die Nutzung eines Wärmespeichers können in zwei Kategorien eingeteilt werden: dem **Bereitstellungsmanagement** und dem **Bedarfsmanagement**. Abbildung 1 stellt die Leistungsentnahme aus dem Speicher beim Bereitstellungs- und beim Bedarfsmanagement gegenüber. Das Bereitstellungsmanagement dient dazu, eine kontinuierliche Wärmeerzeugung an einen variablen Verbrauch anzupassen. Dies ist z. B. der Fall, wenn Blockheizkraftwerke bei konstanter Last betrieben werden sollen, ihre Wärmeerzeugung aber teilweise den Wärmebedarf überschreitet (siehe Abbildung 1, links). Dies kann u. a. im Sommer bei konstant durchlaufenden Müllverbrennungsanlagen auftreten. Demgegenüber steht das Bedarfsmanagement, bei dem die Wärmeerzeugung zeitlich stark variiert und der Wärmebedarf vergleichsweise konstant ist (siehe Abbildung 1 rechts). Dieser Fall tritt häufig auf, wenn Solarthermie als Wärmeerzeuger genutzt wird. Zu diesem Fall würde ebenfalls die Anpassung der strombasierten Wärme-erzeugung an die Strompreise passen.

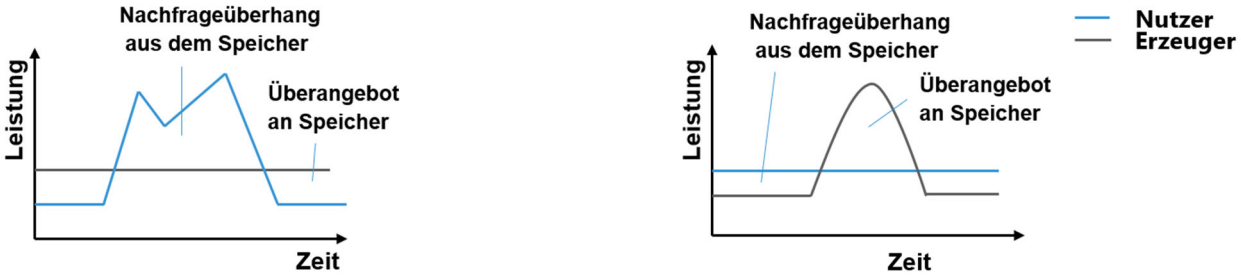

Abbildung 1: Gegenüberstellung des Bereitstellungs- (links) und des Bedarfsmanagements (rechts)

Die wirtschaftlichen Vorteile von Wärmespeichern ergeben sich bei einer zunehmend an den Strompreis gekoppelten Wärmeerzeugung hauptsächlich aufgrund der entstehenden Energieflexibilität. Dabei nehmen die wirtschaftlichen Vorteile mit zunehmender Homogenität des Erzeugerparks eines Wärmenetzes zu. In Netzen mit einer heterogenen Erzeugungsstruktur kann durch den bedarfsgerechten Einsatz stromproduzierender, stromverbrauchender und stromunabhängiger Wärmeerzeuger (siehe Artikel Flexibilitäten der Fernwärme: Beschreibung möglicher Flexibilitätspotenziale) bereits eine teilweise an den Strompreis angepasste Fahrweise realisiert werden. Dadurch reduziert sich der zusätzliche Nutzen, der aus der zeitlichen Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf durch einen Wärmespeicher entsteht, auf die Reduzierung der Wärmelast, wodurch Wärmeerzeuger mit zeitweise höheren Wärmegestehungskosten vermieden werden.

Mit Blick auf die zukünftige Entwicklung der Wärmeerzeugung ist davon auszugehen, dass Wärmespeicher langfristig weiter an Bedeutung gewinnen werden. Zwar werden stromproduzierende Erzeuger in einer Übergangsphase voraussichtlich weiterhin eine wichtige Rolle spielen, mittelfristig dürfte der Anteil stromverbrauchender Technologien jedoch zunehmen. Dadurch steigt auch der Bedarf an zusätzlicher Flexibilität, die durch Wärmespeicher bereitgestellt werden kann.

2 Technologieübersicht über Wärmespeicher

Wärmespeicher können anhand einer Vielzahl von Kriterien wie Funktionsprinzip, Speichermedium, Speicherdauer oder Druckniveau unterschieden werden. Im Folgenden wird eine Unterteilung anhand des Funktionsprinzips vorgenommen. Je Funktionsprinzip werden weitere Unterteilungen beschrieben. Beim Funktionsprinzip unterscheidet man bei Wärmespeichern zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Speichern. Einen Überblick über die Unterscheidung gibt Abbildung 2Abbildung 2.

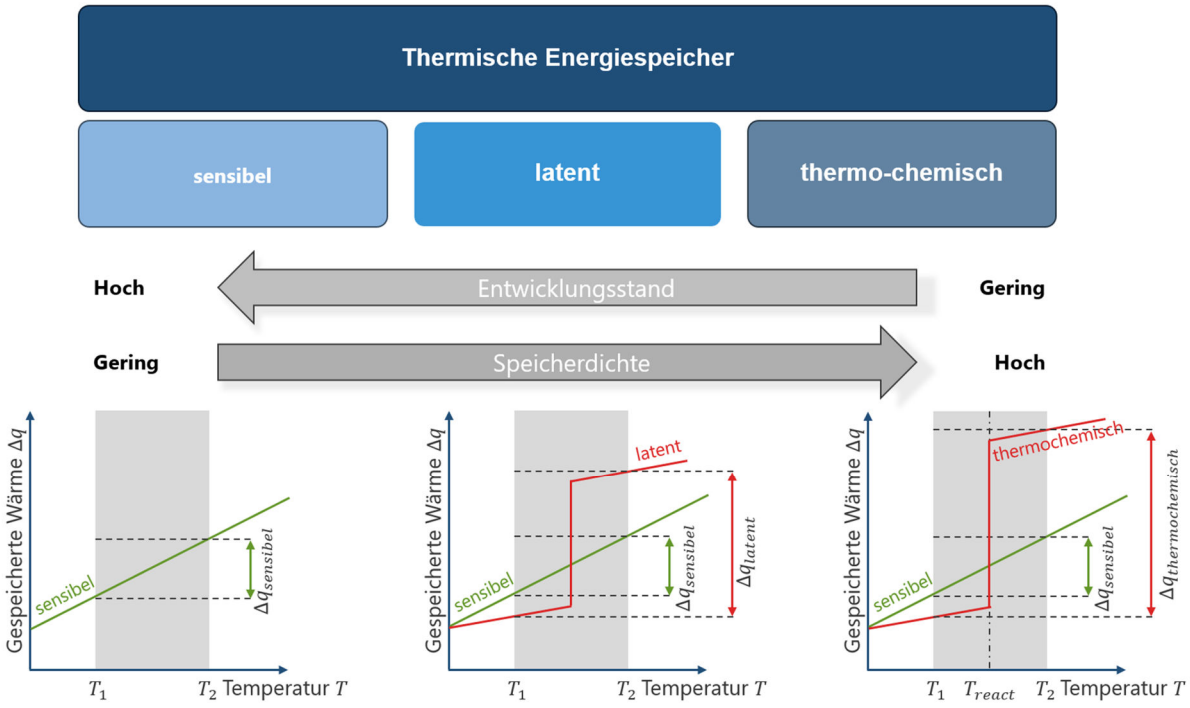

Abbildung 2: Übersicht über verschiedene Wärmespeichertechnologien

2.1 Sensible Wärmespeicher

In sensiblen Wärmespeichern wird Energie durch die Temperaturerhöhung eines Speichermediums gespeichert. Die speicherbare Energiemenge hängt dabei von der Temperaturdifferenz sowie der spezifischen Wärmekapazität des Speichermediums ab und steigt linear mit der Temperatur an. Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien weisen sensible Wärmespeicher eine geringere volumetrische Energiedichte und eine hohe Selbstentladung auf. Aufgrund ihres ausgereiften Entwicklungsstands und der niedrigen Investition stellen sie jedoch mit einem Anteil von 88,9 % die am weitesten verbreitete Speichertechnologie dar [1] .

Als Speichermedium hat sich aufgrund der niedrigen Kosten, der hohen Verfügbarkeit, der einfachen Handhabung, der guten Umweltverträglichkeit und der mit 4,18 kJ/kg*K vergleichsweise hohen spezifischen Wärmekapazität Wasser durchgesetzt. Die häufigste Bauform ist der Behälterspeicher. Weitere Bauformen, die Wasser als Speichermedium nutzen, sind Erdbeckenspeicher und Kavernenspeicher sowie Aquiferspeicher, die das Grundwasser nutzen. Alternativ können der Erdboden in Erdsondenspeichern, Kies-Wasser-Gemische in Erdbeckenspeichern sowie verschiedene Feststoffe wie Beton als Speichermedium genutzt werden.

2.2 Latente Wärmespeicher

Latente Wärmespeicher speichern Wärme in der beim Phasenwechsel eines Speichermediums umgesetzten Energie. Dadurch können beim Übergang zwischen verschiedenen Aggregatzuständen große Energiemengen bei nahezu konstanter Temperatur gespeichert und abgegeben werden. Bei geringen Temperaturänderungen können dank der Nutzung der Phasenwechselenergie bereits vergleichsweise große Energiemengen gespeichert werden. In den meisten latenten Wärmespeichern wird hierfür der Phasenwechsel zwischen festem und flüssigem Zustand genutzt. Zusätzlich zur latenten Wärme kann häufig auch sensible Wärme unterhalb und oberhalb der Phasenwechseltemperatur gespeichert werden.

Gegenüber sensiblen Wärmespeichern zeichnen sich latente Wärmespeicher durch eine höhere Energiedichte sowie die Möglichkeit, Wärme während des Phasenwechsels bei annähernd konstanter Temperatur bereitzustellen, aus. Bei sensiblen Wärmespeichern ist dies nur bei einer ausgeprägten Temperaturschichtung möglich. Nachteilig sind die im Vergleich höheren Kosten sowie die bislang geringere Entwicklungs- und Marktreife vieler Technologien. Zudem muss der Anwendungsfall zur Temperatur des Phasenwechsels passen, damit das zusätzliche Speicherpotenzial genutzt werden kann. Als Speichermaterialien kommen unter anderem

Wasser in Form von Eisspeichern, Salzhydrate, Paraffine und verschiedene Metalle zum Einsatz.

2.3 Thermochemische Wärmespeicher

In thermochemischen Speichern wird Wärme durch reversible endotherme und exotherme Prozesse gespeichert. Thermochemische Wärmespeicher lassen sich grundsätzlich in thermochemische Reaktionsspeicher sowie Adsorptions- und Absorptionsspeicher unterteilen. Bei Reaktionsspeichern wird die Wärme in chemischen Bindungen gespeichert und durch eine reversible chemische Reaktion geladen bzw. entladen. Beispiele hierfür sind Metallhydride sowie reversible Hydrationsreaktionen.

Bei der thermischen Speicherung durch Adsorption lagert sich Wasserdampf über intermolekulare Kräfte auf der Oberfläche poröser Feststoffe wie Silikagel oder Zeolithen an, wodurch Wärme freigesetzt wird. Durch die Zufuhr von Wärme wird der adsorbierte Stoff wieder desorbiert und der Speicher aufgeladen. Bei der Absorption wird ein Stoff (gasförmig oder flüssig) im Volumen eines Fest-/Flüssigmediums aufgenommen bzw. aufgelöst, wobei ebenfalls Wärme freigesetzt wird. Bei der Zuführung von Wärme wird die Aufnahme bzw. Lösung des Stoffes wieder rückgängig gemacht.

3 Aktueller Stand von Wärmespeichern in deutschen Fernwärmenetzen

Nach Angaben des AGFW, die auf Untersuchungen des Fraunhofer IFAM basieren, waren im Jahr 2023 in deutschen Fernwärmenetzen Wärmespeicher mit einer Gesamtkapazität von 35,2 GWh installiert. Dies entspricht einer Steigerung von 6,3 % gegenüber den 33,1 GWh im Vorjahr [2]

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Speicherkapazität von Großwärmespeichern in den Jahren 2019 bis 2023.

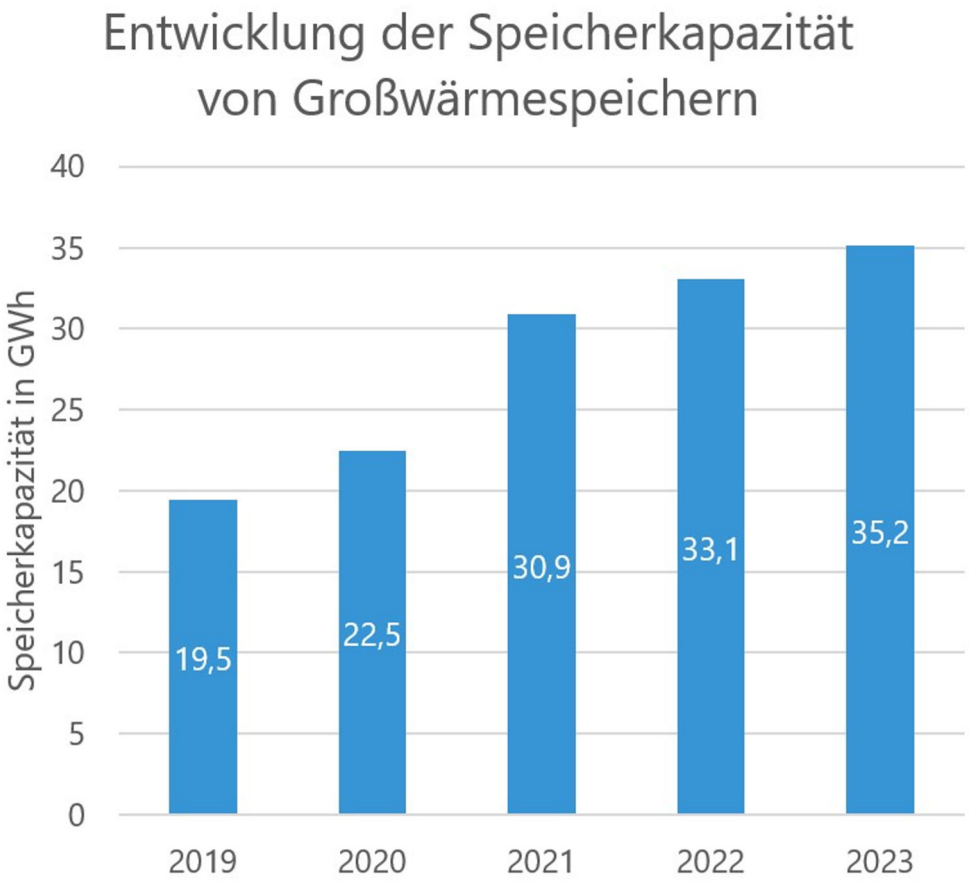

Abbildung 3: Entwicklung der Speicherkapazität von Großwärmespeichern in deutschen Fernwärmenetzen [2]

Die Angaben der im Jahr 2022 befragten AGFW-Mitgliedsunternehmen - veröffentlicht im AGFW-Hauptbericht 2023 - geben zudem Aufschluss über die eingesetzten Wärmespeichertechnologien (siehe Abbildung 4) [1] . Mit einer Gesamtkapazität von 32,4 GWh repräsentieren die Wärmespeicher der befragten Unternehmen rund 98 % der im Jahr 2022 installierten Wärmespeicherkapazität in deutschen Fernwärmenetzen.

Die installierten Wärmespeicher werden weiter in drucklose Speicher, Druckspeicher und Erdbeckenspeicher unterteilt. Drucklose Speicher arbeiten ohne zusätzlichen Überdruck, während Druckspeicher unter Überdruck betrieben werden, um eine Verdampfung des Speichermediums bei höheren Temperaturen zu verhindern. Erdbeckenspeicher sind eine besondere Bauform der drucklosen Speicher, bei denen Wärme in einem abgedichteten Erdbecken gespeichert wird. Die Vor- und Nachteile sowie weitere Details zu den Bauformen werden im Abschnitt „Vertiefung: Sensible Wärmespeicher“ gegeben.

Mit 19,7 GWh beziehungsweise 61 % entfällt der größte Anteil auf drucklose Speicher. Druckspeicher folgen mit einer Kapazität von 9,1 GWh beziehungsweise 28 %. Erdbeckenspeicher spielen mit einer Kapazität von lediglich 16 MWh beziehungsweise 0,05 % derzeit nur eine untergeordnete Rolle. Die verbleibende Speicherkapazität entfällt auf sonstige, nicht näher spezifizierte Speichertechnologien.

Aus der Gegenüberstellung von Speicherkapazität und Speichervolumen ergibt sich für Druckspeicher eine durchschnittliche spezifische Speicherkapazität von 123 kWh/m³, während drucklose Speicher durchschnittlich 59 kWh/m³ erreichen. 2-Zonenspeicher, bei denen das wärmespeichernde Wasser durch eine zweite, mit Wasser gefüllte Zone mit einem geringen Überdruck beaufschlagt wird, wurden bei der Auswertung den Druckspeichern zugeordnet. Bei allen betrachteten Wärmespeichern wurde Wasser als Speichermedium eingesetzt [1] .

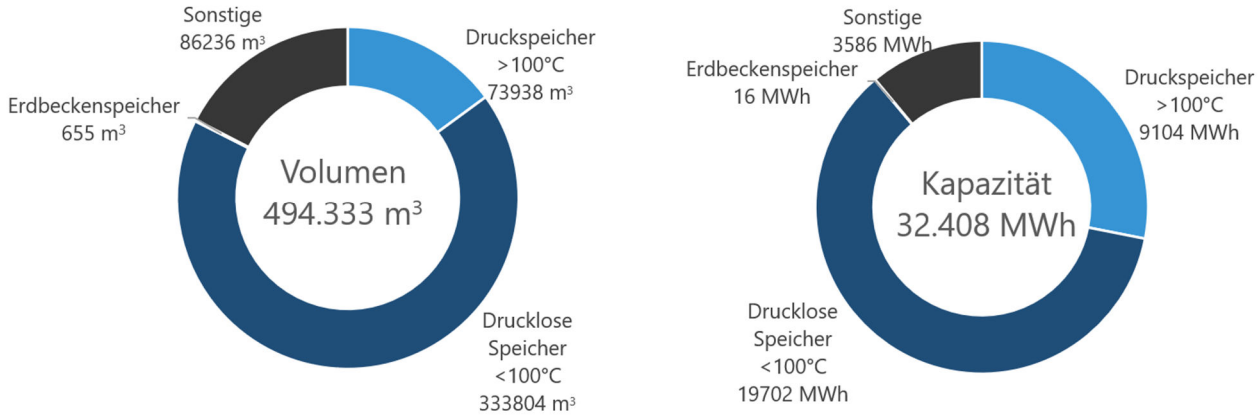

Abbildung 4 Überblick über die eingesetzten Wärmespeichertechnologien in deutschen Fernwärmenetzen [1]

4 Ausblick

Basierend auf Langfristszenarien von Fraunhofer ISI und Consentec ist von einem erheblichen Ausbau der Wärmespeicherkapazität in der Fernwärme auszugehen. Für 2030 wird je nach Szenario eine Wärmespeicherkapazität von 624 GWh (T45-Strom) bis zu 766 GWh (T45-PtG/PtL) prognostiziert, für 2045 von 625 GWh (T45-PtG/PtL) bis zu 871 GWh (T45-H2). Bis 2030 entspricht dies einer Zunahme der Speicherkapazität um den Faktor 17,7 bis 21,7. Während im T45-PtG/PtL-Szenario von 2030 bis 2045 ein leichter Rückgang der Speicherkapazität erwartet wird, steigt sie in den beiden anderen Szenarien an [3]

5 Vertiefung: Sensible Wärmespeicher

Sensible Speicher stellen, die mit Abstand häufigste Technologieform zur Wärmespeicherung dar. In Fernwärmenetzen sind sie zudem die einzige nennenswerte Speichertechnologie. Die Dominanz sensibler Wärmespeicher liegt vor allem in ihrem hohen Reifegrad und ihrem vergleichsweise einfachen Aufbau begründet. Mit Wasser als Wärmeträgermedium nutzen

sie meist ein günstiges und umweltverträgliches Medium, das ohne zusätzlichen Wärmeübertrager direkt im Wärmenetz eingesetzt werden kann. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Bauformen sensibler Wärmespeicher näher beschrieben.

5.1 Behälterspeicher (TTES: Tank thermal energy storage)

In Behälterspeichern wird Wärme durch die Temperaturerhöhung von Wasser in meist zylindrischen Stahlbehältern gespeichert. Dabei wird die Speicherkapazität über die Temperaturdifferenz des Speichers im beladenen und entladenen Zustand bestimmt. Je größer die Temperaturdifferenz, desto mehr Wärme kann im Speicher gespeichert werden. In Fernwärmenetzen wird die Speicherkapazität des Wärmespeichers meist durch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf vorgegeben. Da Wasser jedoch bei atmosphärischem Druck bereits bei 100 °C den Siedepunkt erreicht, ist die maximale volumetrische Speicherkapazität, also die Wärmemenge, die je Volumeneinheit gespeichert werden kann, bei einem drucklosen, auch atmosphärisch genannten Speicher begrenzt. Für höhere Temperaturen muss der Siedepunkt durch Überdruck zu höheren Siedetemperaturen verschoben werden.

Entsprechend lassen sich die Behälterspeicher anhand des Drucks in drucklose Speicher, 2-Zonen-Speicher und Druckspeicher unterteilen. Die drucklosen Speicher arbeiten ohne Überdruck und sind dadurch vergleichsweise einfach aufgebaut und kostengünstig. Sie eignen sich vor allem für Fernwärmenetze mit Vorlauftemperaturen unter 100 °C. Der Überdruck in Druckspeichern erlaubt hingegen den Betrieb in Fernwärmenetzen mit Vorlauftemperaturen von bis zu 160 °C. Dies erhöht die spezifische Speicherkapazität, aber zugleich auch die Anforderungen an Bau, Betrieb und Sicherheit sowie die Kosten. 2-Zonen-Speicher sind eine Zwischenform zwischen drucklosen Speichern und Druckspeichern. Das wärmespeichernde Wasser wird über eine zweite, mit Wasser gefüllte Zone mit einem geringen Überdruck beaufschlagt. Dadurch sind Speichertemperaturen bis etwa 120 °C möglich, ohne dass die Konstruktion des Speichers so aufwendig ausfällt wie bei einem Druckspeicher.

Der größte Vorteil von Behälterspeichern liegt in ihrer hohen technischen Reife, die sich auch in der Vielzahl umgesetzter Projekte in deutschen Fernwärmenetzen zeigt. Zudem sind sie gut regelbar und vergleichsweise einfach in Wärmenetze integrierbar. Aufgrund ihrer Größe und Regelbarkeit eignen sie sich insbesondere zum Ausgleich kurz- bis mittelfristiger Schwankungen zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf, mit Speicherdauern von mehreren Tagen bis zu einigen Wochen. Nachteile ergeben sich vor allem aus der oberirdischen Bauweise und dem damit verbundenen Platzbedarf, der die Errichtung in dicht bebauten Stadtgebieten erschweren kann. Für die saisonale Speicherung sind Behälterspeicher daher aufgrund ihres Platzbedarfs und ihrer begrenzten Größe meist weniger geeignet als großvolumige Speicherformen wie Erdbecken-, Aquifer- oder Kavernenspeicher, da ihre Speicherkapazität entsprechend limitiert ist.

5.2 Erdbeckenspeicher (PTES: Pit Thermal Energy Storage)

Erdbeckenspeicher sind große, künstlich ausgehobene Becken, die mit Folien gegenüber dem Erdreich abgedichtet und mit Wasser oder einem Wasser-Kies-Gemisch befüllt werden. Zusätzliche Folien an der Oberfläche schützen den Speicher vor Umwelteinflüssen. Aufgrund ihrer einfachen Bauweise weisen sie vergleichsweise geringe spezifische Kosten bei großen Speichervolumina auf und sind deshalb besonders für große Speichervolumina und dadurch für die saisonale Speicherung geeignet. Da vor allem Solarthermie eine große Saisonalität aufweist, werden Erdbeckenspeicher oft in Fernwärmenetzen mit hohem Solarthermieanteil eingebunden, aber auch in Kombination mit Großwärmepumpen zeigen sie ein großes Potenzial. Großwärmepumpen können zudem dazu genutzt werden, den Speicher auf Temperaturen unter der Rücklauftemperatur des Wärmenetzes abzukühlen, wodurch die Speicherkapazität des Speichers erhöht werden kann. Die maximale Speichertemperatur liegt, wie bei drucklosen Speichern, bei knapp unter 100 °C.

Nachteilig ist der vergleichsweise große Flächenbedarf, der teilweise durch tiefere Erdbecken oder eine doppelte Nutzung der Speicherfläche reduziert werden kann. Dabei steigen bei tieferen Erdbecken neben den Investitionen auch die Komplexität beim Bau. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der doppelten Nutzung der Speicherfläche, indem Parks, Seen oder Parkplätze auf dem Erdbecken errichtet werden. Eine weitere Herausforderung ist die Auswirkung auf das umgebende Grundwasser, das durch den Wärmespeicher nicht zu stark aufgeheizt werden darf. Die Umsetzung ist deshalb genehmigungs- und standortabhängig. Daneben gestalten sich die Abdichtung zur Umgebung und die Dämmung zum Teil schwierig.

In der AGFW-Auswertung spielen Erdbeckenspeicher mit einem erfassten Volumen von 655 m^3 im Jahr 2022 bislang nur eine untergeordnete Rolle in

Deutschland [1] Demgegenüber wird die Technologie in Dänemark bereits seit vielen Jahren erfolgreich genutzt, und Dänemark zählt deswegen in diesem Bereich als Vorreiter. In Deutschland werden Erdbeckenspeicher zurzeit intensiv in Forschungsprojekten wie zum Beispiel dem Forschungsprojekt TREASURE untersucht.

5.3 Aquiferspeicher (ATES: Aquifer Thermal Energy Storage)

In Aquiferspeichern wird Wärme in wasserführenden geologischen Schichten eingespeichert. Um den Speicher aufzuladen, wird über Brunnen kaltes Wasser entnommen und warmes Wasser eingeleitet. Bei der Entladung läuft der Prozess in die gegengesetzte Richtung. Die geologischen Schichten sollten möglichst geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten aufweisen, damit die eingespeicherte Wärme nicht abtransportiert wird. Zudem sind weitere Anforderungen an die Geologie eine ausreichende Durchlässigkeit und Mächtigkeit der wasserführenden Schicht, damit ein ausreichendes Volumen für die Speicherung zur Verfügung steht. Die Mächtigkeit beschreibt dabei die vertikale Ausdehnung der wasserführenden Schicht. Darüber hinaus ist eine geeignete geochemische Zusammensetzung des Untergrunds erforderlich, um temperaturbedingte Ausfällungen, d. h. die Bildung mineralischer Ablagerungen, zu vermeiden. Durch die Nutzung bereits vorhandener Volumina können große Energiemengen gespeichert werden, sodass sich Aquiferspeicher gut für eine saisonale Speicherung eignen. Gegenüber Behälter- oder Erdbeckenspeichern benötigen sie nur eine geringe oberirdische Fläche, sind jedoch aufgrund der Nutzung geologischer Schichten stark standortabhängig. Die Nutzung der geologischen Schichten bringt auch hohe Anforderungen an die Genehmigung und das Monitoring mit sich; zudem bestehen mögliche Zielkonflikte mit dem Grundwasserschutz.

5.4 Kavernenspeicher (CTES: Cavern Thermal Energy Storage)

Kavernenspeicher speichern Wasser als Wärmeträgermedium in künstlich geschaffenen oder bestehenden unterirdischen Hohlräumen. Sie bieten ebenfalls das Potenzial, sehr große Speicherleistungen und -kapazitäten bei geringem oberirdischem Flächenbedarf zu ermöglichen. Ähnlich wie Aquiferspeicher sind auch Kavernenspeicher auf geeignete geologische Standorte beschränkt. Die geologischen Anforderungen unterscheiden sich jedoch, da kein natürlich wasserführender Aquifer genutzt werden muss. Wenn nicht auf bestehende Hohlräume, wie z. B. alte Stollen, zurückgegriffen werden kann, ziehen Kavernenspeicher eine aufwendige und damit auch kostenintensive Erschließung nach sich. Die hohen Erschließungskosten können zwar über eine lange Lebensdauer von über 100 Jahren verteilt werden, gleichzeitig erschwert ein derart langer Betrachtungszeitraum jedoch die Investitionsplanung. Als Beispiel eines Kavernenspeichers, der zurzeit errichtet wird, kann das Projekt Varanto von Vantaa Energy genannt werden. Unter-halb der finnischen Stadt Vantaa wird der Speicher nach Inbetriebnahme ein Volumen von ca. 1 Mio. m3 aufweisen und Wasser unter Überdruck mit einer Temperatur von bis zu 140 °C speichern. Dies reicht für eine Speicherkapazität von 90 GWh. Das Projekt ist Teil des Forschungsprojektes *Interstores*. (Varanto – VECTES - INTERSTORES)

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich Behälterspeicher vor allem für kurzfristige bis mittelfristige Flexibilität in Wärmenetzen eignen, während Erdbeckenspeicher aufgrund ihrer großen Volumina besonders für saisonale Anwendungen relevant sind. Aquifer- und Kavernenspeicher bieten ebenfalls große Speicherpotenziale bei geringem oberirdischem Flächenbedarf, sind jedoch deutlich stärker von geeigneten geologischen Bedingungen und Genehmigungsfragen abhängig. Zudem sind sie technologisch noch nicht soweit ausgereift. Welche Speichertechnologie geeignet ist, hängt daher insbesondere von Speicherdauer, Temperaturniveau, Flächenverfügbarkeit, Geologie und den Anforderungen des jeweiligen Wärmenetzes ab.

Literaturverzeichnis

[1] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW), „AGFW Hauptbericht 2023". 2023. Zugegriffen: 10. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/

[2] AGFW – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., „AGFW-Hauptbericht 2024." Frankfurt am Main. Zugegriffen: 17. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/

[3] Fraunhofer ISI & Consentec, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland", 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenüberstellung des Bereitstellungs (links) und des Bedarfsmanagements (rechts) 5
Abbildung 2: Übersicht über verschiedene Wärmespeichertechnologien 6
Abbildung 3: Entwicklung der Speicherkapazität von Großwärmespeichern in deutschen Fernwärmenetzen [1] 7
Abbildung 4: Überblick über die eingesetzten Wärmespeichertechnologien in deutschen Fernwärmenetzen [2] ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Impressum

Herausgeber

Am Blütenanger 71
80995 München
+49 89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Veröffentlicht am
12.11.2026

Autor:innen
Felix Rippinger
Jakob Zahler

Stellv. wissenschaftlicher Leiter
Dr.-Ing. Serafin von Roon

Geschäftsleitung
Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Christoph Pellinger
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Förderkennzeichen: 03EI4078C

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Bitte zitieren als
FfE (2026): Wärmespeicher: Flexibilität für das Wärmenetz, Whitepaper im Forschungsprojekt WARAN, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München

Haftungsausschluss (Disclaimer)
Dieses Whitepaper wurde von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) erstellt und dient ausschließlich zu Informationszwecken. Alle in diesem Whitepaper enthaltenen Inhalte, Analysen und Empfehlungen spiegeln die Meinung der FfE wider und stellen keine rechtliche oder beratende Empfehlung dar.

Das Vervielfältigen, Verbreiten, oder jegliche kommerzielle Nutzung der in diesem Whitepaper enthaltenen Inhalte ist ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung der FfE untersagt. Jegliche Veröffentlichung oder Weitergabe des Whitepapers muss mit der Angabe des Links zur entsprechenden Seite auf der FfE-Website erfolgen, auf der das Whitepaper zur Verfügung gestellt wird. Dieser Link muss bei jeder Verteilung des Whitepapers deutlich sichtbar gemacht werden.

Die FfE übernimmt keine Haftung für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität der dargestellten Informationen. Jegliche Nutzung der Inhalte erfolgt auf eigene Verantwortung. Die FfE haftet nicht für direkte oder indirekte Schäden, die aus der Verwendung der Informationen oder Handlungen, die auf Basis dieses Whitepapers durchgeführt werden, resultieren.