

dena-STUDIE

Thermische Energiespeicher für Quartiere

Überblick zu Rahmenbedingungen, Marktsituation und Technologieoptionen
für Planung, Beratung und politische Entscheidungen im Gebäudesektor

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Redaktion:

Maike von Krause-Kohn, Expertin Integrierte Quartiere, dena
Susanne Schmelcher, Teamleiterin Integrierte Quartiere und urbane Wärmesysteme, dena

Autorinnen und Autoren:

Dr.-Ing. Anna Kallert, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE
LL.M. Eric Lamvers, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE
Dr.-Ing. Young Jae Yu, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE

Bildnachweis:

Titelbild – dena

Datum der Veröffentlichung:

09/2021

Das Veröffentlichungsdatum entspricht nicht zwangsläufig dem Stand dieser Publikation, da es zwischen Erstellung und Veröffentlichung einer Studie bereits Änderungen der inhaltlichen Rahmenbedingungen gegeben haben kann.

Bitte zitieren als:

Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2021)
„dena-Studie, Thermische Energiespeicher für Quartiere, Überblick zu Rahmenbedingungen, Marktsituation und Technologieoptionen für Planung, Beratung und politische Entscheidungen im Gebäudesektor“

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Allgemeine Rahmenbedingungen	7
2.1	Genehmigungsanforderungen.....	7
2.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	9
2.3	Marktsituation und Geschäftsmodelle	11
3	Thermische Speicher für Quartiere	13
3.1	Sensible Wärme- und Kältespeicherung (zentral).....	13
3.1.1	Heißwasser-Wärmespeicher.....	13
3.1.2	Kies-Wasser-Speicher	17
3.1.3	Aquiferspeicher	21
3.1.4	Erdwärmesondenspeicher.....	25
3.1.5	Wasserspeicher für Power-to-Heat-Anlage (Elektrodenheizkessel).....	29
3.2	Sensible Wärme- und Kältespeicherung (dezentral und gebäudeintegriert)	32
3.2.1	Gebäudeintegrierte Wasserspeicher für kalte Nahwärmenetze	32
3.3	Latentwärme- und Kältespeicher	36
3.3.1	Eisspeicher.....	36
3.3.2	Phasenwechselmaterialien-Speicher (PCM-Speicher).....	39
3.4	Thermochemische Wärme- und Kältespeicher.....	43
4	Zusammenfassung und Fazit	49
	Abbildungsverzeichnis.....	53
	Tabellenverzeichnis.....	55
	Literaturverzeichnis	56
	Abkürzungen.....	66
	Einheiten- und Indexverzeichnis	69



Klimaneutrale Quartiere und Areale

Quartiere werden zum Gelingen der Energiewende immer wichtiger und übernehmen zunehmend eine Schlüsselrolle. Hier laufen viele Fäden zusammen: Stellschrauben liegen bei Verkehr, Gebäuden und der Energieversorgung. Daraus ergeben sich insbesondere auch vielfältige Synergien. In Städten und Gemeinden ist es zielführend, nicht nur einzelne Gebäude, sondern das Gebäude im räumlichen Zusammenhang zu betrachten. So erschließen sich ganz neue Effizienzpotenziale und Handlungsoptionen auf lokaler und regionaler Ebene.

Quartiere sind Schnittstellen. Hier kommt vieles zusammen, was historisch anders und vor allem als separate Systeme gewachsen ist. Gleichzeitig bieten Quartiere vielseitige Optionen für die politisch und gesellschaftlich angestrebte Klimaneutralität – und viele Vorteile: Beispielsweise können lokale

Erneuerbare-Energien- oder Effizienzpotenziale genutzt, Anlagen und Speicher optimal ausgelegt, positioniert und betrieben sowie unterschiedliche Bedarfsprofile ausgeglichen werden und die Flächeneffizienz im Gesamtquartier kann erhöht werden.

Mit ihrer Arbeit im Handlungsfeld Quartier will die Deutsche Energie-Agentur (dena) einen Beitrag dazu leisten, Quartierskonzepte in die breite Umsetzung zu bringen. Diesbezüglich hat die dena folgende Aktionsfelder identifiziert:

- Verbesserung des regulatorischen Rahmens
- Analyse von Technologien und Konzepten
- Stärkung von Prozessen und Geschäftsmodellen
- Darstellung von Best Practices national und international
- Vernetzung von Akteuren
- Durchführung von Modellvorhaben

Die Studie „**Thermische Energiespeicher für Quartiere**“ ist Teil einer **Reihe von Publikationen zum Thema Quartier**, welche von der dena veröffentlicht werden. Sie liefert einen Überblick über aktuelle Speichertechnologien, die sich für den Einsatz in (nahezu) klimaneutralen Quartieren eignen und stellt die Unterschiede heraus. Mit ihrer Hilfe soll einerseits die Auswahl der passenden Technologie für das jeweilige Vorhaben und andererseits politische Entscheidungsfindung unterstützt werden.

Weitere Veröffentlichungen zu diesem Schwerpunkt sind:

- Projektbericht „**Klimaneutrale Quartiere und Areale**“
- Studie „**Das Quartier - Energieversorgung von Gebäuden im räumlichen Zusammenhang**“
- Factsheets „**Fokusthemen**“
- Factsheets „**Quartierskategorien**“
- Factsheets „**Praxisbeispiele**“

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende gewinnt die Dekarbonisierung des Wärmesektors zunehmend an Bedeutung, da der Anteil der Wärme am Endenergieverbrauch in Deutschland derzeit bei etwa 50 Prozent (UBA, 2020a) liegt.

Wichtige Schlüsselmaßnahmen bzw. -technologien umfassen dabei die Wärmebedarfssenkung durch die Durchführung von Effizienz- und Sanierungsmaßnahmen, die Integration von erneuerbaren Energien (EE) sowie die Systemintegration von Power-to-Heat (PtH)-Systemen in Kombination mit thermischen Speichern.

Im Rahmen der Planung und der konkreten Umsetzung von Effizienz- und Sanierungsmaßnahmen sowie von sektorübergreifenden Lösungsansätzen sind Quartiere eine wichtige räumliche Einheit auf dem Weg zur nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems im Wärmesektor. In diesem Handlungsraum sollen Strategien und Maßnahmen der Energieeinsparung, der Steigerung der Energieeffizienz und der Nutzung von EE mit Speichertechnologien bei integrierter Betrachtung von Gebäuden, Verbrauchsgewohnheiten und technischen Infrastrukturen auf Quartiersebene abgestimmt werden. Beispielsweise können lokal verfügbare Photovoltaik (PV)- und Solarthermieanlagen, Blockheizkraftwerke (BHKWs), elektrisch angetriebene Wärmepumpen sowie PtH-Anlagen mit zentralen und dezentralen thermischen Energiespeichern verknüpft und netzdienlich betrieben werden.

Die wesentliche Aufgabe eines thermischen Energiespeichers auf Quartiersebene ist es, lokal verfügbare regenerative Energiequellen nutzbar zu machen, die starken Schwankungen aufgrund der volatilen Einspeisung von EE unterliegen. Dies ermöglicht eine erhöhte Versorgungssicherheit beim Netzbetrieb. Darüber hinaus kann die Nutzung von thermischen Speichern unerwünschte Tageslastspitzen ausgleichen bzw. reduzieren, um Energieressourcen effizienter einzusetzen. Damit kann ein großer Teil des Wärmebedarfs mit EE, beispielsweise Strom aus Wind- und PV-Anlagen in Kombination mit elektrischen Wärmepumpen, solarthermisch erzeugter Wärme, unvermeidbarer Abwärme aus Industrieprozessen und anderen Umweltwärmen aus unterschiedlichen Quellen (Erdreich, Grundwasser etc.) gedeckt werden.

Bei der Planung von thermischen Speichern für Quartiere können drei verschiedene Speicherkonzepte, die sich in sensible (Wärmespeicherung durch Temperaturveränderung des Speichermediums), latente (Wärmespeicherung hauptsächlich durch die Nutzung von Phasenwechsel (von fest zu flüssig) des Speichermediums) und thermochemische Wärmespeichervarianten (Wärmespeicherung in Form einer reversiblen thermo-chemischen Reaktion) unterteilen, unter Berücksichtigung von technischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Aspekten betrachtet werden. Darüber hinaus sind der Anwendungsbereich (Wärme- und Kälteversorgung sowie Kopplung mit unterschiedlichen Wärmenetzsystemen), die Verortung der Speicher (zentral, dezentral bzw. gebäudeintegriert) und die Speicherdauer (Lang- und Kurzzeitwärmespeicherung) als technische Aspekte zu berücksichtigen.

Ziel dieses Dossiers ist es thermische Energiespeichertechnologien, die sich für Quartiersprojekte eignen zu identifizieren und anhand der wichtigsten Planungsparameter zu vergleichen sowie darzustellen, um einen guten Überblick zu ermöglichen. Das Dossier gliedert sich wie folgt:

Beginnend mit dieser Einleitung werden allgemeine Rahmenbedingungen der Genehmigung, Wirtschaftlichkeit und Marktsituation und Geschäftsmodelle zum Einsatz von thermischen Energiespeichern in Kapitel 2 erläutert. In Kapitel 3 werden technische, rechtliche und wirtschaftliche Eigenschaften von folgenden Speichertechnologien beschrieben:

Heißwasser-Speicher (siehe Kapitel 3.1.1): Beim Heizwasser-Speicher befindet sich das Wasser in einem isolierten Behälter, der je nach Anwendungsfall unterschiedliche Geometrien aufweisen kann. Die Möglichkeiten

einer Speicherung von Heißwasser reichen dabei von kleinen Speichern mit wenigen Kubikmetern bis hin zu Großwasserspeichern für die saisonale Wärmespeicherung in Wärmenetzen.

Kies-Wasser-Speicher (siehe Kapitel 3.1.2): Bei einem Kies-Wasser-Speicher dient ein Gemisch aus Kies und Wasser als Speichermedium. Kies-Wasser-Speicher werden bisher überwiegend als Langzeitwärmespeicher oder Zwischenspeicher für solare Nahwärmenetze bzw. Gebäudekomplexe eingesetzt.

Aquiferspeicher (siehe Kapitel 3.1.3): Bei Aquiferspeichern werden wasserführende Gesteinsformationen (100 – 500 m Tiefe) (Rundel et al., 2013) zur Wärmespeicherung genutzt, die möglichst nach oben und unten abgeschlossen sind. Das Wärmeträgermedium des Aquifers lässt sich beispielsweise mithilfe solarthermischer Anlagen erwärmen.

Erdwärmesondenspeicher (siehe Kapitel 3.1.4): Bei Erdwärmesondenspeichern oder Erdwärmekollektoren dient das Erdreich bzw. Gestein als Speichermedium und die Erdwärmesonden (in der Regel Doppel-U-Rohre) dienen als Wärmeübertrager zum Be- und Entladen des Speichermediums. Sie finden häufig als Quartierspeicher in Kombinationen mit großen Solarfeldern / PV-Anlagen / Solarthermie-Anlagen zur Gebäudeheizung und -kühlung Anwendung.

Wasserspeicher für Power-to-Heat-Anlagen (siehe Kapitel 3.1.5): PtH-Anlagen (Power-to-Heat) basieren auf dem Prinzip der unmittelbaren Umwandlung elektrischer Wirkleistung in Wärme. Die Grundlagen bilden zwei unterschiedliche Varianten: Widerstands-Heißwasserkessel (Tauchsieder-Prinzip) und Elektroden-Heißwasserkessel.

Gebäudeintegrierte Speicher (kaltes Nahwärmenetz) (siehe Kapitel 3.2.1): Beim Einsatz von dezentralen Wärmepumpen eines kalten Nahwärmenetzes können thermische Speicher für die Raumheizung und TWW-Bereitung zur Optimierung des lokalen PV-Eigenstromverbrauchs eingesetzt werden.

Eisspeicher (siehe Kapitel 3.3.1): Eisspeicher dienen sowohl als Wärmequelle als auch als saisonale Wärmespeicher. Es existieren technische Lösungen für kleine Gebäude (Ein- und Zweifamilienhäuser) und größere Gebäude sowie für die Einbindung in ein kaltes Nahwärmenetz

Phase Change Material (PCM) (siehe Kapitel 3.3.2): Phasenwechselmaterialien (englisch: Phase Change Materials, PCM) speichern Wärme im Phasenwechsel des Speichermediums. Im kleinen Maßstab werden PCM-Speicher bereits in vielen Anwendungen eingesetzt und sind kommerziell verfügbar.

Sorptionsspeicher (siehe Kapitel 3.4): Die Wärmespeicherung erfolgt durch chemisch reversible Reaktionen oder den Sorptionsprozess (Ab- und Adsorptionsprozess) und zeichnet sich besonders durch eine hohe Energiedichte aus.

SaltX-Anlage (siehe Kapitel 3.4): Bei SaltX-Anlagen wird Salz, das eine hohe Energiedichte aufweist, als Speichermedium eingesetzt. Die Energie wird dabei chemisch gespeichert, indem feuchtes Salz durch einen Trocknungsprozess erhitzt und so vom Wasser getrennt wird.

Abschließend erfolgt im Kapitel 4 eine Gegenüberstellung von technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften verschiedener Speichertechnologien anhand grafischer Darstellungen und befindet sich ein kurzes Fazit. Dabei zeigt sich, dass die Anwendung bzw. Umsetzung thermischer Speicher auf Quartiersebene in Bezug auf die übergeordnete Zielsetzung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Energieversorgung betrachtet werden sollte. Darüber hinaus kann die Energiebereitstellung mittels Wärmespeichern in Form von Strom, Wärme und Kälte flexibilisiert und mit volatilen EE-Erzeugern gekoppelt werden. Dadurch kann die Effizienz in Fernwärmesystemen und Quartieren erhöht und die Leistung von fossil befeuerten Kraftwerken durch PtH-Anlagen ersetzt werden.

Abbildung 1 stellt eine Übersicht über verfügbare Speichertechnologien dar, wobei in den folgenden Kapiteln die einzelnen thermischen Speicher näher beschrieben werden.

Speichersystem		Latente Wärmespeicherung	Sensible Wärmespeicherung	Thermochemische Wärmespeicherung	Zentral	Dezentral (gebäudeintegriert)	Fernwärme (> 80 °C)	Niedertemperatur-Nahwärmenetz (55 – 30 °C)	Kaltes Nahwärmenetz (< 30 °C)	Heizung	Kühlung	Kurzzeitwärmespeicherung	Langzeitwärmespeicherung
	Heißwasser-Speicher		o		o		o	o		o		o	o
	Kies-Wasser-Speicher		o		o			o	o	o		o	o
	Aquiferspeicher		o		o			o	o	o	o	o	o
	Erdwärmesondenspeicher		o		o			o	o	o	o	o	o
	Wasserspeicher für Power-to-Heat-Anlagen		o		o		o			o		o	
	Gebäudeintegrierte Speicher (kaltes Nahwärmenetz)	Δ	o			o	o	o	o	o		o	
	Eisspeicher	o			o	o		o	o	o	o	o	o
	Phase Change Material (PCM)	o			o	o	o	o	o	o	o	o	
	Sorptionsspeicher			o	o	o	o	o		o	o	o	o
	SaltX-Anlage			o	o		o			o		o	o

Abbildung 1 Übersicht über verfügbare Speichertechnologien, wobei o für „Einsatz möglich“ und Δ für „Einsatz nur mit zusätzlicher Investition möglich“ steht (eigene Darstellung)

2 Allgemeine Rahmenbedingungen

2.1 Genehmigungsanforderungen

Bei thermischen Energiespeichern für Quartiere werden unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Genehmigung gestellt. Diese Anforderungen sind unter anderem abhängig von der Speichertechnologie selbst, von dem zu nutzenden bzw. potenziell beeinflussten Umweltmedium und vom eingesetzten Speichermedium. So ist stets eine Einzelfallbetrachtung erforderlich. Die Genehmigung eines Speichers kann zusammen mit der Genehmigung für die mit dem Speicher verbundene Anlage beantragt werden. Die für die Genehmigung zuständige Behörde ist unter anderem abhängig vom geplanten Speichersystem.

Für Vorhaben im Zusammenhang mit der Aufsuchung (§ 4 I BBergG) und Gewinnung (§ 4 II BBergG) von Erdwärme (z.B. bei Aquifer- und Erdwärmesondenspeichern) herrscht eine Anzeigepflicht nach § 49 I WHG und § 8 GeolDG. Für Vorhaben mit einer Tiefe > 100m ist zusätzlich eine Anzeige nach § 127 BBergG bei der zuständigen Bergbehörde zu stellen (Griebler et al., 2014).

Grundsätzlich können neben der Anzeigepflicht auch wasser- und/oder bergrechtliche Genehmigungen (Kranz et al., 2008) sowie die Prüfung der Zulässigkeit des Vorhabens nach § 21 II Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) (Bundesverband Geothermie e.V., 2020), sofern „in einer Teufe von 300 bis 1 500 Metern unter der Geländeoberkante stratiforme Steinsalz- oder Tonsteinformationen mit einer Mächtigkeit von mindestens 100 Metern, Salzformationen in steiler Lagerung oder Kristallingesteinsformationen mit einer vertikalen Ausdehnung von mindestens 100 Metern vorhanden sind oder erwartet werden können“ (§ 21 II S. 1 StandAG) erforderlich sein. In Abhängigkeit der Aufsuchung oder Gewinnung der Erdwärme als bergfreier Bodenschatz kann eine bergrechtliche Genehmigung (§§ 6 ff. BBergG i. V. m. § 3 III S. 2 Nr. 2 b) BBergG) und eine Betriebsplanpflicht (§ 127 I Nr. 2 i. V. m. §§ 51 ff. BBergG) erforderlich sein. Entsprechend würde sich die Zuständigkeit einer Bergbehörde ergeben. Ausgenommen von der Gewinnung ist unter anderem „das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen in einem Grundstück aus Anlaß oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulichen Nutzung“ (§ 4 II Nr. 1 BBergG), sodass in den Fällen der grundstücksbezogenen Vorhaben eine wasserrechtliche Genehmigung i. S. d. § 8 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) in der Regel ausreichend ist (Eisele et al., 2018) und somit eine untere Wasserbehörde zuständig wäre. Im Rahmen der Verwaltungspraxis der Bundesländer werden neben dieser Ausnahme zum Teil auch weitere Ausnahmen von der Gewinnung definiert¹, sodass die Zuständigkeit der Wasser- bzw. Bergbehörde in den Bundesländern abweicht. Im Einzelfall kann durch die zuständige Behörde eine Betriebsplanpflicht nach § 127 I Nr. 2 BBergG auch bei wasserrechtlich zu genehmigenden Vorhaben mit einer Tiefe > 100m festgestellt werden, sofern dies nach §§ 51 ff. BBergG erforderlich ist.

Insbesondere bei der Betrachtung eines Aquiferspeichers sollte zudem die Vereinbarkeit mit dem geltenden Raumordnungsrecht betrachtet werden. Ist das jeweilige Vorhaben raumbedeutsam (§ 3 I Nr. 6 ROG), ist eine Abstimmung mit den für die Raumordnung zuständigen Behörden notwendig. Raumbedeutsam ist ein Aquiferspeicher, wenn dieser raumbeanspruchend (Flächenbezug) oder raumbeeinflussend (Wirkungsbezug) ist. Eine Beurteilung muss im Einzelfall erfolgen (Holstenkamp et al., 2016).

Je nach Vorhaben kann ein Planfeststellungsverfahren erforderlich sein und die Pflicht zur Führung eines Betriebsplans oder zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung, beispielsweise i. S. d. § 57a BBergG

¹ Nutzbarmachung geothermischer Energie in NRW – Grundsatz-Erlass des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie
<https://www.bra.nrw.de/energie-bergbau/energie-technologie/geothermie-die-regenerative-energie-aus-dem-erdinneren/geothermie>

i. V. m. dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) bzw. der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-VBergbau), bestehen (Brumme, 2009). Eine Liste der UVP-pflichtigen Vorhaben findet sich in Anlage 1 des UVPG.

Auch aus der Verwendung des Speicher- bzw. Wärmeträgermediums können sich zusätzliche Anforderungen, beispielsweise gemäß § 62 WHG i. V. m. der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) (Eisele et al., 2018), ergeben. Ob solche Anforderungen bestehen, hängt unter anderem davon ab, welche Stoffe zum Einsatz kommen, welche Anlagen betrieben werden, ob die Anlagen ortsfest sind bzw. ortsfest genutzt werden, welche Mengen verwendet werden und in welche Wassergefährdungsklasse (WGK) die verwendeten Mengen einzuordnen sind (Jaeger, 2018). Ethylenglykole, wie sie in Erdwärmetauschern verwendet werden, sind den wassergefährdenden Stoffen (WGK 1) zugeordnet und sollen nicht ins Grundwasser gelangen (Bonin, 2020), (Eisele et al., 2018). In diesem Rahmen sind Anlagenbetreiber dazu verpflichtet die Grundsatzanforderungen nach § 17 AwSV zu erfüllen. Diese Anforderungen umfassen unter anderem, dass Anlagen „so geplant und errichtet werden, beschaffen sein und betrieben werden sollen, dass wassergefährdende Stoffe nicht austreten können“ (§ 17 I Nr. 1 AwSV), „Undichtheiten aller Anlagenteile, die mit wassergefährdenden Stoffen in Berührung stehen, schnell und zuverlässig erkennbar sind“ (§ 17 I Nr. 2 AwSV), „austretende wassergefährdende Stoffe schnell und zuverlässig erkannt und zurückgehalten sowie ordnungsgemäß entsorgt werden. Dies gilt auch für betriebsbedingt auftretende Spritz- und Tropfverluste“ (§ 17 I Nr. 3 AwSV) und bei einer Betriebsstörung der Anlage „anfallende Gemische, die ausgetretene wassergefährdende Stoffe enthalten können, zurückgehalten und ordnungsgemäß als Abfall entsorgt oder als Abwasser beseitigt werden“ (§ 17 I Nr. 4 AwSV). „Die Anlagen müssen dicht, standsicher und gegenüber den zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüssen hinreichend widerstandsfähig sein“ (§ 17 II AwSV). Da einwandige unterirdische Behälter unter anderem für flüssige wassergefährdenden Stoffe nach § 17 III AwSV unzulässig sind, bedarf es in der Regel doppelwandiger Behälter. Für Erdwärmesonden und -kollektoren gelten besondere Anforderungen in deren Rahmen sie unter den Voraussetzungen des § 35 II AwSV auch einwandig ausgeführt werden dürfen, „wenn sie aus einem werkseitig geschweißten Sondenfuß und endlosen Sondenrohren bestehen“ (§ 35 II Nr. 1 AwSV), „sie durch selbsttätige Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen so gesichert sind, dass im Fall einer Leckage des Wärmeträgerkreislaufs die Umwälzpumpe sofort abgeschaltet und ein Alarm ausgelöst wird“ (§ 35 II Nr. 2 AwSV) und als Wärmeträgermedium „nicht wassergefährdende Stoffe“ (§ 35 II Nr. 3a) AwSV oder „Gemische der Wassergefährdungsklasse 1, deren Hauptbestandteile Ethylen- oder Propylenglycol sind“ (§ 35 II Nr. 3b) AwSV verwendet werden. Als Hilfe zur Einstufung der zu verwendenden Stoffe steht eine [Online-Plattform des Umweltbundesamtes \(UBA\)](#) zur Verfügung. Zudem ist die Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GrwV) zu beachten (Brumme, 2009).

Eine baurechtliche Genehmigung i. S. d. Baugesetzbuchs (BauGB) und der Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (BauNVO) kann insbesondere bei oberirdischen Speichern, zum Beispiel Heißwasser-Speichern, bzw. bei den mit den Speichern verbundenen Anlagen, zum Beispiel Heizzentralen, notwendig sein. Außerdem ist das Verhältnis des Baurechts zum Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (BNatSchG) zu berücksichtigen (§ 18 BNatSchG), wodurch Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege gegebenenfalls zu beachten sind.

Für große oberirdische Speicher sind die Bodenbeschaffenheit im Rahmen eines Bodengutachtens sowie die Prüfung der Statik zu beachten. Für die gebäudeintegrierten Speicher selbst gelten keine spezielleren Regelungen dieser Art. Auch eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung i. S. d. §§ 10, 19 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BImSchG), gegebenenfalls i. V. m. der 1., 4. oder 12. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV), kann erforderlich sein (Bolay et al, 2017), (Brumme, 2009).

Die Einhaltung der Vorschriften der Technischen Anleitung (TA) Lärm und TA Luft haben die Hersteller von Anlagen zwar generell im Blick, dennoch sind diese Vorschriften durch die planenden Instanzen zu beachten und sollten im Zweifelsfall geprüft werden.

Der Vollzug der wasser-, berg- und baurechtlichen Bestimmungen obliegt, wie die meisten Verwaltungsangelegenheiten, den Ländern, sodass die Orientierung hinsichtlich der Zuständigkeit standortspezifisch erfolgen muss. Zudem können die Regelungen einiger Länder (LImSchG, LWG, BauO Land etc.) von denen des Bundes zielkonform abweichen. Grundsätzlich ist eine frühzeitige Einbindung zuständiger Behörden sinnvoll, um allen und insbesondere landesspezifischen Anforderungen zu genügen und somit mehr Sicherheit für den gesamten Planungsprozess zu erlangen.

2.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Hinsichtlich der Investitionskosten lässt sich insbesondere die Abhängigkeit der Kosten vom Volumen der thermischen Speicher (Abbildung 2) erkennen.

Aufgrund niedriger Materialkosten gelten sensible Wärmespeichersysteme als die ökonomisch günstigste Speichervariante. Mit steigendem Forschungsfortschritt bei der Materialentwicklung könnten die Investitionskosten für latente und thermochemische Speicher jedoch entsprechend sinken. Aufgrund der höheren Energiedichte dieser Systeme gegenüber sensiblen Speichern würden sie somit gegebenenfalls ökonomisch günstiger als bisher bewertet werden (Rundel et al., 2013).

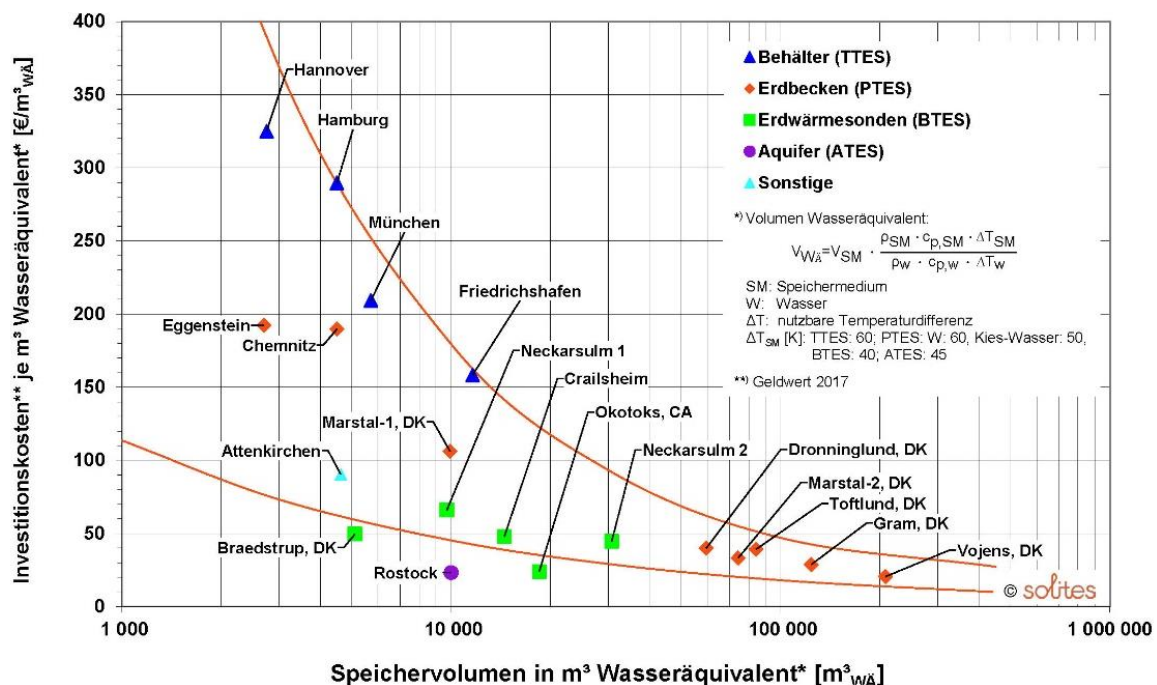


Abbildung 2 Spezifische Investitionskosten saisonaler thermischer Speicher ohne Planungskosten und MwSt. (Solites, 2021a)¹

Energierrechtliche Rahmenbedingungen sollten unter anderem im Hinblick auf den wirtschaftlichen Betrieb betrachtet werden. Das betrifft nicht nur die Speicher selbst, sondern gegebenenfalls auch die verbundenen

¹ Wasseräquivalent: Volumen eines Speichermediums, das genauso viel Wärme speichern kann wie ein Kubikmeter Wasser im flüssigen Zustand bei Normaldruck.

PtH-Anlagen. In diesem Kontext sollten zum Beispiel Regelungen des Gesetzes für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) zur Eigenversorgung (§ 3 Nr. 19 EEG) und zur Reduktion der EEG-Umlage¹ (§§ 61 ff. EEG) sowie zur Zahlung von Einspeisevergütungen oder Marktprämien (§§ 19 f. EEG) betrachtet werden. Auch das Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (EnWG) kann durch reduzierte Netzentgelte (§ 14a EnWG) bzw. durch die Befreiung von Netzentgelten mittels Direktleitung (§ 3 Nr. 12 EnWG) oder im Rahmen einer Kundenanlage (§ 3 Nr. 24 a und b EnWG) zu einem wirtschaftlichen Betrieb beitragen. Weitere Erlössteigerungen können durch eine Reduktion der Stromsteuer (§ 9 StromStG) oder die Befreiung von der Energiesteuer (§ 53a EnergieStG) sowie Zuschlagszahlungen im Rahmen des Gesetzes für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG) (§§ 5 ff. und §§ 22–25 KWKG) generiert werden (Albert et al., 2018), (Bolay et al., 2017), (Holstenkamp et al., 2016).

Die Wirtschaftlichkeit kann durch Förderprogramme beeinflusst werden. Die Voraussetzungen von Förderprogrammen für thermische Speicher, ihre Förderquoten und ihre Förderhöhe sind unterschiedlich und somit vorhabenspezifisch zu ermitteln. Beispielhaft für Förderprogramme auf Bundesebene sind die Programme der KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#), [Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#) und [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#) bzw. [IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#), die als Kreditprogramme, zum Teil mit Tilgungszuschuss, ausgestaltet sind. Zuschüsse für thermische Energiespeicher auf Bundesebene können im Rahmen des KWKGs oder des [Förderprogramm für effiziente Wärmenetze \(Wärmenetzsysteme 4.0\)](#)² gewährt werden. Sowohl bei der Sanierung von Bestandgebäuden zu einem Effizienzgebäude und beim Bau sowie beim Kauf von Effizienzgebäuden als auch beim Bau eines nicht-öffentlichen Gebäudenetzes bzw. beim Anschluss an ein nicht-öffentliches Gebäudenetz oder an ein öffentliches Wärmenetz können Förderungen von Wärmespeichern in Form eines Zuschusses beim BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#) für Wohngebäude und [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#) für Nichtwohngebäude oder in Form eines Zuschusses bei der KfW im Rahmen der [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#) und [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#) bzw. in Form eines Kredits im Rahmen der [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#), [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#) und [Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#) gewährt werden. Kommunen können Zuschüsse bzw. Kredite über die KfW Programme [Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#) bzw. [Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#) erhalten.

Die Bundesländer haben zum Teil eigene Programme für die Förderung von thermischen Speichern aufgesetzt. So haben unter anderem die Länder [Baden-Württemberg](#), [Nordrhein-Westfalen](#), [Schleswig-Holstein](#), [Hamburg](#), [Rheinland-Pfalz](#) und [Saarland](#) Förderprogramme für verschiedene Arten energetischer Speicher, häufig in Kombination mit Erzeugungsanlagen, veröffentlicht. In dieser Kombination gibt es in den Ländern [Bremen](#), [Hessen](#) und [Saarland](#) Förderprogramme, welche die Förderung von Pufferspeichern vorsehen. Im Zusammenhang mit einer Nichtwohngebäudemodernisierung werden in [Hessen](#) explizit Wärmespeicher gefördert.

¹ Die derzeitige Absenkung der EEG-Umlage bis 2022 mit Haushaltsmitteln des Bundes (Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/10/20201015-altmaier-die-eeg-umlage-2021-sinkt-entlastung-aus-dem-konjunkturpaket-wird-umgesetzt.html>) und die Bestrebungen zur Senkung bzw. Abschaffung der EEG-Umlage (Quelle: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/klimaschutz-kosten-eeg-umlage-100.html>) könnten insbesondere die Wirtschaftlichkeit von PtH Vorhaben (siehe insbesondere Kapitel 3.1.5) zukünftig erhöhen.

² Die „Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze“ (BEW) vom 16.07.2021, die das Förderprogramm „Wärmenetze 4.0“ ablösen soll, liegt zum Zeitpunkt dieser Ausarbeitung als Entwurf vor. „Nach Länder- und Verbändeanhörung gibt es einen überarbeiteten, ressortabgestimmten Entwurf mit Datum 11.08.“ (BMWi), der den Autor*innen zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht vorliegt.

In Merkblättern zu Förderprogrammen werden thermische Speicher meist auch durch übergeordnete Begriffe („Wärme-/Kältespeicher“) definiert, wobei nicht deutlich wird, dass einige Technologien unmittelbar oder mittelbar, beispielsweise aufgrund technischer Voraussetzungen, von der Förderung ausgeschlossen sind. Deshalb ist eine genaue Nachfrage zur Förderfähigkeit der jeweiligen Technologie bei den fördermittelgebenden Stellen sinnvoll.

2.3 Marktsituation und Geschäftsmodelle

Bei der Wärmespeicherung für Raumheizung und Trinkwassererwärmung entsteht ein wachsender Markt, dessen zu erwartende Nachfrage mit einer deutlichen Ausweitung der Produktionskapazitäten einhergeht (Schabbach, 2010). Die sensiblen Speicher stellen die am weitesten entwickelten Technologien dar (Seitz et al., 2018). Industrielle Standardprodukte dominieren hier in der Regel den Markt, sodass ein erheblicher Kostendruck besteht (Schabbach, 2010). Zur sonstigen Marktsituation, insbesondere im Hinblick auf die Marktpotenziale thermischer Speicher, gibt es keine belastbaren Studien, da eine Abhängigkeit zu verschiedenen Bedingungen besteht (Seitz et al., 2018).

Die Entwicklung und die Umsetzung von Geschäftsmodellen sind von einer Vielzahl von Faktoren wie der Unternehmensform, dem aktuell geltenden Recht und marktbedingten Rahmenbedingungen abhängig. Zum Beispiel kann sich die Unternehmensform auf die Finanzierung auswirken. Dies kann einen weiteren Effekt auf die Umsetzung eines Modells, insbesondere die Einbindung weiterer Partner wie beim Contracting oder bei Dienstleistungen, haben, um gegebenenfalls Risiken zu mindern oder gezielt Investitions- oder Steuernachteile auszugleichen (Beucker und Hinterholz, 2017). Einige Faktoren mit Einfluss auf die Entscheidung für oder gegen ein Geschäftsmodell, wie beispielsweise das Contracting, werden beispielhaft in Tabelle 1 dargestellt. Dabei kann es auch sein, dass sich die Faktoren gegenseitig bedingen und somit bei der Gesamtbeurteilung eine andere Entscheidung getroffen werden würde als bei einer separaten Betrachtung einzelner Faktoren.

Tabelle 1 Einflussfaktoren, wie das Contracting, auf das Geschäftsmodell für thermische Speicher (eigene Darstellung)

Ertrag	Wärmepreis, Abnahme Kundenbindung, Image Vergütung KWKG oder EEG
Aufwand	Personal, Material Akquise, Vertrieb Errichtung, Betrieb, Wartung Steuern, Finanzierung, Gebühren Genehmigung, Ausschreibung, Vertragsgestaltung Versicherung
Fördermöglichkeiten	Planung, Projektierung Errichtung/Installation Betrieb Verbundene Anlagen

Die Faktoren mit Einfluss auf die Entscheidung für oder gegen ein Geschäftsmodell für thermische Speicher, wie zum Beispiel das Contracting, sind ebenso vielfältig wie unter Umständen einzelfallbezogen. Anhand der

Identifizierung und Prüfung relevanter Faktoren für Geschäftsmodelle kann eine Entscheidung getroffen werden, wie sie in dem vereinfachten Beispiel in Abbildung 3 für die Entscheidung zwischen Contracting und Eigenbetrieb dargestellt ist.

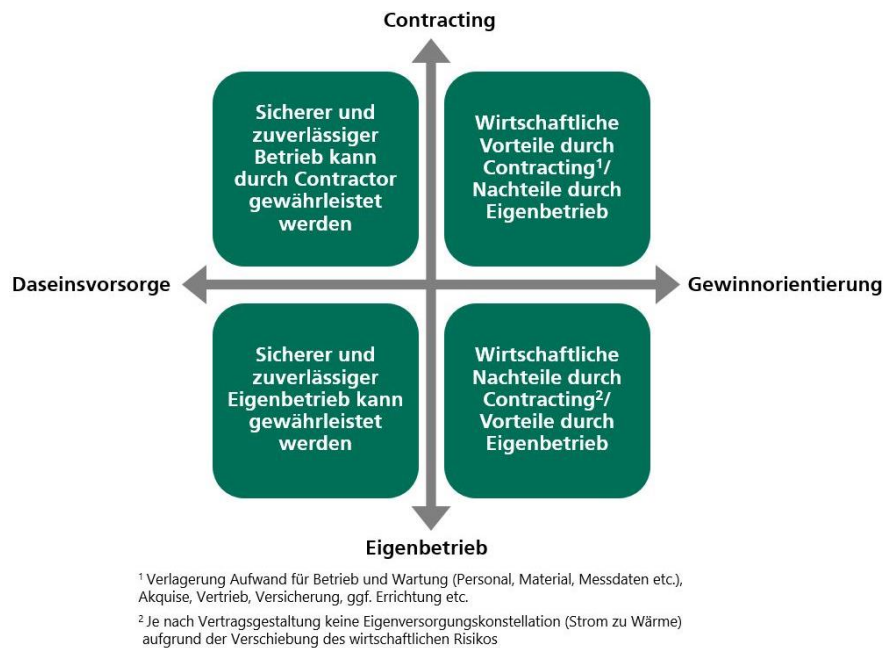


Abbildung 3 Beispiel Entscheidung Geschäftsmodell Contracting vs. Eigenbetrieb (eigene Darstellung)

3 Thermische Speicher für Quartiere

In diesem Abschnitt werden mögliche Speichertechnologien für Quartiere in Form einzelner Steckbriefe beschrieben. In den Steckbriefen sind folgende Informationen zu den einzelnen Speichertechnologien enthalten:

- Systembeschreibung
- Systemauslegung
- Anwendungsbereich
- Genehmigungsanforderungen
- Investitionskosten
- Fördermöglichkeiten
- Technische Anforderungen
- Best-Practice-Beispiel

Mithilfe der erstellten Steckbriefe werden technische Eigenschaften der betrachteten Speichertechnologien zusammengefasst und zur quantitativen Gegenüberstellung in Kapitel 4 aufbereitet.

3.1 Sensible Wärme- und Kältespeicherung (zentral)

3.1.1 Heißwasser-Wärmespeicher

■ Systembeschreibung

Für die Speicherung von Niedertemperaturwärme wird in der Regel Wasser als Speichermedium eingesetzt. Die Möglichkeiten einer Speicherung von Heißwasser reichen dabei von kleinen Speichern mit wenigen Kubikmetern bis hin zu Großwasserspeichern für die saisonale Wärmespeicherung in Wärmenetzen. Diese Art Wärmespeicher können ober- und unterirdisch aufgestellt werden, wobei bei der Langzeitwärmespeicherung die unterirdische Variante favorisiert wird (Moser et al., 2017). Die Überdeckung unterirdischer Speicher kann beispielsweise als landschaftsgestaltendes Element dienen. Heißwasser-Wärmespeicher können in der Regel große Gebäudekomplexe oder ganze Siedlungen versorgen.

Bei mit Nahwärmenetzen versorgten Quartieren können Heißwasser-Wärmespeicher ins Wärmenetz eingebunden werden. Dabei bietet sich der Einsatz großer Heißwasser-Wärmespeicher in Kombination mit einem Nahwärmenetz aufgrund des relativ hohen Platzbedarfs hauptsächlich als Energieversorgungslösung für ländliche oder urbane Gebiete mit großen Freiflächen an. Die Speichergröße der bisher realisierten vier Pilotanlagen in Kombination mit einem Nahwärmenetz (Hamburg, Friedrichshafen, München und Hannover) liegt zwischen rund 2.700 m³ und 12.000 m³. Hierbei decken die solaren Nahwärmenetze mit thermischen Speichern den Wärmebedarf von 100 bis 300 Wohneinheiten, was einer Wohnfläche von 8.000 m² bis 25.000 m² entspricht (Bauer et al., 2008) (Sauss, 2018).

Ein Heißwasser-Speicher kann entweder direkt oder indirekt über einen Wärmeübertrager be- und entladen werden. Dabei befindet sich das Wasser in einem isolierten Behälter, der je nach Anwendungsfall unterschiedliche Geometrien aufweisen kann.

Bei Temperaturen zwischen 30 °C und 95 °C (Heidemann et al., 2005) können die Speichersysteme als sogenannte Pufferspeicher zur hydraulischen Trennung zwischen Wärmeerzeuger und Wärmenetz oder als Saisonspeicher für beispielsweise solar unterstützte Nahwärmenetze dienen. Dieses Temperaturniveau thermischer Wärmespeicher ist für den Betrieb sowohl von Niedertemperatur-Nahwärmenetzen mit Neubauten (Netztemperatur unter 55 °C) als auch von Fernwärmenetzen (Netztemperatur über 80 °C) mit Bestandsgebäuden geeignet.

Zum Betrieb von Niedertemperatur-Nahwärmenetzen ist der Einsatz von Flächenheizungen (z. B. Fußbodenheizungen) in Gebäuden energetisch sinnvoll. Jedoch ist eine Nachheizung für die zentrale Bereitung des Trinkwarmwassers (TWW) bei Niedertemperatur-Nahwärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) aus hygienischen Gründen erforderlich, da bei großen Warmwasserspeichern (für Mehrfamilienhäuser) aus hygienischen Gründen eine TWW-Temperatur von mindestens 55 °C gewährleistet werden muss (Buderus, 2004).

Bei Heißwasser-Speichern besteht Forschungsbedarf hinsichtlich zu verbessernder Wärmedämm-Materialien, der Speicheranschlüsse zur optimalen Einhaltung der Temperaturschichtung und zu optimierender Be- und Entladestrategien bei der Sektorenkopplung (Stryi-Hipp et al., 2012).

■ Systemauslegung

Grober Richtwert des Speichervolumens je m² Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50 %:
8 – 10 m³/m²_{FK} (Mangold et al., 2007)

Zur Anlagendimensionierung sollte ein genaues Bedarfsprofil ermittelt werden. Hierfür sind detaillierte Simulationsrechnungen unerlässlich, die eine bedarfsgerechte Auslegung des Speichers ermöglichen.

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen) und Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden, bei sehr kleinen Volumen auch dezentrale bzw. gebäudeintegrierte Verwendung

Zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) möglich, bei Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C (Buderus, 2004) in dezentralen Speichern notwendig.

Bisherige Pilotprojekte: 100 – 300 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von 8.000 – 25.000 m², Speichergröße: 2.700 – 12.000 m³ (Bauer et al., 2008), (Sauss, 2018)

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen

Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Gegebenenfalls Beachtung von AwSV, UVPg, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

450 – 480 €/m³_{Wasseräquivalent} bei einem Speichervolumen von 480 – 600 m³_{Wasseräquivalent} (Mangold et al., 2007)

120 – 270 €/m³_{Wasseräquivalent} bei einem Speichervolumen von 2.700 – 12.000 m³_{Wasseräquivalent} (Mangold et al., 2007)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– Wohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

– Erneuerbare Energien – Standard (KfW 270)

[Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)

– IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung (KfW 201)

[IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)

– BAFA WN 4.0

– §§ 22 – 25 KWKG

– Landesebene

– [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 2 Technische Anforderungen an Heißwasser-Wärmespeicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	30 – 95 °C (Heidemann et al., 2005)
Spezifische Wärmekapazität	60 – 80 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001a)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Wasser / wärmegeädämter, wassergefüllter, ins Erdreich eingegrabener oder ebenerdiger Behälter mit Tragwerkskonstruktion meist aus

	Stahlbeton oder glasfaserverstärktem Kunststoff (Mangold et al., 2001b)
Anforderungen an den Standort	Gut stehender Boden, Bodenklasse II–III ¹ , möglichst kein Grundwasser in 5 bis 15 m Tiefe, bei ebenerdiger Anordnung keine Anforderungen an die Grundwassertiefe (Mangold et al., 2001b)
Zykluslebensdauer	>10.000 Zyklen / >20 Jahre (Jahnke, 2019), (Lassacher et al., 2018)
Recyclingfähigkeit	Hauptbaumaterialien wie Beton, Kunststoffrohr und Stahl sind recyclingfähig. Beim Abbau ist eine Grobsortierung der Materialien vor Ort sinnvoll. Im Anschluss erfolgt die endgültige Trennung und Aufbereitung der Materialien durch ein qualifiziertes Entsorgungsunternehmen (Schneider et al., 2011).
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Langzeit- und Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Jahr) (Seitz et al., 2018)

■ Best-Practice-Beispiel



Abbildung 4 Ackermannbogen in München (ZAE Bayern, Garching, 2021)

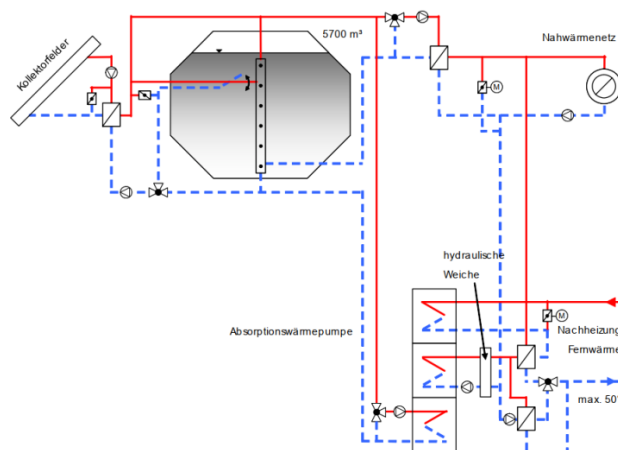


Abbildung 5 Schematische Darstellung des solaren Nahwärmesystems (Mangold et al., 2007)
(Abbildung von Solites)

¹ Bodenklasse I: Oberboden (oberste Bodenschicht), Bodenklasse II: Fließende Bodenarten, Bodenklasse III: Leicht lösbare Bodenarten (LBEG, 2020)

Tabelle 3 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Heißwasser-Wärmespeicher (Mangold et al., 2007)

Standort	Ackermannbogen in München
Wärmebedarf	2.300 MWh _{th} /a
Wärmeabnehmende	300 Wohnungen Wohnfläche: 24.800 m ² Energiesstandard: Neubau nach Energieeinsparverordnung (EnEV)
Wärmeversorgungskonzept	Nahwärmeversorgung mit einer Absorptionswärmepumpe in Kombination mit Solarkollektoren und einem bestehenden Fernwärmenetz (Kollektorfläche: 2.920 m ² / ca. 47 % Deckungsgrad)
Speichervolumen	5.700 m ³ (Behälterspeicher)
Installierte Leistung der Absorptionswärmepumpe	1,4 MW _{th}
Speicherdauer	Langzeitwärmespeicherung (Monate)

3.1.2 Kies-Wasser-Speicher

■ Systembeschreibung

Bei einem Kies-Wasser-Speicher dient ein Gemisch aus Kies und Wasser als Speichermedium. Kies-Wasser-Speicher werden bisher überwiegend als Langzeitwärmespeicher oder Zwischenspeicher für solare Nahwärmenetze bzw. Gebäudekomplexe eingesetzt.

Aufgrund der Grubenbauweise kann die Hülle des Speichers relativ einfach mittels Kunststoffolie oder Beton ausgeführt werden. Somit können oberhalb des Speichers beispielsweise Straßen oder Parkplätze errichtet werden.

Bisher realisierte Anlagen liegen in einer Größenordnung von 1.000 m³ bis 8.000 m³ (SAENA, 2012). Beispielsweise deckt das Nahwärmenetz in Steinfurt mit einem Kies-Wasser-Speicher (1.500 m³) den Wärmebedarf von 42 Wohneinheiten, was einer Wohnfläche von 3.800 m² entspricht (Bodmann und Fisch, 2002).

Die Be- und Entladung der Speicher erfolgt in der Regel entweder indirekt über in die Kiesfüllung eingelegte Kunststoff-Rohrschlangen oder unmittelbar über einen direkten Wasseraustausch (Mangold et al., 2001a). Dabei ist darauf zu achten, dass die Temperaturschichtung im Speicher unterstützt wird. Ein Kies-Wasser-Speicher kann über Wärmeübertrager bis zu einer Temperatur von 80 °C bis 90 °C beladen werden (Bauer et al., 2008). Damit können Kies-Wasser-Speicher in der Regel sowohl für Niedertemperatur-Nahwärmenetze mit Neubauten (Netztemperatur unter 55 °C) als auch für Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) mit Bestandsgebäuden betrieben werden.

Zum Betrieb von Niedertemperatur-Nahwärmenetzen ist der Einsatz von Fußbodenheizungen in Neubauten energetisch sinnvoll. Kies-Wasser-Speicher haben bei gleichen Ausmaßen eine geringere Speicherkapazität¹ im Vergleich zu einem reinen Wasserspeicher, weil Wasser eine höhere Wärmespeicherkapazität hat als Kies. Folglich ist – bedingt durch den Kiesanteil (ca. 60 bis 70 Vol.-%) – ein ca. 50 Prozent größeres Bauvolumen erforderlich, um die gleiche Wärmemenge bei einer gleichen Temperaturdifferenz zu speichern (Mangold et al., 2001a). Der Kies-Wasser-Speicher ist eine relativ neue Entwicklung und wurde in verschiedenen Pilotprojekten unter realen Betriebsbedingungen erfolgreich umgesetzt.

¹ Spezifische Wärmekapazität bei 20 °C – Kies: 0,71 kJ/(kg·K); Wasser: 4,18 kJ/(kg·K) (Al-Addous, 2006)

Bei Kies-Wasser-Speichern besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Bautechnik, der Baumaterialien sowie des Aufbaus der Wärmespeicher sowohl für Niedertemperatur-Nahwärmenetze mit Neubauten (Netztemperatur unter 55 °C) als auch für Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) mit Bestandsgebäuden (Strydom et al., 2012). Darüber hinaus sollten optimierte Be- und Entladestrategien unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung untersucht werden.

■ Systemauslegung

Grober Richtwert des Speichervolumens je m² Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50 %:
 $2,5 - 4 \text{ m}^3/\text{m}^2_{\text{FK}}$ (Mangold et al., 2001a)

Zur Anlagendimensionierung sollte ein genaues Bedarfsprofil ermittelt werden. Hierfür sind detaillierte Simulationsrechnungen unerlässlich, die eine bedarfsgerechte Auslegung des Speichers ermöglichen.

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen) und Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden

Zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) möglich, bei Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C in dezentralen Speichern notwendig (Buderus, 2004).

Bisherige Pilotprojekte: Speichergröße: 1.000 – 8.000 m³ / Beispielprojekt in Steinfurt, 42 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von 3.800 m², Speichergröße: 1.500 m³ (SAENA, 2012), (Bodmann und Fisch, 2002), (Mangold et al., 2001a)

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen

Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Gegebenenfalls Beachtung von AwSV, UVPG, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

250 – 400 €/m³ Wasseräquivalent bei einem Speichervolumen von 700 – 1.000 m³ Wasseräquivalent (Mangold, et al., 2007)

110 – 120 €/m³ Wasseräquivalent bei einem Speichervolumen von 5.000 – 6.000 m³ Wasseräquivalent (Mangold et al., 2007)

■ Fördermöglichkeiten

- Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

- **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

– [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)

[Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)

– [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)

[IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)

– [BAFA WN 4.0](#)

– [§§ 22 – 25 KWKG](#)

– Landesebene

– [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 4 Technische Anforderungen an Kies-Wasser-Speicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	<80 – 90 °C (Neupert et al., 2009)
Spezifische Wärmekapazität	30 – 50 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001a)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Kies-Wasser-Gemisch / wärmegeädämmtes, zum Erdreich hin mittels Kunststoffolie abgedichtetes Kies-Wasser-Gemisch (Mangold et al., 2001b)
Anforderungen an den Standort	Gut stehender Boden, Bodenklasse II – III, möglichst kein Grundwasser in 5 bis 15 m Tiefe (Mangold et al., 2001b)
Zykluslebensdauer	5.000 – 10.000 Zyklen / >20 Jahre (Jahnke, 2019) (Lassacher et al., 2018)
Recyclingfähigkeit	Hauptbaumaterialien wie Beton, Kunststoffrohr und Stahl sind recyclingfähig. Beim Abbau ist eine Grobsortierung der Materialien vor Ort sinnvoll. Im Anschluss erfolgt die endgültige Trennung und Aufbereitung der Materialien durch ein qualifiziertes Entsorgungsunternehmen

	(Schneider et al., 2011). / Recyclingprodukt, zum Beispiel Blähglasgranulat, einsetzbar für Wand- und Deckenbereich (Bodmann und Fisch, 2002)
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Langzeit- und Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Jahr) (Seitz et al., 2018)

■ Best-Practice-Beispiel

Abbildung 6
Schematische Darstellung des solaren Nahwärmesystems
(EnergieAgentur.NRW, 2008)
(Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW))

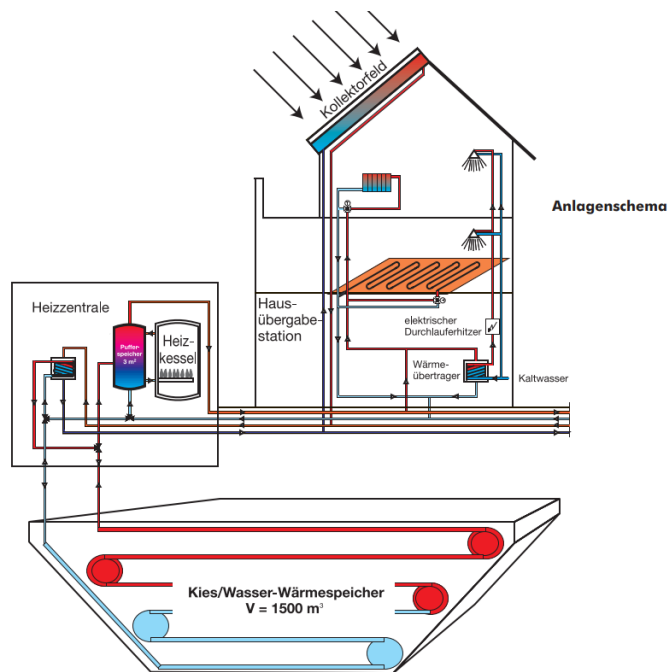


Tabelle 5 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Kies-Wasser-Speicher

Standort	Steinfurt-Borghorst
Wärmebedarf	110 MWhth/a (Mangold et al., 2001a)
Wärmeabnehmende	42 Wohneinheiten (11 RH1, 4 DH2, 7 kMFH3) (Mangold et al., 2001a) Wohnfläche: 3.800 m ² (Bodmann et al., 2001) Gebäude-Energiestandard: Niedrigenergiehaus (Bodmann et al., 2001)
Wärmeversorgungskonzept	Solarunterstützte Nahwärmeversorgung in Kombination mit einem Gasbrennwertkessel (Kollektorfläche: 510 m ² , ca. 34 % Deckungsgrad) (Mangold et al., 2001a)
Speichervolumen	1.500 m ³ (Mangold et al., 2001a)
Installierte Leistung des Gasbrennwertkessels	550 kWth (Spitzenlast) (EnergieAgentur.NRW, 2008)
Speicherdauer	Langzeitwärmespeicherung (Monate)

¹ Reihenhaushaus

² Doppelhaus

³ Kleines Mehrfamilienhaus (kMFH)

3.1.3 Aquiferspeicher

■ Systembeschreibung

Bei Aquiferspeichern werden wasserführende Gesteinsformationen (100 – 500 m_{Tiefe}) (Rundel et al., 2013) zur Wärmespeicherung genutzt, die möglichst nach oben und unten abgeschlossen sind. Das Wärmeträgermedium des Aquifers lässt sich beispielsweise mithilfe solarthermischer Anlagen erwärmen.

Aquiferspeicher sind bislang nur in wenigen Fällen realisiert worden. Beispielsweise wurden Aquiferspeicher mit einem Speichervolumen von bis zu 25.000 m³ für eine Siedlung mit 108 Wohneinheiten (ca. 7.000 m² Wohnfläche) verwirklicht.

Zudem ist der Einsatz von Aquiferspeichern aufgrund der hohen Wärmekapazität für die Langzeitspeicherung von industrieller Abwärme interessant (Rundel et al., 2013). Sie werden durch Bohrungen erschlossen, um mit der Abwärme von Industrieanlagen oder mit solarthermischer Wärme das Wasser im Erdreich aufzuheizen. Die eingespeicherte Wärme kann über einen Wärmeübertrager oder eine Wärmepumpe bei Bedarf wieder abgerufen werden. Die umgebenden Gesteinsschichten wirken dabei als Isolation. Bei der Be- und Entladung des Speichers befindet sich die Betriebstemperatur zwischen 5 °C und 95 °C (Lassacher et al., 2018). Jedoch kann es bei Temperaturen von über 50 °C je nach örtlicher Gegebenheit zu biologischen und geochemischen Veränderungen des Grundwassers (z.B. Störung des ökologischen Gleichgewichts durch eine Temperaturerhöhung \geq 5-10 Kelvin) kommen (Griebler et al., 2014). Aus diesem Grund spielen die hydrogeologischen und hydrochemischen Bedingungen am Standort eine entscheidende Rolle (Neupert et al., 2009).

Es sind Wärmenutzungsgrade von bis zu 80 % möglich (Rundel et al., 2013). Aquiferspeicher können sehr kostengünstig erschlossen werden, wenn die geologischen Anforderungen erfüllt sind. Jedoch führt die niedrige Speichertemperatur (unter 50 °C) vor allem bei der Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern zur Einschränkung der zentralen TWW-Bereitung, da bei großen Warmwasserspeichern (für Mehrfamilienhäuser) aus hygienischen Gründen eine TWW-Temperatur von mindestens 55 °C gewährleistet werden muss (Buderus, 2004). Diese Einschränkung bei der TWW-Bereitung kann durch zentrale oder dezentrale Nachheizung aufgehoben werden.

Zukünftig besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Speicherung industrieller Abwärme und des Stromüberschusses aus EE in Kombination mit einem Niedertemperatur-Nahwärmenetz (Netztemperatur unter 55 °C) oder einem bestehenden Fernwärmenetz (Netztemperatur über 80 °C) mit Bestandsgebäuden.

■ Systemauslegung

In der Richtlinie VDI 4640 Blatt 3 (VDI 4640 Blatt 3, 2001) werden Fragen der Materialauswahl, der Umweltauswirkungen, der erforderlichen Genehmigungen und der Systemeinbindung näher betrachtet.

Grober Richtwert des Speichervolumens je m² Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50 %: 4 – 6 m³/m²_{FK} (Mangold et al., 2001a)

Zur Anlagendimensionierung sollte ein genaues Bedarfsprofil ermittelt werden. Hierfür sind detaillierte Simulationsrechnungen unerlässlich, die eine bedarfsgerechte Auslegung des Speichers ermöglichen.

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen) und Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden, jedoch stark abhängig von hydrogeologischen und hydrochemischen Bedingungen am Standort

Zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) möglich, bei Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale

Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C (Buderus, 2004) in dezentralen Speichern notwendig.

Bisherige Pilotprojekte: Beispielprojekt in Rostock-Brinckmanshöhe, 108 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von 7.000 m², Speichergröße: 25.000 m³ (Rundel et al., 2013)

■ Genehmigungsanforderungen

Anzeigepflicht nach § 49 I WHG und § 8 GeolDG

Vorhaben Tiefe > 100m zusätzlich Anzeige nach § 127 BBergG

Wasserrechtliche Genehmigung erforderlich

Ggf. bergrechtliche Genehmigung erforderlich

Beachtung der GrwV

Gegebenenfalls Beachtung von StandAG, AwSV, UVPg, BImSchG, BImSchV, LImSchG und TA Luft

■ Investitionskosten

ca. 30 €/m³ Wasseräquivalent bei einem Speichervolumen von ca. 5.000 m³ Wasseräquivalent (Mangold et al., 2007)

Studie: 50 – 130 €/m³ Wasseräquivalent bei einem Speichervolumen von 22.000 – 35.000 m³ Wasseräquivalent (Mangold et al., 2007)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

– [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)

[Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)

- [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)
- [IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)
- [BAFA WN 4.0](#)
- [§§ 22 – 25 KWKG](#)
- Landesebene
 - [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 6 Technische Anforderungen an Aquiferspeicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	5 – 95 °C (Lassacher et al., 2018)
Spezifische Wärmekapazität	30 – 40 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001b)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Grundwasser / möglichst nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten (Mangold et al., 2001b)
Anforderungen an den Standort	Abgeschlossen nach oben und unten durch dichte Schicht, hohe Porosität, Grundwasser und hohe Durchlässigkeit notwendig (Mangold et al., 2001b)
Zykluslebensdauer	5.000 – 10.000 Zyklen / >20 Jahre (Jahnke, 2019) (Lassacher et al., 2018)
Recyclingfähigkeit	Hauptmaterial Sonde: Polypropylen, Polyethylen (Rosenkranz, 2020) → werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung möglich (UBA, 2020b) Wasser-Glykol-Gemisch: Recycling möglich (Glysofor, 2020)
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Langzeit- und Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Jahr) (Seitz et al., 2018)

■ Best-Practice-Beispiel



Abbildung 7 Aquiferspeicher in Rostock-Brinckmanshöhe (Schmidt und Müller-Steinhagen, 2004) (Abbildung von Solites)

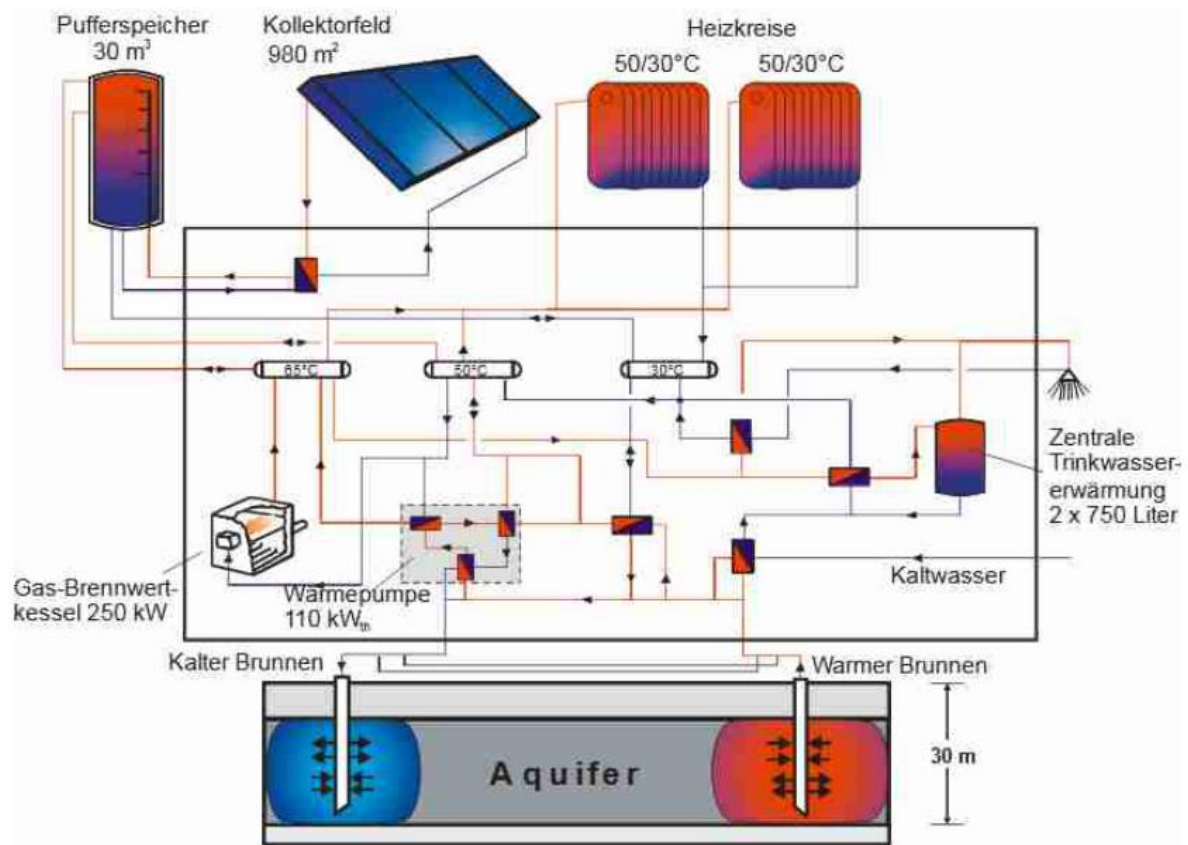


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Aquiferspeichersystems (Werschy et al., 2019) (Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW))

Tabelle 7 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Aquiferspeicher

Standort	Rostock-Brinckmanshöhe
Wärmebedarf	622 MWh _{th} /a (Müller et al., 2014)
Wärmeabnehmende	108 Wohneinheiten in MFH ¹ (Müller et al., 2014) Wohnfläche: 7.000 m ² (Müller et al., 2014) Gebäude-Energiestandard: Neubau
Wärmeversorgungskonzept	Nahwärmenetz mit Solarwärme gekoppelt an einen Erdgaskessel sowie eine Kompressionswärmepumpe (Aquiferspeicher als Wärmequelle) (Kollektorfläche: 980 m ² , ca. 47 % Deckungsgrad) (Müller et al., 2014)
Speichervolumen	20.000 m ³ (Müller et al., 2014)
Installierte Leistung der Kompressionswärmepumpe	110 kW _{th} (Müller et al., 2014)
Speicherdauer	Langzeitwärmespeicherung (Monate)

¹ Mehrfamilienhaus (MFH)

3.1.4 Erdwärmesondenspeicher

■ Systembeschreibung

Bei Erdwärmesondenspeichern oder Erdwärmekollektoren dient Erdreich bzw. Gestein als Speichermedium und die Erdwärmesonden (in der Regel Doppel-U-Rohre) dienen als Wärmeübertrager zum Be- und Entladen des Speichermediums. Sie finden häufig als Quartierspeicher bei großen solaren Wärmeversorgungen zur Gebäudeheizung und -kühlung Anwendung.

Die Speichergroße der bisher realisierten drei Pilotanlagen in Kombination mit einem Nahwärmenetz (Neckarsulm, Attenkirchen und Crailsheim) liegt zwischen rund 6.800 m^3 und 115.000 m^3 . Hierbei decken die solaren Nahwärmenetze mit thermischen Speichern den Wärmebedarf von 21 bis 250 Wohneinheiten, was einer Wohnfläche von 6.200 m^2 bis 40.000 m^2 entspricht (Müller et al., 2014), (Bauer et al., 2008), (Neupert et al., 2009).

Die Speichertemperatur liegt beim Be- und Entladen des Speichers zwischen 4°C und 35°C (Andresen et al., 2017). Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus, des geringen Bauaufwands und der einfachen Erweiterbarkeit ist die Speichertechnologie zum Betrieb von Wärmepumpen in Kombination mit einem Niedertemperatur-Nahwärmenetz geeignet. Hierfür sind insbesondere Neubauten mit guter Wärmedämmung und Fußbodenheizung praktikabel. Falls das Wärmenetz den Wärmebedarf für die TWW-Bereitung neben dem für die Raumheizung decken soll, ist eine Nachheizung zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55°C (Buderus, 2004) für Mehrfamilienhäuser notwendig. Der Wärmetransport eines Erdwärmesondenspeichers erfolgt durch Wärmeleitungen innerhalb des festen Gesteins. Beispielsweise wird in den Sommermonaten das durch Solarkollektoren erhitzte Wasser mittels Erdwärmesonden im Gestein im Untergrund gespeichert und bei Bedarf in den Wintermonaten wieder entzogen.

Typische Werte für Bohrloch-Durchmesser liegen bei 100 mm bis 200 mm, die Abstände zwischen zwei Bohrlöchern bei 1,50 m bis 3 m und die Bohrlochtiefe bei 20 m bis 100 m (Heidemann et al., 2005).

Die potenzielle Wärmeleistung des Erdwärmesondenspeichers ist in Abhängigkeit von den geologischen Randbedingungen sowie den verfügbaren Flächen begrenzt und Spitzenlasten müssen über einen Pufferspeicher, einen zusätzlichen Wärmeerzeuger oder thermische Regeneration des Erdreichs (z. B. mittels Solarabsorber) (Grimm et al., 2018) im Gesamtsystem ausgeglichen werden. Neben einer aktiven Wärmeeinspeicherung kann natürliche, geothermische Erdwärme als Wärmequelle für elektrische Wärmepumpen zur passiven sommerlichen Kühlung (Wärmeabgabe an den Erdspeicher erfolgt nur über einen Wärmeübertrager) und zur Heizung verwendet werden.

Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung zur Nutzung des Erdreichs unter dem Gebäude mit dem Ziel der Reduzierung der Erschließungskosten und in der Entwicklung von verlässlichen Erkundungs- und Beobachtungsmethoden zur nachhaltigen Untergrundnutzung (FVEE, 2020). Dabei ist die Einbindung thermischer Speicher für Niedertemperatur-Nahwärmenetze mit gut gedämmten Gebäuden aus energetischer Sicht sinnvoll.

■ Systemauslegung

In der Richtlinie VDI 4640 Blatt 3 (VDI 4640 Blatt 3, 2001) werden Fragen der Materialauswahl, den Umweltauswirkungen, den erforderlichen Genehmigungen und der Systemeinbindung näher betrachtet. Zur fachgerechten und nachhaltigen Dimensionierung eines Erdwärmekollektors ist die Durchführung eines Thermal Response Test (Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit) zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds erforderlich (Sanner et al., 2000).

Grober Richtwert des Speichervolumens je m^2 Kollektorfläche für einen solaren Deckungsanteil von 50 %:
 $8 - 10 \text{ m}^3 / \text{m}^2_{\text{FK}}$ (Mangold et al., 2001a)

Zur Anlagendimensionierung sollte ein genaues Bedarfsprofil ermittelt werden. Hierfür sind detaillierte Simulationsrechnungen unerlässlich, die eine bedarfsgerechte Auslegung des Speichers ermöglichen.

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen), im Einzelfall mit dezentraler Wärmepumpe auch für Einzelgebäudeversorgung

Bei TWW-Bereitung in Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55°C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55°C (Buderus, 2004) in dezentralen Speichern notwendig.

Bisherige Pilotprojekte: 21 – 250 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von $6.200 - 40.000 \text{ m}^2$ / Speichergröße: $6.800 - 115.000 \text{ m}^3$ (Müller et al., 2014), (Bauer et al., 2008), (Neupert et al., 2009), (Mangold et al., 2001a)

■ Genehmigungsanforderungen

Anzeigepflicht nach § 49 I WHG und § 8 GeolDG

Vorhaben Tiefe > 100m zusätzlich Anzeige nach § 127 BBergG

Wasserrechtliche Genehmigung erforderlich

Ggf. bergrechtliche Genehmigung erforderlich

Beachtung der GrwV

Gegebenenfalls Beachtung von StandAG, AwSV, UVPg, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

$50 - 100 \text{ €/m}^3_{\text{Wasseräquivalent}}$ bei einem Speichervolumen von $4.500 - 16.000 \text{ m}^3_{\text{Wasseräquivalent}}$ (Mangold et al., 2007)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– Wohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEGWG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEGWG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEGNWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

- [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)
 - [Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)
 - [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)
 - [IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)
 - [BAFA WN 4.0](#)
 - [§§ 22 – 25 KWKG](#)
- Landesebene
- [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 8 Technische Anforderungen an Erdwärmesondenspeicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	4 – 35 °C (Andresen et al., 2017)
Spezifische Wärmekapazität	15 – 30 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001b)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Erdreich bzw. Gestein / vertikale Doppel-U-Rohr-Sonden in wassergesättigtem Erdreich
Anforderungen an den Standort	Bodenklasse I–III, Grundwasser günstig, Bohrung von 30 bis 100 m _{Tiefe} (Mangold et al., 2001b)
Zykluslebensdauer	5.000 – 10.000 Zyklen / >20 Jahre (Jahnke, 2019), (Lassacher et al., 2018)
Recyclingfähigkeit	Hauptmaterial Sonde: Polypropylen, Polyethylen (Rosenkranz, 2020) → werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung möglich (Rosenkranz, 2020) Wasser-Glykol-Gemisch: Recycling möglich (Glysofor, 2020)
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Langzeit- und Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Jahr) (Seitz et al., 2018)

■ Best-Practice-Beispiel



Abbildung 9 Solarsiedlung in Neckarsulm (Solites, 2021b)

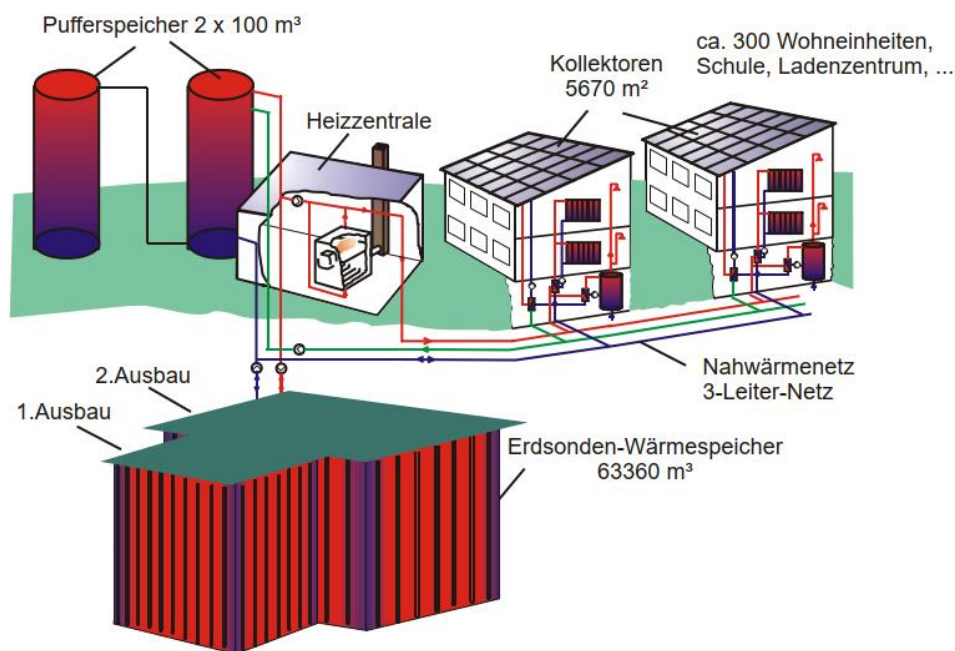


Abbildung 10 Schematische Darstellung des solaren Nahwärmenetzes in Kombination mit einem Erdwärmesondenspeicher in Neckarsulm (Nußbicker et al., 2004) (Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW))

Tabelle 9 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Erdwärmesondenspeicher

Standort	Neckarsulm
Wärmebedarf	2.647 MWh _{th} /a (2006) (Bauer et al., 2008)
Wärmeabnehmende	300 Wohneinheiten und eine Schule mit einer Turnhalle (Bauer et al., 2008) Wohnfläche: 20.000 m ² (Mangold et al., 2001a) Gebäude-Energiestandard: Neubau nach WSchVO (1998)

Wärmeversorgungskonzept	Nahwärmeversorgung mit einer Wärmepumpe und einem Gaskessel in Kombination mit Solarkollektoren (Kollektorfläche: 5.670 m ² / ca. 50 % Deckungsgrad) (Bauer et al., 2008)
Speichervolumen	115.000 m ³ (EWK ¹ , Endausbau), 200 m ³ (Pufferspeicher – SLK ²) (Neupert et al., 2009)
Installierte Leistung der Wärmepumpe	512 kW _{th} (Bauer et al., 2008)
Speicherdauer	Langzeitwärmespeicherung (Monate)

3.1.5 Wasserspeicher für Power-to-Heat-Anlage (Elektrodenheizkessel)

■ Systembeschreibung

PtH-Anlagen (Power-to-Heat) basieren auf dem Prinzip der unmittelbaren Umwandlung elektrischer Wirkleistung in Wärme. Die Grundlagen bilden zwei unterschiedliche Varianten:

- Widerstands-Heißwasserkessel (Tauchsieder-Prinzip): Der Heizleiter wird als leitfähiges Material genutzt, um das Wasser mittels des elektrischen Widerstands des Stroms zu erhitzen und Wärme an den Kessel abzugeben.
- Elektroden-Heißwasserkessel: Wärme wird mittels Elektroden ins Wasser eingebracht und ohne Widerstandselemente an den Kessel abgegeben.

Elektrodenheizkessel werden bereits als etablierte Technologie in Fernwärmenetzen und zur Prozessdampferzeugung verwendet, wobei die Bereitstellung negativer Regelleistung im Vordergrund steht (Agora Energiewende, 2014).

In der Regel kommen PtH-Anlagen als großflächige Anwendungen zum Einsatz und können mit KWK-Anlagen und Fernwärmenetzen mit verschiedenen Übergabetechnologien (Neubau und Bestandsgebäude) (Netztemperatur 130 °C) gekoppelt werden (Bücken et al., 2017). Ihre Leistungsklassen reichen von 550 kW_{th} (SW Forst) bis 100 MW_{th} (EnBW) (Kühne, 2015).

Ein Wasserspeicher in Kombination mit einer PtH-Anlage kann die Wirtschaftlichkeit erhöhen und zum Beispiel bei einem unvorhersehbaren Regelleistungsbedarf eine hohe Flexibilität der Stromversorgung ermöglichen (Agora Energiewende, 2014). Darüber hinaus kann die Spitzenleistung von fossilen Kraftwerken beispielsweise durch den Einsatz von PtH-Anlagen in Fernwärmenetzen ersetzt werden. Dies bietet Potenzial zur Integration von EE sowie zur damit einhergehenden Dekarbonisierung, vor allem in bestehenden Fernwärmenetzen mit Bestandsgebäuden.

Forschungsbedarf besteht hinsichtlich einer kombinierten Betrachtung von PtH-Anlagen mit Fernwärmenetzen und deren Rückwirkung auf die Regelung der Spannung von Übertragungsnetzen.

■ Systemauslegung

Elektrodenheizkessel sind für einen Spannungsanschluss zwischen 5 kV und 20 kV ausgelegt (Bechem et al., 2015).

Ab 5 MW_{th} Leistung im Bereich Sekundär- und Minutenreserve möglich (Biedermann und Kolb, 2014)

Die detaillierte Auslegung eines Elektrodenheizkessels erfolgt in Anlehnung an Herstellerangaben.

¹ Erdwärmekollektor

² Spitzenlastkessel

■ Anwendungsbereich

Fernwärmenetze mit verschiedenen Übergabetechnologien (Neubau und Bestandsgebäude)

Zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) mit unterschiedlichen Übergabetechnologien möglich

Bisherige Pilotprojekte: Leistungsklasse zwischen 550 kW_{th} und 100 MW_{th} (Kühne, 2015) / Beispielsweise versorgt die an ein Fernwärmenetz gekoppelte PtH-Anlage in Hamburg mit einer Leistung von 45 MW_{th} (20 m³) ca. 13.500 Wohnungen (Schmid, 2020a).

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen

Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Gegebenenfalls Beachtung von AwSV, UVP, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

100 €/kW_{el} für einen Kessel mit 10 MW_{th} (Bechem et al., 2015)

50 €/kW_{el} für einen Kessel mit 40 MW_{th} (Bechem et al., 2015)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

- [Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)
- [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)
- [Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)
- [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)
- [IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)
- [BAFA WN 4.0](#)
- [§§ 22 – 25 KWKG](#)
- Landesebene
 - [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 10 Technische Anforderungen an Pth-Anlagen

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	<130 °C (Drücke zwischen 30 und 50 bar) (Kühne, 2015)
Spezifische Wärmekapazität	60 – 80 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001a)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Mit Wasser gefüllter Behälter, in dem mindestens eine mit einem öffentlichen Stromnetz verbundene Elektrode angeordnet ist
Anforderungen an den Standort	Gut stehender Boden, Stromanschluss auf Mittelspannung erforderlich (Bereitstellung negativer Regelleistung)
Zykluslebensdauer	30 Jahre (Estermann et al., 2017)
Recyclingfähigkeit	Hauptbaumaterial Stahl: Recycling möglich / Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Recycling möglich; Polyurethan, Polystyrol u. a.: Recycling theoretisch möglich (Schneider et al., 2011)
Reaktionszeit	<30 Sekunden (Vattenfall, 2020a)
Speicherdauer	Minuten – Wochen (BVES, 2018)

■ Best-Practice-Beispiel

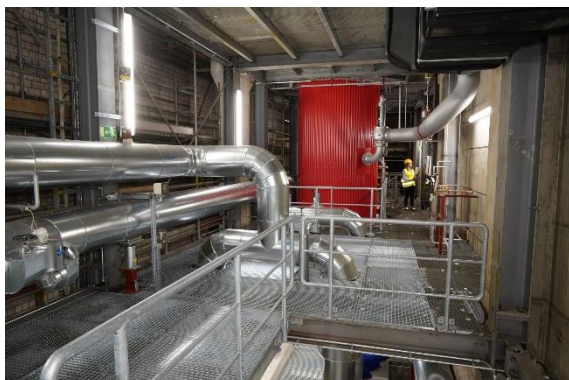
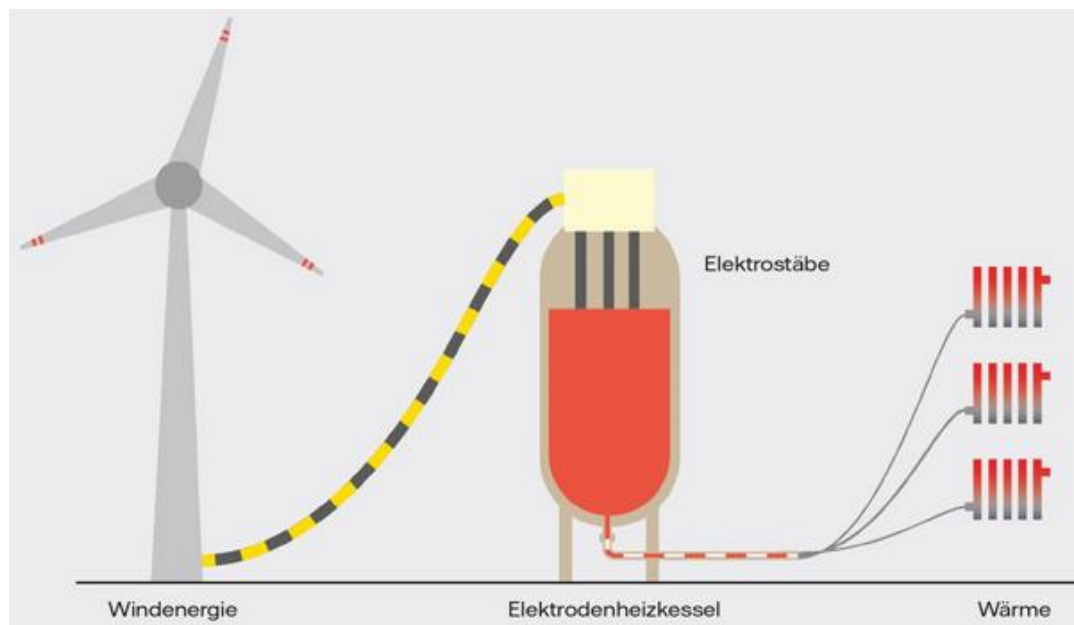


Abbildung 11 Elektrodenheizkessel Karoline in Hamburg (Wärme Hamburg GmbH, 2021)



(Bild von SaltX Technology)

Abbildung 12 Vereinfachte Darstellung des Betriebs eines Elektrodenheizkessels für die PtH-Anwendung (Vattenfall, 2020b) (Abbildung von SaltX Technology)

Tabelle 11 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Power-to-Heat-Anlagen

Standort	Hamburg
Wärmebedarf	100 MWh _{th} (2015) (Jersch, 2016)
Wärmeabnehmende	Ca. 13.500 Wohnungen (Schmid, 2020a)
Wärmeversorgungskonzept	Nutzung der Windenergie aus Schleswig-Holstein / Deckung der Spitzenlast eines bestehenden Fernwärmenetzes in Hamburg
Speichervolumen	20 m ³ (Schmid, 2020a)
Installierte Leistung	45 MW _{th} (Schmid, 2020a)
Reaktionszeit	< 30 Sekunden (Vattenfall, 2020b)
Speicherdauer	Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Tage)

3.2 Sensible Wärme- und Kältespeicherung (dezentral und gebäudeintegriert)

3.2.1 Gebäudeintegrierte Wasserspeicher für kalte Nahwärmenetze

■ Systembeschreibung

Ein kaltes Nahwärmenetz verfügt über mehrere dezentrale Wärmepumpen mit gebäudeintegrierten Speichern. Wärme wird in diesem Fall aus einer oder mehreren Wärmequellen (z. B. Abwärme, Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren) gewonnen und dann durch ein Wärmenetz an die umliegenden Gebäude verteilt. Dabei liegt die Netztemperatur unter 30 °C (Pehnt et al., 2017).

Geeignet ist diese Technik für gut gedämmte Gebäude mit niedrigem Heizwärmebedarf bzw. Neubaugebiete. Zum Betrieb von kalten Wärmenetzen ist der Einsatz von Fußbodenheizungen in Gebäuden energetisch sinnvoll.

Der Vorteil einer technischen Quellenanbindung über ein gesondertes kaltes Wärmenetz liegt vor allem in der Möglichkeit, verschiedene Umweltquellen zentral in das Netz einbinden zu können. Somit profitiert der Betrieb der dezentralen Wärmepumpen durch die nicht ortsgebundene Einbindung von Umweltenergie.

Beim Einsatz von dezentralen Wärmepumpen können thermische Speicher für die Raumheizung und TWW-Bereitung zur Optimierung des lokalen PV-Eigenstromverbrauchs beitragen. Anhand des stromgeführten Wärmepumpenbetriebs kann Überschussstrom aus PV-Anlagen mithilfe dezentraler Wärmepumpen in Form von Wärme gespeichert und zeitversetzt abgerufen werden. Dies erhöht gleichzeitig den EE-Anteil bei der Wärmebereitstellung. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Entwicklung neuer Betriebsstrategien von Wärmepumpen, die einen stromgeführten Wärmepumpenbetrieb ermöglichen. Darüber hinaus sollten der Einsatz von verbesserten Wärmedämmmaterialien und die Integration von Phasenwechselmaterialien (englisch: Phase Change Materials, PCM) weiter untersucht werden. Dieses Wärmeversorgungskonzept kann vor allem für Niedertemperatur-Nahwärmenetze mit Neubauten eingesetzt werden.

■ Systemauslegung

Grober Richtwert des Speichervolumens von Wärmepumpen (Raumheizung): 60 – 80 l/kW_{th} (VIESSMANN, 2012c)

Die Auslegung des TWW-Speichers erfolgt in Anlehnung an DIN 4708 (DIN 4708, 1994).

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen)

Bei kalten Wärmenetzen (Netztemperatur unter 30 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C (Buderus, 2004) in dezentralen Speichern notwendig.

Bisherige Pilotprojekte: ein kaltes Nahwärmenetz in Wüstenrot mit 25 Wohngebäuden (KfW-55-Standard) (Pietruschka, 2016a) / Speichergröße: 0,2 – 0,4 m³ dezentrale Warmwasserspeicher für Einfamilienhäuser (eigene Abschätzung)

■ Genehmigungsanforderungen

Keine spezielle Genehmigung erforderlich

■ Investitionskosten

Ca. 1.000 – 1.700 € bei einem Speichervolumen von 400 – 1.000 l (Fox, 2020)

Ca. 1.700 – 2.600 € bei einem Speichervolumen von 1.000 – 2.000 l (Fox, 2020)

■ Fördermöglichkeiten

- Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

- **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEGEM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

- [BAFA WN 4.0](#)
- [§§ 22 – 25 KWKG](#)
- Landesebene
 - Häufig in Kombination mit Erzeugungsanlagen
 - [HB](#), [Hessen \(Erzeugungsanlage und Gebäudemodernisierung\)](#), [Saarland](#), [NRW](#)

Tabelle 12 Technische Anforderungen an gebäudeintegrierte Wasserspeicher in kalten Nahwärmenetzen

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	<60 °C (VIESSMANN, 2012c)
Spezifische Wärmekapazität	60 – 80 kWh _{th} /m ³ (Mangold et al., 2001a)
Wirkungsgrad	45 – 75 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Wasser / wassergefüllter Behälter mit einer Wärmedämmung und einem innen liegenden oder externen Wärmeübertrager
Anforderungen an den Standort	Gut stehender Boden, Mindestabstand zur Wand >200 mm (Wolf, 2017)
Zykluslebensdauer	20 Jahre (VDI 2067 Blatt 1, 2012)
Recyclingfähigkeit	Hauptbaumaterial Stahl: Recycling möglich / Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Recycling möglich; Polyurethan, Polystyrol u. a.: Recycling theoretisch möglich (Schneider et al., 2011)
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Stunden – Tage

■ Best-Practice-Beispiel



Abbildung 13 Foto Gemeinde Wüstenrot II (Pietruschka, 2016a)

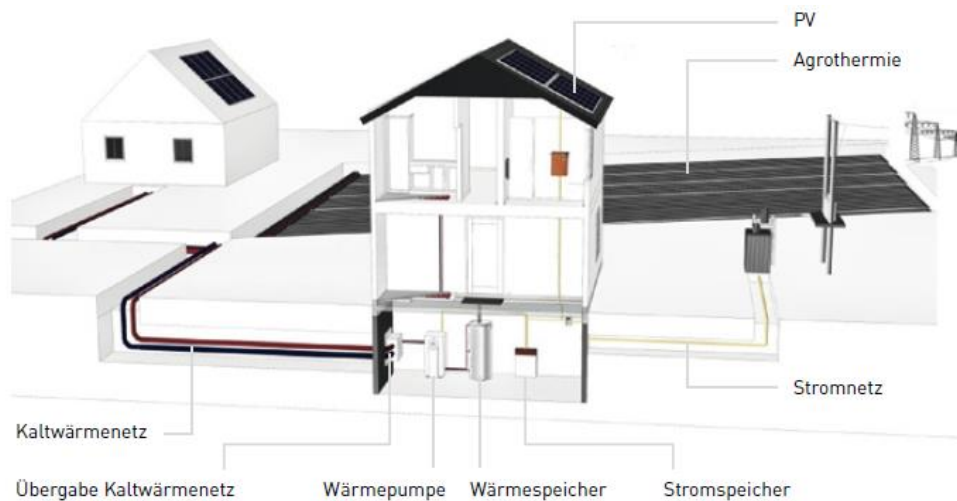


Abbildung 14 Energiekonzept der Gebäude in der Plusenergiesiedlung (Pietruschka 2016b) (Abbildung von Brennenstuhl)

Tabelle 13 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für gebäudeintegrierte Wasserspeicher in kalten Nahwärmenetzen

Standort	Wüstenrot
Wärmebedarf	250 MWh _{th} /a (Pietruschka, 2016a)
Wärmeabnehmende	25 Wohngebäude (Pietruschka, 2016a) Gebäude-Energiestandard: KfW-55-Standard (Pietruschka, 2016a)
Wärmeversorgungskonzept	Wärmeversorgung durch ein kaltes Nahwärmenetz in Kombination mit dezentralen Wärmepumpen und Wärmespeichern (Stromversorgung mit PV-Anlagen / 6 Gebäude mit Stromspeicher für Lastmanagement) (Pietruschka, 2016a)
Speichervolumen	0,2 – 0,4 m ³ Einfamilienhaus (EFH) (eigene Abschätzung)
Installierte Leistung der Wärmepumpe	6 – 8 kW _{th} (Pietruschka, 2016b)
Speicherdauer	Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Tage)

3.3 Latentwärme- und Kältespeicher

3.3.1 Eisspeicher

■ Systembeschreibung

Eisspeicher dienen sowohl als Wärmequelle wie auch als saisonale Wärmespeicher. Sowohl für Ein- und Zweifamilienhäuser als auch für größere Gebäude oder als Einbindung ins kalte Nahwärmenetz sind technische Lösungen verfügbar (Wersch et al., 2019).

Geeignet ist die Technik für gut gedämmte Gebäude mit Fußbodenheizungen in Neubaugebieten. Dabei erfolgt die TWW-Bereitung dezentral mit einer Nachheizung. Eisspeicher können als Wärme- und Kältespeicher eingesetzt werden. Große Eisspeicher können nur unterirdisch realisiert werden, wobei ihr Platzbedarf aufgrund der hohen Wärmespeicherkapazität geringer ist als der von sensiblen Wärmespeichern.

Häufig werden Eisspeicher in Verbindung mit einer elektrisch angetriebenen Sole-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit thermischen Solaranlagen eingesetzt. Dabei entzieht die Wärmepumpe dem Eisspeicher die benötigte Wärme zur Raumheizung und TWW-Bereitung in den Wintermonaten, wodurch das Wasser zu Eis gefriert. Zusätzliche Energie wird durch den Phasenwechsel in Form von Kristallisationsenergie für den Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. Dabei bietet der Phasenwechsel des Speichermediums zusätzliche Speicherkapazität.

Bei der Be- und Entladung des Speichers variiert die Speichertemperatur zwischen -7°C und 25°C (VIESSMANN, 2012b). Zur Regeneration des Eisspeichers wird thermische Energie über thermische Solaranlagen und über das umgebende Erdreich zugeführt. Dabei erhöht die Nutzung der Solarwärme in einem Eisspeicher für die spätere Nutzung im Quartier den EE-Anteil in der Wärmeversorgung.

Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung von Lastverschiebungspotenzialen beim Einsatz von Eisspeichern für Neubausiedlungen im Kontext der Sektorenkopplung.

■ Systemauslegung

Eisspeicher sind vollständig in das Erdreich eingelassen und mit Wasser befüllt. Das erforderliche Wasservolumen wird aus der Heizlast und der Kühlleistung berechnet. Beispielsweise ist für eine Heizleistung von 10 kW_{th} ein Wasservolumen von ca. 10 m^3 erforderlich (VIESSMANN, 2012a).

Aufgrund der hohen Systemkomplexität (Wärmepumpe, Solarkollektor und Eisspeicher) kann Simulationssoftware, zum Beispiel TRNSYS (Solar Energy Laboratory – University of Wisconsin, 2005) oder Polysun (Vela Solaris AG, 2018), den Planungsprozess von großen Gebäuden oder Wärmenetzen unterstützen.

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz oder kaltes Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen), auch Nutzung für gebäudeintegrierte Systemlösungen möglich

Bei TWW-Bereitung in Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55°C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55°C (Buderus, 2004) in dezentralen Speichern erforderlich.

Bisherige Pilotprojekte: eine Neubausiedlung in Köln-Porz mit einer Wohnfläche von ca. 7.600 m^2 (vier Mehrfamilienhäuser), Speichergröße: ca. 1.200 m^3 (Mnich, 2013).

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen
Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Ggf. Beachtung von AwSV, UVPg, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

Grober Richtwert für die Speichergröße von 100 m³:

- Sole-Wasser-Wärmepumpe: 300 – 2.000 €/kW_{th},
- Eisspeicher: 555 €/m³,
- Solarabsorber: 250 €/m² (Bockelmann et al., 2018)

Ca. 45 – 50 €/kW_{th} (inklusive Peripherie: Platten-Wärmeübertrager, Regelung etc.) (Tech und Josfeld, 2008)

■ Fördermöglichkeiten

- Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

- **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

- [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)
- [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)
- [IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)
- [BAFA WN 4.0](#)
- [§§ 22 – 25 KWKG](#)

- Landesebene
 - [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 14 Technische Anforderungen an Eisspeicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	-7 – 25 °C (VIESSMANN, 2012b)
Spezifische Wärmekapazität	50 – 150 kWh _{th} /m ³ (Werschy et al., 2019)
Wirkungsgrad	80 % (Tech und Josfeld, 2008)
Speichermedium und -aufbau	Wasser / zylinder- wie auch quaderförmiger Betonbehälter mit einem integrierten Wärmeübertrager
Anforderungen an den Standort	Wärmeentzug, zum Beispiel infolge angrenzender Gebäude, durch ausreichenden Abstand vermeiden (ca. 2 m), Überlauf eines Eisspeichers muss mindestens 1 m tief liegen oder sich unterhalb der Frostschutzgrenze befinden (VIESSMANN, 2016)
Zykluslebensdauer	50 Jahre (Schroeteler et al., 2020)
Recyclingfähigkeit	Hauptbaumaterialien wie Beton, Kunststoffrohr und Stahl sind recyclingfähig. Beim Abbau ist eine Grobsortierung der Materialien vor Ort sinnvoll. / Recyclingprodukt, zum Beispiel Blähglasgranulat, einsetzbar für Wand- und Deckenbereich (Bodmann und Fisch, 2002)
Reaktionszeit	Minuten (Lassacher et al., 2018)
Speicherdauer	Stunden – Monate

■ Best-Practice-Beispiel



Abbildung 15 Klimaschutzsiedlung Urbacher Weg, Köln-Porz (Mnich, 2013)

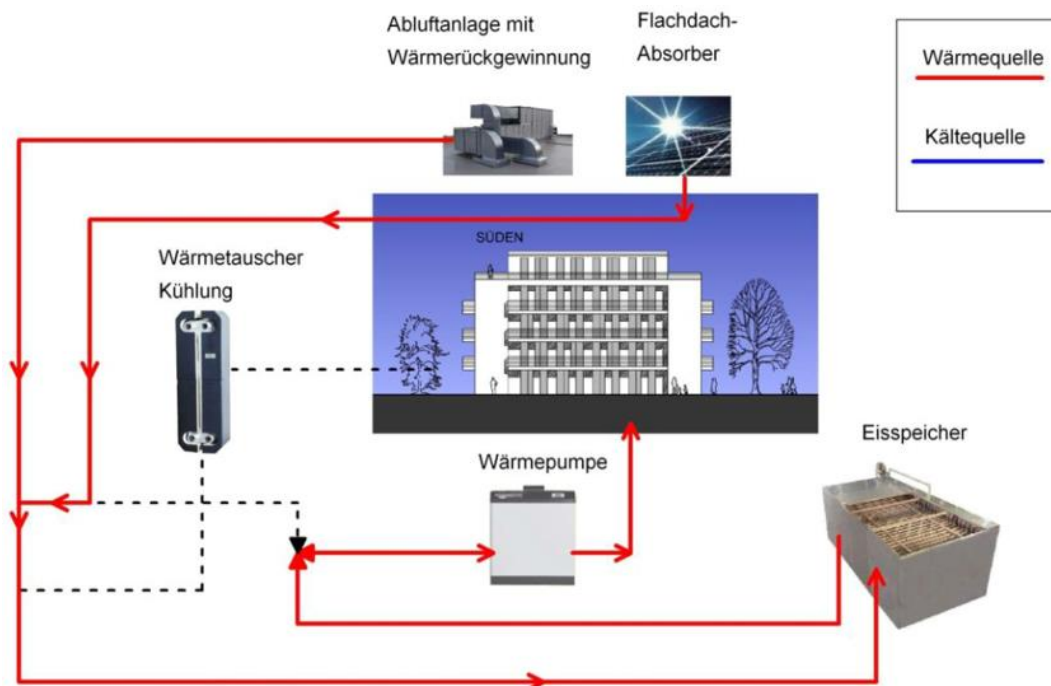


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Wärmeversorgungskonzepts mit einem Eisspeicher (Mnich, 2013)

Tabelle 15 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Eisspeicher

Standort	Köln-Porz
Wärmebedarf	ca. 200 MWh _{th} /a (Mnich, 2013)
Wärmeabnehmende	4 MFH (112 Wohnungen) (Mnich, 2013) Wohnfläche: 7.560 m ² (Mnich, 2013) Gebäude-Energiestandard: 26 kWh _{th} /m ² (Mnich, 2013)
Wärmeversorgungskonzept	Heizung und Kühlung mit Wärmepumpen in Kombination mit einem zentralen Eisspeicher und Solarabsorbern
Speichervolumen	1.197 m ³ (Mnich, 2013)
Installierte Leistung der Absorptionswärmepumpe	4 Wärmepumpen / je 66 kW _{th} (Mnich, 2013)
Speicherdauer	Langzeitwärmespeicherung (Monate)

3.3.2 Phasenwechselmaterialien-Speicher (PCM-Speicher)

■ Systembeschreibung

Phasenwechselmaterialien (englisch: Phase Change Materials, PCM) speichern Wärme im Phasenwechsel des Speichermediums. Im kleinen Maßstab werden PCM-Speicher bereits in vielen Anwendungen eingesetzt und sind kommerziell verfügbar. Für die großtechnische Anwendung ist diese Technologie noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Eine praxisnahe Erprobung wurde für die Kühlung eines Bürogebäudeareals (vier Bürogebäude mit einer Gesamtnettogeschossfläche von ca. 43.900 m²) durchgeführt (Klein et al., 2017).

Ein wesentlicher Vorteil von PCM-Speichern gegenüber Wasserspeichern besteht in der hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität im Temperaturbereich des Phasenwechsels. Gängige PCM-Materialien haben jedoch außerhalb des Phasenwechselbereichs eine geringere Wärmekapazität im Vergleich zu Wasser. Die Materialien decken eine weite Temperaturspanne von ca. -50 °C bis über 600 °C ab, wobei das Hauptanwendungsgebiet heute bei Temperaturen zwischen 0 °C und 100 °C liegt (Andresen et al., 2017). Hier werden primär Salzhydrate und Paraffine eingesetzt.

Die Hauptanwendungen sind passive Gebäudekühlung, Kältespeicher, Pufferspeicher in Heizsystemen und Warmwasserbereitung. Auf Quartiersebene ist die Erhöhung der Speicherdichten eines saisonalen Wärmespeichers mit solarthermischen Anlagen durch die Nutzung von PCM möglich und langfristig denkbar. Zwar gab es in diesem Bereich in den vergangenen Jahren mehrere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, aber dabei konnte bisher noch kein marktfähiges Produkt bereitgestellt werden (Stryi-Hipp et al., 2012). Hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Wasser- und PCM-Speichern erweisen sich Kälteanwendungen aufgrund der relativ geringen Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur als vorteilhaft (Klein et al., 2017). Forschungsbedarf besteht dahingehend, optimierte Anwendungen von bestehenden Stoffpaaren zu finden. Zudem sollte die Be- und Entladung möglichst über eine hohe Zyklenzahl und eine lange Lebensdauer hinweg zuverlässig gestaltet werden (Stryi-Hipp et al., 2012).

■ Systemauslegung

Den Schwerpunkt der Richtlinie VDI 2164 (VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2016) bilden Planungsgrundlagen und die Leistungsbestimmung von PCM-Speichersystemen (passive Flächenheiz- und -kühlsysteme, aktive Flächenheiz- und -kühlsysteme, dezentrale Lüftungssysteme für den Kühlbetrieb, zentrale Lüftungssysteme für den Heiz- und Kühlbetrieb und Energiespeicher (Medium Wasser)).

■ Anwendungsbereich

Passive Gebäudekühlung, Kältespeicher, Pufferspeicher in Heizsystemen und Warmwasserbereitung in Gebäuden, Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen) und Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden in Abhängigkeit vom Speichermedium (Phasenwechseltemperatur)

In Abhängigkeit vom Speichermedium (Phasenwechseltemperatur) ist eine zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) möglich, bei Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C in dezentralen Speichern erforderlich (Buderus, 2004).

Bisherige Pilotprojekte: Kälteversorgung für ein Bürogebäudeareal in Stuttgart (vier Bürogebäude mit einer Geschossfläche von 43.882 m^2), Speichergröße: 16 m^3 (PCM-Speicher) (Klein et al., 2017)

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen

Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Gegebenenfalls Beachtung von AwSV, UVPG, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

200 – 400 €/kW_{th} (Niedertemperatur-Latentwärmespeicher) (BVES, 2016)

20 – 100 €/kWh_{th} (Niedertemperatur-Latentwärmespeicher) (BVES, 2016), (Lassacher et al., 2018)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

– [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)

[Erneuerbare Energien – Premium \(KfW 271, 281\)](#)

– [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)

[IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)

– [BAFA WN 4.0](#)

– [§§ 22 – 25 KWKG](#)

– Landesebene

– [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 16 Technische Anforderungen an PCM-Speicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	0 – 100 °C (Salzhydrate und Paraffine) (Andresen et al., 2017)
Spezifische Wärmekapazität	49 – 97 Wh/kg (Jahnke, 2019), 80 – 110 kWh _{th} /m ³ (BVES, 2016)
Wirkungsgrad	80 – 98 %, je nach Betriebsbedingungen (BVES, 2016) / 96 % (Kühlung, 21 °C Umgebung) (Hauer et al., 2013) / 75 – 90 %
Speichermedium und -aufbau	Paraffine, Fettsäuren, Polymere, Salze, Salzhydrate u. a. / Integration von PCM in Bauteile von Gebäuden und in Wasserspeicher möglich
Anforderungen an den Standort	Einhaltung der vorgegebenen Systemtemperatur bei der Planung und möglichst geringe Temperaturspreizung im System erforderlich
Zykluslebensdauer	3.500 – 10.000 (BVES, 2016)
Recyclingfähigkeit	In Abhängigkeit vom Speichermedium unterschiedlich, zum Beispiel verfügen Paraffine über eine gute Umweltverträglichkeit (Cervenka, 2008)
Reaktionszeit	Minuten (BVES, 2016)
Speicherdauer	Stunden – Wochen (BVES, 2016)

■ Best-Practice-Beispiel



(Foto von DEKRA SE)



Abbildung 17 Vorderansicht Gebäude (links) und Übersichtsplan DEKRA-Campus (rechts) (Klein et al., 2017)

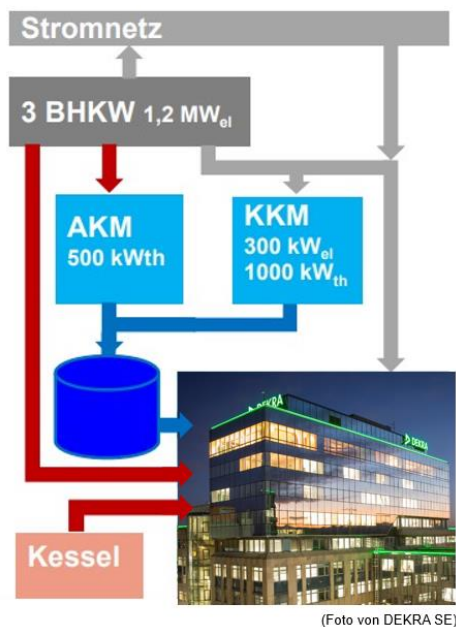


Abbildung 18 Schematische Darstellung der Kälteversorgung mit einem PCM-Speicher (Gschwander, 2014)

Tabelle 17 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für PCM-Speicher

Standort	Stuttgart
Kälteverbrauch	218 MWh _{th} (Dezember 2013) (Klein et al., 2017)
Wärmeabnehmende	4 Bürogebäude Gesamtnettogeschossfläche: 43.882 m ² (ohne Tiefgarage) (Klein et al., 2017)
Wärmeversorgungskonzept	Wärme-/Kälteerzeugung mit BHKW in Kombination mit Absorptions- und Kompressionskältemaschine
Speichervolumen	ca. 16 m ³ (PCM) (Klein et al., 2017)
Installierte Leistung	Gas-BHKW: 420 kW _{el} , Gaskessel: 1.000 kW _{th} , Kompressionskältemaschine: 1.050 kW _{th} , Absorptionskältemaschine: 500 kW _{th} (Klein et al., 2017)
Speicherdauer	Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden – Tage)

3.4 Thermochemische Wärme- und Kältespeicher

■ Systembeschreibung

Die thermochemische Wärmespeicherung erfolgt durch chemisch reversible Reaktionen oder den Sorptionsprozess (Ab- und Adsorptionsprozess) und zeichnet sich besonders durch eine hohe Energiedichte aus. Aus diesem Grund können thermochemische Speicher für den Ausgleich der Wärmelast in Fernwärmenetzen verwendet werden. Beispielsweise speist eine SaltX-Pilotanlage, durch die sich der Überschussstrom durch einen chemischen Prozess als Wärme speichert, die zwischengespeicherte Energie in ein Fernwärmenetz in Berlin ein und deckt den Wärmebedarf von bis zu 30.000 Haushalten (Vattenfall, 2020c).

Grundsätzlich lassen sich thermochemische Speicher in zwei Gruppen einteilen:

- Sorptionsspeicher und
- Speicher mit reversiblen chemischen Bindungen.

Bei der Beladung des Speichers wird Wärme zugeführt, um chemische und/oder physikalische Reaktionen zu bewirken. Bei der Entladung wird die zuvor zugeführte Wärme wieder freigeben. Der abgedeckte Temperaturbereich liegt meist bei 50 °C bis 200 °C. Bei bestimmten Materialien können auch Temperaturen von bis zu 1.450 °C erreicht werden (Lassacher et al., 2018). Dies ermöglicht eine Kopplung mit Niedertemperatur-Nahwärmenetzen mit Neubauten und bestehenden Fernwärmenetzen mit Bestandsgebäuden einschließlich zentraler TWW-Bereitung.

Die entscheidenden Vorteile thermochemischer Speicher liegen in der nahezu verlustfreien Wärmespeicherung auch über große Zeiträume sowie in den hohen erreichbaren Energiedichten. Im Vergleich zu Heißwasser-Speichern verfügen thermochemische Speicher über bis zu vier- bis fünfmal höhere volumenbezogene Energiedichten (Hauer et al., 2001). Aufgrund der hohen Energiedichte können sie für den Ausgleich in Fernwärmenetzen verwendet werden. Jedoch befinden sich thermochemische Speicher bis auf einzelne Ausnahmen noch in einem frühen, vorkommerziellen Entwicklungsstadium. Daher sind grundlegende Untersuchungen zur Identifizierung geeigneter Reaktionen und zur Steigerung der Entladeleistung erforderlich. Darüber hinaus sollen Speicherkonzepte aus der Kombination verschiedener Speichertechnologien (Hybrid-Speicher: Kopplung zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Speichern) sowohl für Niedertemperatur-Nahwärmenetze als auch für bestehende Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden entwickelt werden (Stryi-Hipp et al., 2012).

■ Systemauslegung

Die erreichbare Leistung und Energiedichte von thermischen Speichern ist grundsätzlich stark von den gewählten Prozessbedingungen und der Umgebung des Speichers abhängig (Mangold et al., 2001a). Beispielsweise liegt die theoretische Energiedichte von Adsorptionsspeichern bei rund 200 bis 500 kWh_{th}/m³. Im Vergleich dazu liegt die erzielbare Energiedichte in der Praxis bei ca. 130 kWh_{th}/m³ (Rundel et al., 2013).

■ Anwendungsbereich

Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit Neubauten (mit Flächenheizungen wie Fußbodenheizungen) und Fernwärmenetze mit Bestandsgebäuden in Abhängigkeit vom Speichermedium bzw. chemischen Prozess, auch Nutzung für gebäudeintegrierte Systemlösungen möglich

In Abhängigkeit vom Speichermedium ist eine zentrale TWW-Bereitung und Raumheizung über Fernwärmenetze (Netztemperatur über 80 °C) möglich, bei Niedertemperatur-Wärmenetzen (Netztemperatur unter 55 °C) ist eine Nachheizung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung) zur Gewährleistung einer aus hygienischen Gründen erforderlichen Warmwassertemperatur von mindestens 55 °C in dezentralen Speichern erforderlich (Buderus, 2004).

Bisherige Pilotprojekte: Klimatisierung eines Schulgebäudes (ca. 1.600 m²) mit einer Lüftungsanlage in Kombination mit einem thermochemischen Speicher, Speichergröße: 7.000 kg_{Zeolith} (Hauer, 2000) / SaltX-Anlage in Kombination mit einem Fernwärmenetz (bis zu 30.000 Haushalte) in Berlin, Speichergröße: 1.000 – 3.000 l_{Salz} (5.000 m³) (Vattenfall, 2020c), (Feldreich, 2017), (Hauer, 2000).

■ Genehmigungsanforderungen

Im Genehmigungsverfahren Zuordnung des Speichers zu den Erzeugungsanlagen

Bauantrag stellen, Einhaltung der Regelungen gemäß BauGB, BauNVO und BauO Land, insbesondere Bodengutachten und Prüfstatik

Prüfung der Einhaltung der TA Lärm

Gegebenenfalls Beachtung von AwSV, UVPg, WHG, LWG, GrwV, BImSchG, BImSchV, LImSchG, TA Luft und BNatSchG

■ Investitionskosten

Thermochemische Speicher (allgemein): 8 – 100 €/kWh_{th} (Lassacher et al., 2018)

Sorptionswärmespeicher: 50 – 100 €/kWh_{th} (Lassacher et al., 2018)

■ Fördermöglichkeiten

– Bundesebene

Die Richtlinien zum gesamten Programm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ finden Sie [hier](#), das FAQ dazu [hier](#).

Die Höhe eines Zuschusses bzw. Kredites ist abhängig von der Energieeffizienz und den Kosten des Vorhabens.

– **Wohngebäude**

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 461\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude \(BEG WG – KfW 261\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM – KfW 262\)](#)

Nichtwohngebäude

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen \(BEG EM\)](#)

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude \(BEG NWG – KfW 463\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude und Einzelmaßnahmen \(BEG NWG und BEG EM – KfW 263\)](#)

Kommunen

Zuschuss:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 464\)](#)

Kredit:

[Bundesförderung für effiziente Gebäude \(BEG – KfW 264\)](#)

– [Erneuerbare Energien – Standard \(KfW 270\)](#)

– [IKK – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 201\)](#)

[IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung \(KfW 202\)](#)

– [BAFA WN 4.0](#)

– [§§ 22 – 25 KWKG](#)

– Landesebene

– [SH](#), [HH](#), [RP](#), [SL](#), [NRW](#), [BW](#)

Tabelle 18 Technische Anforderungen an thermochemische Speicher

Technische Anforderungen	Beschreibung
Betriebstemperatur	Metallhydride: ca. 280 – 500 °C, Silikagele: 40 – 100 °C, Zeolithe: ca. 100 – 300 °C (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005)
Spezifische Wärmekapazität	ca. 200 – 500 kWh _{th} /m ³ (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005) / 120 – 960 Wh _{th} /kg (Jahnke, 2019)
Wirkungsgrad	80 – 100 % (Jahnke, 2019)
Speichermedium und -aufbau	Zeolithe, Silikagele u. a. / je nach Anwendung von thermochemischen Speichern unterschiedlich
Anforderungen an den Standort	Abhängig vom Reaktionssystem
Zykluslebensdauer	3.500 (Jahnke, 2019)
Recyclingfähigkeit	Zeolithe, Silikagele, Wasser: nicht brennbar, umweltverträglich und gesundheitlich unbedenklich (Handke et al., 2008)
Reaktionszeit	Minuten (BVES, 2016)
Speicherdauer	Stunden – Wochen, ggf. Monate (BVES, 2016)

■ Best-Practice-Beispiel – Sorptionsspeicher



Abbildung 19 Thermochemisches Speichersystem (Hauer, 2000), (ZAE Bayer, Garching, 2000)

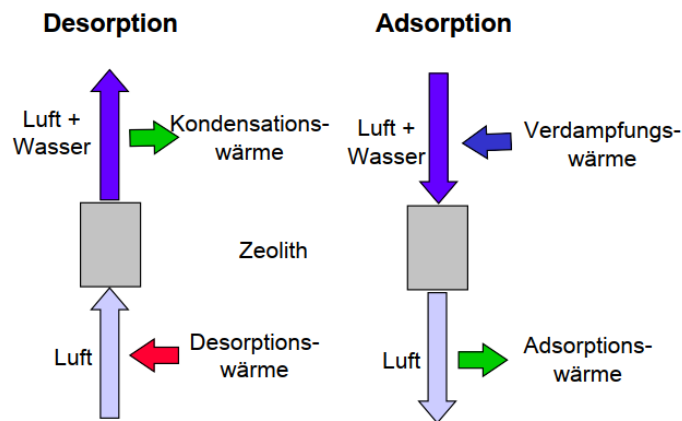


Abbildung 20 Offenes De- und Adsorptionssystem (Hauer, 2000), (ZAE Bayer, Garching, 2000)

Tabelle 19 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für thermochemische Speicher

Standort	München
Wärmebedarf	ca. 106 MWh _{th} /a (Hauer, 2000)
Wärmeabnehmende	Schulgebäude Fläche: 1.625 m ² (Hauer, 2000) Gebäude-Energiestandard: 65 kWh _{th} /(m ² ·a) (Hauer, 2000)
Wärmeversorgungskonzept	Klimatisierung mit einer Lüftungsanlage in Kombination mit einem thermochemischen Speicher / Beladung des thermochemischen Speichersystems mit Fernwärme (Dampfnetz auf 130 °C in München) in Schwachlastzeiten (Hauer, 2000)
Speichervolumen	7.000 kg _{Zeolith} (ca. 10 m ³) (Hauer, 2000)
Installierte Leistung der Absorptionswärmepumpe	1.300 – 1.400 kWh _{th} (Hauer, 2000)
Speicherdauer	Kurzzeitwärmespeicherung (Stunden)

■ Best-Practice-Beispiel – SaltX-Anlage



(Foto von SaltX Technology)

Abbildung 21 SaltX-Anlage (Röling, 2019)

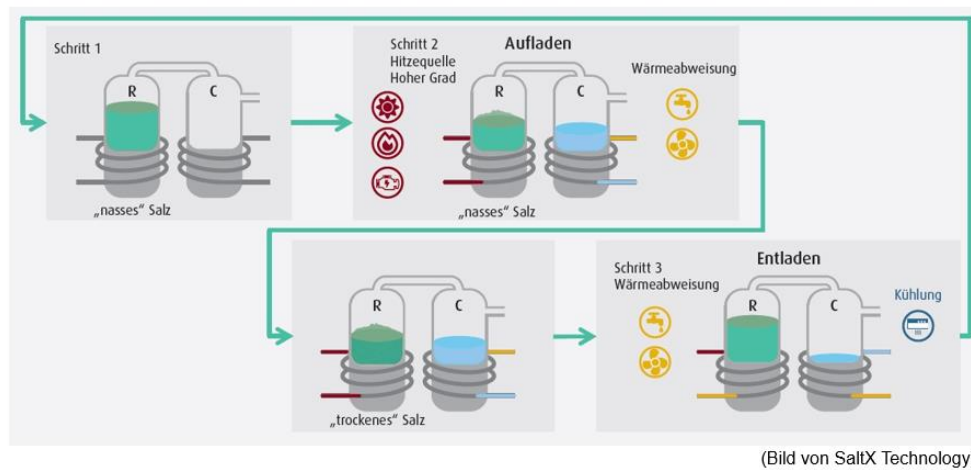


Abbildung 22 Schematische Darstellung der chemischen Reaktion der SaltX-Anlage (Röling, 2019)

Tabelle 20 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für thermochemische Speicher (Röling, 2019)

Standort	Berlin
Speicherkapazität	10 MWh _{th} (Schmid, 2020b)
Wärmeabnehmende	Bis zu 30.000 Haushalte (Berliner Fernwärmenetz) (Vattenfall, 2020c)
Wärmeversorgungskonzept	Speicherung von EE im Form von thermischer Energie durch das Trocknen des feuchten Salzes und deren Nutzung für das Berliner Fernwärmenetz
Speichervolumen	1.000 – 3.000 l _{Salz} (5.000 m ³) (Feldreich, 2017)
Installierte Leistung	5 MW _{th} (Röling, 2019)
Speicherdauer	Wochen – Monate

4 Zusammenfassung und Fazit

Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3 werden in diesem Abschnitt technische und wirtschaftliche Eigenschaften verschiedener Speichertechnologien anhand grafischer Darstellungen gegenübergestellt.

Charakterisieren lässt sich ein Wärmespeicher vor allem über die Speichertemperatur, die spezifische Wärmespeicherkapazität und den Wirkungsgrad. Zudem sind die spezifischen Investitionskosten ein wichtiger Parameter zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von thermischen Wärmespeichern. Sie sind jedoch stark von verschiedenen Rahmenbedingungen (Speichervolumen, Speichermedium u. a.) sowie Standortgegebenheiten abhängig.

Zunächst werden in Abbildung 23 die Betriebstemperaturen der in Kapitel 3 betrachteten Speichertechnologien vergleichend gegenübergestellt.

Die großen sensiblen Wasserspeicher (Heißwasser-, Kies-Wasser-, Aquifer- und Erdwärmesondenspeicher) können in der Regel mit einer Wassertemperatur von 30 °C bis 95 °C (Heidemann et al., 2005) betrieben werden. Sie werden häufig zum Ausgleich des saisonalen Solarangebots in Nahwärmenetzen eingesetzt. Im Vergleich dazu erfolgt die Beladung des Wasserspeichers von PtH-Anlagen bei ca. 130 °C (Betriebstemperatur von Fernwärmenetzen), da PtH-Anlagen in der Regel an ein Fernwärmesystem angeschlossen sind (Bücken et al., 2017).

Die Betriebstemperatur latenter und thermochemischer Speicher variiert in Abhängigkeit von der Be- und Entladung des Speichers (Eisspeicher: ca. 0 °C bei der Entladung und ca. 30 °C bei der Beladung) und des Speichermediums (PCM-Speicher). Bei der thermochemischen Wärmespeicherung liefert die physikalische oder reversible chemische Reaktion eine hohe Temperatur von ca. 50 °C bis 200 °C (Lassacher et al., 2018).

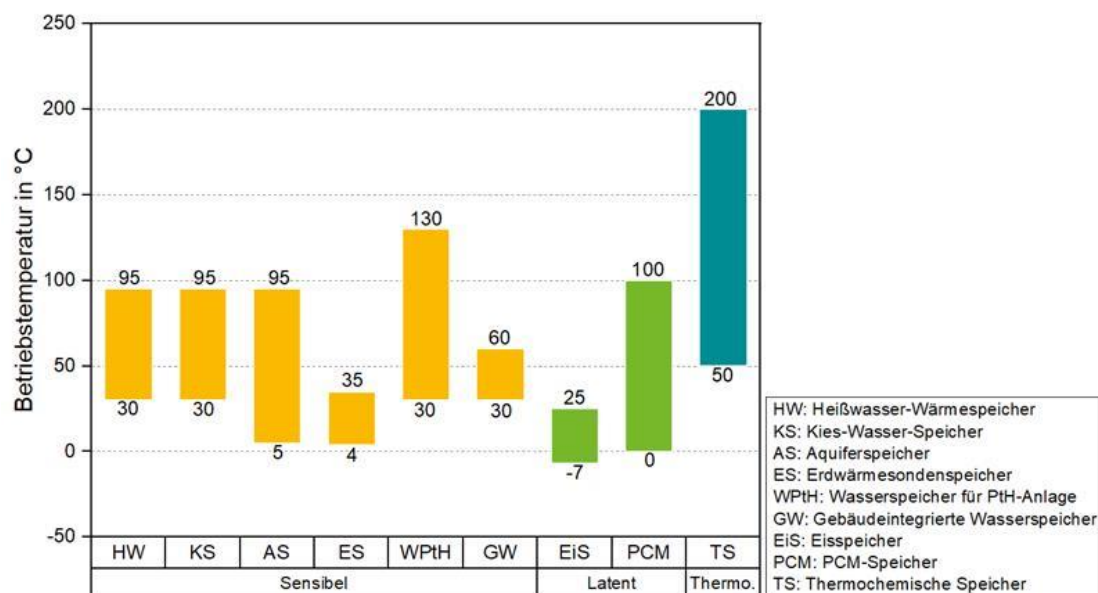


Abbildung 23 Gegenüberstellung der Betriebstemperatur (eigene Darstellung in Anlehnung an (Heidemann et al., 2005), (Neupert et al., 2009), (Lassacher et al., 2018), (Andresen et al., 2017), (Kühne, 2015), (VIESSMANN, 2016) und (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005)

Die Energiedichte der thermischen Speicher hängt vor allem von der spezifischen Wärmekapazität des Speichermediums ab. Die speicherbare Wärmemenge ist von der Wärmekapazität, der Masse und der nutzbaren Temperatur des Speichers abhängig. Abbildung 24 zeigt die spezifischen Speicherkapazitäten der betrachteten Speichertechnologien.

Daraus lässt sich erkennen, dass thermochemische Speicher eine deutlich höhere Speicherkapazität im Vergleich zur latenten und sensiblen Wärmespeicherung aufweisen. Jedoch ist die spezifische Speicherkapazität dieser thermochemischen Speicher stark von den Randbedingungen der konkreten Anwendung abhängig. Nicht nur die erforderliche Lade- und Entladetemperatur, sondern auch die Umgebungsbedingungen während der Lade- und Entladephase beeinflussen die Energiespeicherdichte (ZAE Bayern, 2015).

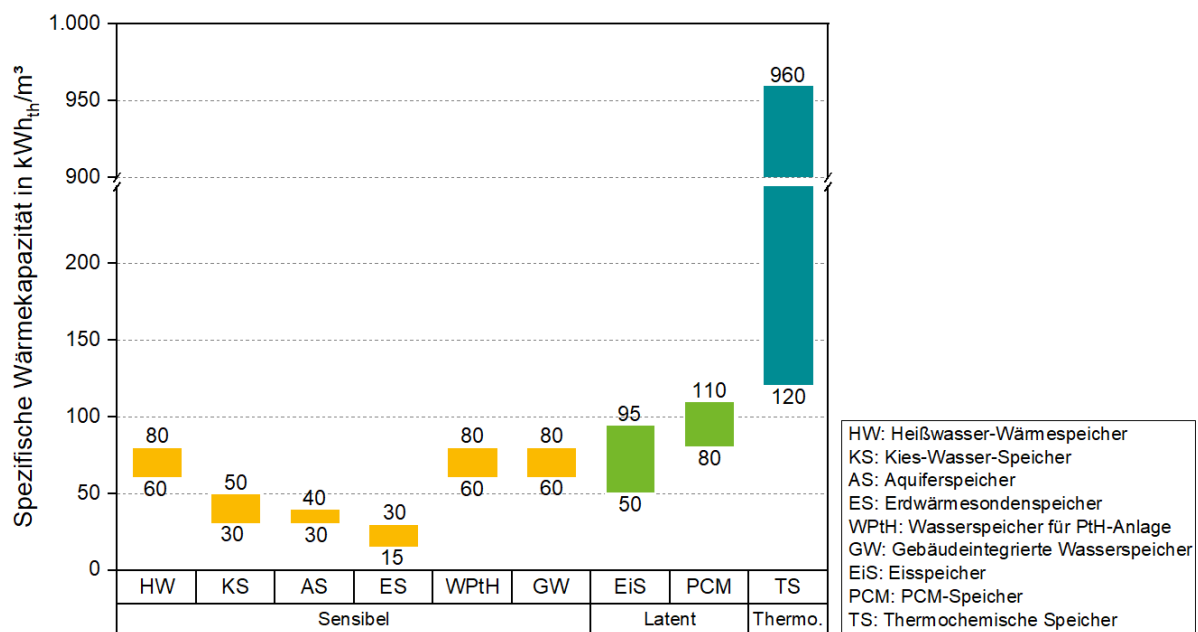


Abbildung 24 Gegenüberstellung der spezifischen Wärmekapazitäten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Mangold et al., 2001b), (Werschy et al., 2019), (BVES, 2016), (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005) und (Jahnke, 2019))

Neben der spezifischen Wärmespeicherkapazität weisen latente und thermochemische Speicher einen höheren Wirkungsgrad im Vergleich zu sensiblen Wärmespeichern auf. Der Wirkungsgrad liegt bei sensiblen Wärmespeichern zwischen 47 % und 75 % (Jahnke, 2019). Bei latenten Speichern wird eine Effizienz von 75 % bis 90 % (Jahnke, 2019) erreicht. Bei thermochemischen Speichern erfolgt die Wärmespeicherung nahezu verlustfrei.

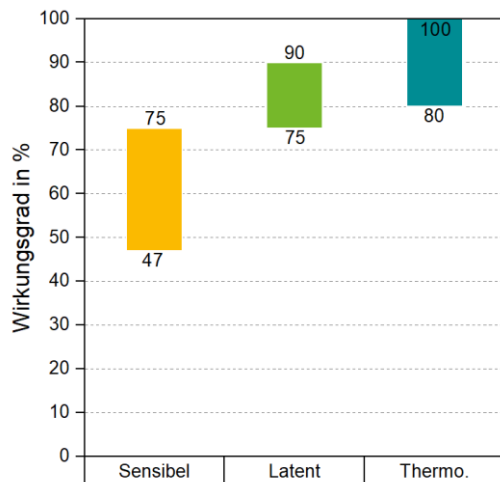


Abbildung 25 Gegenüberstellung des Wirkungsgrads (eigene Darstellung in Anlehnung an (Jahnke, 2019))

Bei der Auswahl und Umsetzung der Speichertechnologien ist die Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Faktor. In der Studie erfolgt die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit auf Basis der spezifischen Investitionskosten. Trotz des hohen Wirkungsgrads und der hohen Energiedichte sind thermochemische Speicher durch deutlich höhere Investitionskosten im Vergleich zu sensiblen und latenten Speichern geprägt. Dabei variieren die Investitionskosten in Abhängigkeit von den Speichermaterialien. Die Anwendung thermochemischer Speicher ist aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der Technologie mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko und offenen wissenschaftlichen Fragenstellungen verbunden. Bei latenten Speichern geht eine relativ höhere Wärmespeicherkapazität gegenüber sensiblen Wärmespeichern ebenfalls mit einer Zunahme der Investitionskosten einher. Vor allem steigen die Investitionskosten bei latenten Speichern deutlich, wenn hohe Leistungen erreicht werden sollen. Gegenüber latenten und thermochemischen Wärmespeichern befindet sich der Einsatz von sensiblen Speichern im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium und weist deutlich geringere Investitionskosten auf, wodurch sehr hohe Speicherkapazitäten für Quartiere kostengünstig erschlossen werden können. Jedoch haben errichtete sensible Wärmespeicher auf Quartiersebene derzeit Pilotprojektcharakter und ihre Investitionskosten sind stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig.

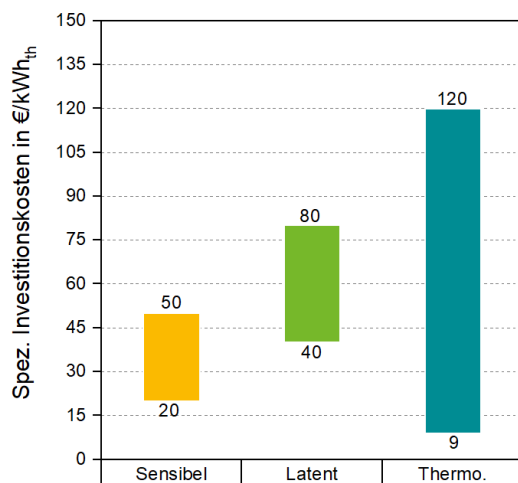


Abbildung 26 Gegenüberstellung der spezifischen (kapazitätsbezogenen) Investitionskosten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Lassacher et al., 2018) und (Stolze et al., 2019))

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Anwendung bzw. Umsetzung thermischer Speicher auf Quartiers-ebene in Bezug auf die übergeordnete Zielsetzung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Energieversorgung betrachtet werden sollte.

Latente Wärmespeicher kommen derzeit eher vereinzelt für einzelne Gebäude zum Einsatz, während sich thermochemische Speicher noch in der Entwicklungsphase befinden. Jedoch verfügen beide Speichertechnologien aufgrund hoher Wirkungsgrade, hoher Betriebstemperatur und hoher Speicherdichten über ein großes Entwicklungspotenzial vor allem zur Unterstützung von Fernwärmenetzen in Bestandsquartieren (Netztemperatur über 80 °C) (Bechem et al., 2015). Demgegenüber gelten sensible Wärmespeicher als etablierte und kostengünstige Technologie und werden häufig für solare Nahwärmenetze bzw. Niedertemperatur-Wärmenetze in Neubauquartieren (Netztemperatur unter 55 °C) eingesetzt.

Die Genehmigungsanforderungen an thermische Speicher sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu sind, neben baurechtlichen Anforderungen an die Speicher selbst, auch die verbundenen Anlagen und die verwendeten Stoffe zu prüfen, da diese gegebenenfalls unterschiedliche Umweltmedien in unterschiedlichem Ausmaß nutzen bzw. beeinflussen können. Weitere Anforderungen, insbesondere solche, die sich aus dem für die Anlagen vorgesehenen Standort ergeben können, sollten mit den zuständigen Behörden besprochen werden. Darüber hinaus sollten die Platzverfügbarkeit, die vorhandene Energieinfrastruktur, die Wirtschaftlichkeit und der Wärmebedarf des Gesamtsystems bei der Planung bzw. Auswahl thermischer Speicher berücksichtigt werden.

Des Weiteren spielt die Sektorenkopplung bei der Planung und Umsetzung thermischer Speicher eine große Rolle. Insbesondere den Wärmespeichern kommt durch eine Kopplung des Strom- und Wärmesektors eine Schlüsselrolle zu. Um diese Rolle auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einnehmen zu können, sollten bei der Planung von PtH-Anlagen in Verbindung mit thermischen Speichern auch die Stromnebenkosten (Netznutzungsentgelte, Umlagen, Steuern etc.) betrachtet werden. In bestimmten Konstellationen kann eine Minderung bzw. Vermeidung dieser Nebenkosten erreicht und somit gegebenenfalls eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielt werden. Eine Privilegierung von thermischen Speichern im Kontext der Stromnebenkosten gibt es derzeit nicht, da die verbundenen PtH-Anlagen als Letztverbrauchende behandelt werden und entsprechende Regelungen Anwendung finden.

Auf der einen Seite ist der Energiebedarf des Wärmesektors weitaus höher als der des Stromsektors. Auf der anderen Seite weisen thermische Energiespeicher niedrigere Investitionskosten im Vergleich zu bisherigen Batterie- und Wasserstoffspeichern auf (Hauer et al., 2013). Jedoch können Batterie- und Wasserstoffspeicher aufgrund der hohen Energiedichte und der zunehmenden Stromerzeugung aus EE in Kombination mit thermischen Speichern (als Hybrid-Energiespeicher) beispielsweise für den optimierten Betrieb eines Fern- und Nahwärmenetzes mit Wärmepumpen oder BHKWs eingesetzt werden.

Mittels Wärmespeichern kann die Energiebereitstellung in Form von Strom, Wärme und Kälte flexibilisiert und mit volatilen EE-Erzeugern gekoppelt werden. Dadurch kann die Effizienz in Fernwärmesystemen und Quartieren erhöht und die Leistung von fossil befeuerten Kraftwerken durch PtH-Anlagen ersetzt werden (siehe Kapitel 3.1.5). Zukünftig kann dies zur Dekarbonisierung des Wärmesektors beitragen. Hierfür sind Pilotforschungsprojekte für noch nicht in der Praxis etablierte Speichertechnologien (z. B. PCM-Speicher, thermochemische Speicher u. a.) zur Demonstration von Anwendungskonzepten und zur Förderung des Markteintritts, unter Berücksichtigung technischer, planerischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Aspekte, sinnvoll.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über verfügbare Speichertechnologien, wobei o für „Einsatz möglich“ und Δ für „Einsatz nur mit zusätzlicher Investition möglich“ steht (eigene Darstellung).....	6
Abbildung 2 Spezifische Investitionskosten saisonaler thermischer Speicher ohne Planungskosten und MwSt. (Solites, 2021a)	9
Abbildung 3 Beispiel Entscheidung Geschäftsmodell Contracting vs. Eigenbetrieb (eigene Darstellung).....	12
Abbildung 4 Ackermannbogen in München (ZAE Bayern, Garching, 2021).....	16
Abbildung 5 Schematische Darstellung des solaren Nahwärmesystems (Mangold et al., 2007) (Abbildung von Solites).....	16
Abbildung 6 Schematische Darstellung des solaren Nahwärmesystems (EnergieAgentur.NRW, 2008) (Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW)).....	20
Abbildung 7 Aquiferspeicher in Rostock-Brinckmanshöhe (Schmidt und Müller-Steinhagen, 2004) (Abbildung von Solites)	23
Abbildung 8 Schematische Darstellung des Aquiferspeichersystems (Werschy et al., 2019) (Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW))	24
Abbildung 9 Solarsiedlung in Neckarsulm (Solites, 2021b)	28
Abbildung 10 Schematische Darstellung des solaren Nahwärmenetzes in Kombination mit einem Erdwärmesondenspeicher in Neckarsulm (Nußbicker et al., 2004) (Abbildung von Universität Stuttgart, IGTE (ehemals ITW)).....	28
Abbildung 11 Elektrodenheizkessel Karoline in Hamburg (Wärme Hamburg GmbH, 2021).....	31
Abbildung 12 Vereinfachte Darstellung des Betriebs eines Elektrodenheizkessels für die PtH-Anwendung (Vattenfall, 2020b) (Abbildung von SaltX Technology)	32
Abbildung 13 Foto Gemeinde Wüstenrot II (Pietruschka, 2016a)	35
Abbildung 14 Energiekonzept der Gebäude in der Plusenergiesiedlung (Pietruschka 2016b) (Abbildung von Brennenstuhl).....	35
Abbildung 15 Klimaschutzsiedlung Urbacher Weg, Köln-Porz (Mnich, 2013).....	38
Abbildung 16 Schematische Darstellung des Wärmeversorgungskonzepts mit einem Eisspeicher (Mnich, 2013)	39
Abbildung 17 Vorderansicht Gebäude (links) und Übersichtsplan DEKRA-Campus (rechts) (Klein et al., 2017)	42
Abbildung 18 Schematische Darstellung der Kälteversorgung mit einem PCM-Speicher (Gschwander, 2014).....	43

Abbildung 19 Thermochemisches Speichersystem (Hauer, 2000), (ZAE Bayer, Garching, 2000)	46
Abbildung 20 Offenes De- und Adsorptionssystem (Hauer, 2000), (ZAE Bayer, Garching, 2000)	47
Abbildung 21 SaltX-Anlage (Röling, 2019).....	47
Abbildung 22 Schematische Darstellung der chemischen Reaktion der SaltX-Anlage (Röling, 2019)	48
Abbildung 23 Gegenüberstellung der Betriebstemperatur (eigene Darstellung in Anlehnung an (Heidemann et al., 2005), (Neupert et al., 2009), (Lassacher et al., 2018), (Andresen et al., 2017), (Kühne, 2015), (VIESSMANN, 2016) und (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005)	49
Abbildung 24 Gegenüberstellung der spezifischen Wärmekapazitäten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Mangold et al., 2001b), (Werschky et al., 2019), (BVES, 2016), (Schmidt-Pleschka und Milles, 2005) und (Jahnke, 2019).....	50
Abbildung 25 Gegenüberstellung des Wirkungsgrads (eigene Darstellung in Anlehnung an (Jahnke, 2019).....	51
Abbildung 26 Gegenüberstellung der spezifischen (kapazitätsbezogenen) Investitionskosten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Lassacher et al., 2018) und (Stolze et al., 2019)	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einflussfaktoren, wie das Contracting, auf das Geschäftsmodell für thermische Speicher (eigene Darstellung).....	11
Tabelle 2 Technische Anforderungen an Heißwasser-Wärmespeicher.....	15
Tabelle 3 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Heißwasser-Wärmespeicher (Mangold et al., 2007)	17
Tabelle 4 Technische Anforderungen an Kies-Wasser-Speicher.....	19
Tabelle 5 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Kies-Wasser-Speicher	20
Tabelle 6 Technische Anforderungen an Aquiferspeicher.....	23
Tabelle 7 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Aquiferspeicher	24
Tabelle 8 Technische Anforderungen an Erdwärmesondenspeicher	27
Tabelle 9 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Erdwärmesondenspeicher.....	28
Tabelle 10 Technische Anforderungen an PtH-Anlagen.....	31
Tabelle 11 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Power-to-Heat-Anlagen.....	32
Tabelle 12 Technische Anforderungen an gebäudeintegrierte Wasserspeicher in kalten Nahwärmenetzen.....	34
Tabelle 13 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für gebäudeintegrierte Wasserspeicher in kalten Nahwärmenetzen	35
Tabelle 14 Technische Anforderungen an Eisspeicher	38
Tabelle 15 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für Eisspeicher.....	39
Tabelle 16 Technische Anforderungen an PCM-Speicher.....	42
Tabelle 17 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für PCM-Speicher	43
Tabelle 18 Technische Anforderungen an thermochemische Speicher	46
Tabelle 19 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für thermochemische Speicher.....	47
Tabelle 20 Beschreibung des Best-Practice-Beispiels für thermochemische Speicher (Röling, 2019)	48

Literaturverzeichnis

- Al-Addous (2006): *Berechnen der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen Speichern von Wärme bei der ausschließlichen Wärmeversorgung von Häusern mit Solarkollektoren*. Al-Addous, M.. Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Von: <http://library.fes.de/pdf-files/stufo/cd-0403/doktorarbeit.pdf> abgerufen.
- Albert et al. (2018): *Ein Rechtsrahmen für den Wärmesektor – Studie zur rechtlichen Weiterentwicklung des Wärmesektors unter besonderer Berücksichtigung von Power to Heat*. Albert, D.; Doderer, H.; Matthes, E.; Schäfer-Stradowsky, S.; Steffensen, S.. IKEM–Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.. Berlin, Greifswald, Stuttgart. Kopernikus Projekte. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Von: https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2018/03/IKEM_Rechtsrahmen_W%C3%A4rme_20180319_final.pdf abgerufen.
- Andresen et al. (2017): *VDI – Statusreport 2017 – Energiespeicher*. Andresen, L.; Badede, J.; Bauer, F.; Dötsch, C.; Friedrich, A. K.; Gamrad, D.; Gölz, S.; Gschwander, S.; Pellingner, C.; Reuß, M.; Schmitz, G.; Schulz, D.; Span, R.; Sprecher, M.; Weiss, T.; Zunft, S.; Sterner, M.; Wagner, N.. Verein Deutscher Ingenieure e.V.. Von: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-statusreport-energiespeicher> abgerufen.
- Bauer et al. (2008): *Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Speicher*. Bauer, D.; Heidemann, W.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.; Panthalookaran, V.; Raab, S.. Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben Forschungsbericht zum Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)-Vorhaben. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik(ITW). Universität Stuttgart. Von: https://www.igte.uni-stuttgart.de/veroeffentlichungen/publikationen/publikationen_09-01.pdf abgerufen.
- Bechem et al. (2015): *Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien*. Bechem, H.; Blesl, M.; Brunner, M.; Conrad, J.; Falke, T.; Felsmann, C.; Geipel, M.; Gerhardt, N.; Glaunsinger, W.; Hilpert, J.; Kessler, A.; Kleinmaier, M.; Köhler, S.; Lükling, R.-M.; Mayrhofer, P.; Meinzenbach, A.; Metten, E.; Neugebauer, H.; Oesterwind, D.; Pels-Leusden, C.; Plate, J.; Pöhlmann, A.; Riegebauer, P.; Rummeni, J.; Schegner, P.; Schnettler, A.; Tenbohlen, S.; Roon, S.; Werner, J.; Wille-Haussmann, B.. Von: http://www.energiedialog2050.de/BASE/DOWNLOADS/VDE_ST_ETG_Warmemarkt_RZ-web.pdf abgerufen.
- Beucker und Hinterholz (2017): *Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für das Dezentrale Energiemanagement in Quartieren*. Beucker, S.; Hinterholz, S.. (Bericht D 4.1) Borderstep Institut. ProSHAPE-Konsortium. Berlin. Von: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2017/09/ProShape-D-4.1.pdf> abgerufen.
- Biedermann und Kolb (2014): *FAKTENBLATT – POWER TO HEAT*. Biedermann, F. und Kolb, M.. Arbeitsgemeinschaft der hessischen Industrie- und Handelskammern. Endbericht der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE). Von: https://www.ffegmbh.de/download/informationen/528_ihk_hessen_waerme/fb_power-to-heat.pdf abgerufen.

- Bockelmann et al. (2018): *Abschlussworkshop: Forschungsprojekt future:heatpump – Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen*. Bockelmann, F., Peter, M.; Schlosser, M.. Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS). TU Braunschweig. Von: https://isfh.de/wp-content/uploads/2018/03/4-future_heatpump.pdf abgerufen.
- Bodmann et al. (2001). *Solare Nahwärmeversorgung mit Kies/Wasser-Wärmespeicher in Steinfurt-Borghorst*. Bodmann, M.; Koch, H.; Pfeil, M.. Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig. Pfeil & Koch ingenieure, innovative Energieplanung. Von: <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=30209&token=ebaebef0a2f25a0f30ea24a15a563150c82f5507> abgerufen.
- Bodmann und Fisch (2002): *Solar unterstützte Nahwärmeversorgungen Steinfurt-Borghorst und Hannover-Kronsberg*. Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), TU Braunschweig. Bodmann, M.; Fisch, M. N.. Von: <http://docplayer.org/74534658-Solar-unterstuetzte-nahwaermeversorgungen-steinfurt-borghorst-und-hannover-kronsberg.html> abgerufen.
- Bolay et al. (2017): *Faktenpapier Energiespeicher*. Bolay, S., Bullmann, T.; Hegner, M.. Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES) Berlin. DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin | Brüssel. Von: <https://www.dihk.de/resource/blob/2470/a1776b75a7422241ece9cacc5083b395/faktenpapier-energiespeicher-data.pdf> abgerufen.
- Bonin (2020): *Regelungen zum Grundwasserschutz*. Umwelt & Technik. Wärmepumpen. Bonin, J.. Von: <https://www.umweltundtechnik.de/index.php?id=262> abgerufen.
- Brumme (2009): *Genehmigungsverfahren für tiefergeothermische Anlagen – Bergrecht, Wasserrecht, Baurecht, Immissionsschutzrecht, Naturschutzrecht, Flächen und Wege für Leitungen, Strahlenschutzrecht*. Brumme, R.. Fachanwalt Bau- und Architektenrecht, Schlichter + Schiedsrichter SOBau – Chemnitz. Von: <https://www.ra-brumme.de/1-Genemigungsverfahren.pdf> abgerufen.
- Bücken et al. (2017): *Potenztiale der Sektorkopplung und Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Wärmebereich in Sachsen-Anhalt*. Bücken, M.; Freischlad, H.; Kalunka, J.; Kraft, A.; Leisten, M.; Milatz, S.; Weltz, O.; Wolter, T.; Güntzel, T.; Hache, J.; Halbauer, R.. Von: https://enerko.de/wp-content/uploads/2017/12/Endbericht_PtH_web.pdf abgerufen.
- Buderus (2004): *Technische Maßnahmen zur Minderung des Legionellenwachstums in Neuanlagen – DVGW-Arbeitsblatt W551*. Buderus Heiztechnik. Von: http://www.bosy-online.de/Trinkwasser/DVGW-Arbeitsblatt_W551.pdf abgerufen.
- BVES (2016): *FACT SHEET SPEICHERTECHNOLOGIEN – Niedertemperatur-Latentwärmespeicher*. Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES). Von: https://www.bves.de/wp-content/uploads/2016/03/FactSheet_thermisch_latent_festfluessig_NT.pdf abgerufen.
- BVES (2018): *Effizienzsteigerungen durch Flexibilisierung konventioneller Kraftwerke*. Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES). Von: https://www.bves.de/wp-content/uploads/2018/12/PTHTP_Factsheets.pdf abgerufen.

- Bundesverband Geothermie e.V. (2020): *Standortauswahlgesetz*. Von: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/standortauswahlgesetz.html> abgerufen.
- Cervenka (2008): *Einfluss von PCM auf das Verhalten von Bauteilen*. Cervenka, C.. Von: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/11872> abgerufen.
- DIN 4708 (1994): *Zentrale Wassererwärmungsanlagen*
- Eisele et al. (2018): *Empfehlungen der LAWA für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Erdwärmesonden und –kollektoren*. Eisele, M.; Hellstern, U.; Holl, C.; Hörmann, U.; Jensen, H.; Landgraf, C.. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Von: https://www.lawa.de/documents/lawa-empfehlungen-anforderungen-erdwaermeanlagen_umlauf-umk_2_1559634462.pdf abgerufen.
- EnergieAgentur.NRW (2008): *Solarsiedlung Steinfurt-Borghorst*. Von: https://broschuerenservice.nrw.de/default/shop/Solarsiedlung_Steinfurt-Borghorst abgerufen.
- Estermann et al. (2017): *Kurzstudie Power-to-X – Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB*. Estermann, T.; Pichlmaier, S.; Guminski, A.; Pellingner, C.. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE). Von: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/FfE_Kurzstudie_Power-to-X_%282017%29.pdf abgerufen.
- Feldreich (2017): *Pilot project uses salt for energy storage*. Feldreich, S. Von: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2017/pilot-project-uses-salt-for-energy-storage> abgerufen.
- FVEE (2020): *Geothermie (Strom, Wärme und Kälte)*. ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE). Von: <https://www.fvee.de/forschung/forschungsthemen/geothermie-strom-waerme-und-kaelte/> abgerufen.
- Fox (2020): *Energieversorgungssysteme für Neubau- und Bestandsquartiere: Technische und ökonomische Analyse anhand fiktiver Beispielquartiere*. Fox, S.
- Fürstenwerth et.al. (2014): *Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien*. Fürstenwerth, D., Gerhardt, N., Richts, C., Hochloff, P., Müller, T., Hilpert, J., Antoni, O., Schulz, W..Agora Energiewende. Stiftung Umweltenergierecht.Fraunhofer IWES. Von: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/power-to-heat/Agora_PtH_Langfassung_WEB.pdf abgerufen.
- Glysofor (2020): *Rücknahme/Recycling – Glykole für die Kälte-, Klima- und Heizungstechnik*. WITTIG Umweltchemie GmbH. Von: <https://www.glysofor.de/ruecknahme-recycling/> abgerufen.
- Grimm et al. (2018): *EnEff:Wärme | Kassel Zum Feldlager - Geosolare Nahwärmeversorgung für die Siedlung 'Zum Feldlager'*. Grimm, S.; Huther, H.; Vajen, K.; Orozaliev, J.; I.Best; Reul, O.; Räuschel, H.; Bennewitz, J.; Rosner, F.; Berkefeld, T.; Ozellis, C.; Stroh, K.; Yu, Y. J.; Schmidt, D.. Heft 47. Von: <https://www.agfw-shop.de/kassel-zum-feldlager.html> abgerufen.
- Griebler et al. (2014): *Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner*

- Lebensgemeinschaften*. Griebler, C.; Kellermann, C.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S.; Stumpp, C.; Hegler, F. Von: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3710_23_204_thermische_veraenderungen_bf.pdf abgerufen.
- Gschwander (2014): *Aktuelle Anwendungsbeispiele zur Nutzung von Wärmespeichern zur Klimatisierung von Gebäuden*. Gschwander, S.. Fraunhofer Institute für Solare Energiesysteme, ISE. Von: https://nanopdf.com/download/aktuelle-anwendungsbeispiele-zur-nutzung-von-warmespeichern_pdf abgerufen.
- Handke et al. (2008): *Energiespeicher – Stand und Perspektiven – Themenfeld 3: Forschung und Entwicklung – Internationale Einordnung*. Knoll, M., Handke, V.; Jörß, W.; Kamburow, C.; Wehnert, T.. In: Dagmar Oertel: *Energiespeicher – Stand und Perspektiven*. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“. Von: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf> abgerufen.
- Hauer (2000): *OFFENE ADSORPTIONSSPEICHER MIT ZEOLITH*. Hauer, A.. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung. Von: <https://docplayer.org/49281697-Offene-adsorptionsspeicher-mit-zeolith.html> abgerufen.
- Hauer et al. (2001): *Thermochemische Speicher*. Hauer, A.; Brösicke, W.; Henning, H. M.; Mittelbach, W.; Mühlbauer, W.. Von: https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Externe_Projektbeschreibungen/Thermochemische_Speicher.pdf abgerufen.
- Hauer et al. (2013): *Wärmespeicher – 5., vollständig überarbeitete Auflage*. Hauer, A.; Hiebler, S.; Reuß, M.
- Heidemann et al.. (2005): *Solare Nahwärme und saisonale Speicherung*. Heidemann, W.; Dötsch, C.; Müller-Steinhagen, H.. Von: https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2005/th2005_02_02.pdf abgerufen.
- Holstenkamp et al. (2016): *Querschnittstudie Erfolgsfaktoren für mitteltiefe Aquifervärmespeicher in Norddeutschland*. Holstenkamp, L.; Lauer, J.J.; Neidig, P.; Opel, O.; Steffahn, J.; Strodel, N.; Vogel, M.; Degenhart, H.; Michalzik, D.; Schomerus, T.; Schönebeck, J.; Növig, T.. Von: <https://www.geodienste.com/presse/dgk2016.pdf> abgerufen.
- Jaeger (2018): *Die AwSV erklärt – Was wirklich neu ist und wie man sie anwendet*. Jaeger, E.. Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord. Rheinland Pfalz. Von: https://sgdsued.rlp.de/fileadmin/sgdsued/Dokumente/Downloads/WAB/Referat_Die_AwSV_erklaert.pdf abgerufen.
- Jahnke (2019): *Untersuchung des Honigmann-Prozesses zur thermochemischen Energiespeicherung*. Jahnke, A.. Technische Universität Berlin. Von: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/9100/5/jahnke_anna.pdf abgerufen.
- Jersch (2016): *Rückkauf der Hamburger Energienetze - Was ist drei Jahre nach dem Volksentscheid erreicht?*. Jersch, S.. Bürgerschaft der freien und Hansestadt Hamburg. Von: https://www.stephan-jersch.de/fileadmin/migration/news_import/21_5758_ru_rckkauf-der-

[hamburger-energienetze---was-ist-drei-jahre-nach-dem-volksentscheid-erreicht- 01.pdf](#) abgerufen.

Kirschbaum et al. (2014): *Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlung für eine umweltverträgliche Nutzung*. Kirschbaum, B., Griebler, C.; Kellermann, C.; Stumpp, C.; Hegler, F.; Kuntz, D.; Walker-Hertkorn, S.. Von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2015_auswirkungen_thermischer_veraenderungen_infolge_der_nutzung_obenflaechennaher_geothermie_0.pdf abgerufen.

Klein et al. (2017): *Lastmanagement in netzreaktiven Gebäuden – LaNeGe*. Klein, K.; Gschwander, S.; Wahl, A.; Steinle, C. P.; Ege, K.; Krieger, V.

Kranz et al. (2008): *Wärme- und Kältespeicherung in Aquiferen*. Kranz, S.; Bartels, J.; Gehrke, D.; Hoffmann, F.; Wolfgramm, M.. GFZ Potsdam. bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau. Von: https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_237345_1/component/file_237344/content abgerufen.

Kühne (2015): *power-to-(district)heat: Erste Betriebs- und Einsatzerfahrungen*. Kühne, J.. 1. Praxis- und Wissensforum Fernwärme/ Fernkälte. AGFW. Von: <https://docplayer.org/14580409-Power-to-district-heat-erste-betriebs-und-einsatzerfahrungen.html> abgerufen.

LBEG (2020): *Bodenklassen für Erdarbeiten nach DIN 18300 (IBOKLA 50)*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Von: https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten_publikationen/karten_daten/baugrund/bodenklassen_erdarbeiten_nach_din_18300/bodenklassen-fuer-erdarbeiten-nach-din-18300-ibokla-50-621.html abgerufen.

Lassacher et al. (2018): *Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz an oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern*. Lassacher, S.; Puschnigg, S.; Lindorfer, J.. Energie Institut. Johannes Kepler Universität Linz. Von: https://energieinstitut-linz.at/wp-content/uploads/2020/03/W%C3%A4rmespeicher-innerbetrieblich_Endbericht_EJKU_2018.pdf abgerufen.

Mangold et al. (2001a): *Solarthermie-2000 TP 3: Solar unterstützte Nahwärme Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung*. Mangold, D.; Schmidt, M. Benner: Th.; Hahne, E.; Müller-Steinhagen, H.. Von: https://www.tu-chemnitz.de/mb/SolTherm/ST2000/images/tp3itw_mangold.pdf abgerufen.

Mangold et al. (2001b): *Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme*. Mangold, D.; Benner, M.; Schmidt, T.. Von: <https://www.baufachinformation.de/mobil/kostenlos.jsp?sid=5622BF3A79D1DFFB20AA3125EFD1117B&id=&link=https%3A%2F%2Fapi.deutsche-digitale-bibliothek.de%2Fbinary%2F24699bcd-a983-40fd-86d9-1cb5dda7a8d2.pdf> abgerufen.

Mangold et al. (2007): *SOLARE NAHWÄRME UND LANGZEIT-WÄRMESPEICHER*. Mangold, D.; Riegger, M.; Schmidt, T.. Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben. Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme. Projektträger Jülich. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Von:

- <http://docplayer.org/20754361-Solare-nahwaerme-und-langzeit-waermespeicher.html> abgerufen.
- Mnich (2013): *Großer Eisspeicher im Wohnungsbau*. Mnich, R.. PSB & Partner. 6. Europäischer Kongress. Von: <https://docplayer.org/25545953-Grosser-eisspeicher-im-wohnungsbau.html> abgerufen.
- Moser (2017): „FutureDHSsystem Linz“ – Sondierung neuer Konzepte für zukünftige Energietransformationen im Linzer Wärmesystem. Moser, S.. Blue Globe Report. Energieinstitut. Johannes Kepler Universität Linz. Klima + Energie Fonds. Von: <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/BGR0112017SC.pdf> abgerufen.
- Müller et al. (2014): *Solarenergie und Wärmenetze: Optionen und Barrieren in einer langfristigen, integrativen Sichtweise*. Müller, A.; Büchele, R.; Kranzl, L.; Totschnig, G.; Mauthner, F.; Heimrath, R.; Halmdienst, C.. doi: 10.13140/RG.2.1.2658.1843. Vienna University of Technology, Energy Economics Group. Von: https://www.researchgate.net/profile/Andreas_Mueller21/publication/286392298_Solarenergie_und_Warmenetze_Options_und_Barrieren_in_einer_langfristigen_integrativen_Sichtweise/link/s/5668632008ae7dc22ad3188 abgerufen.
- Neupert et al. (2009): *Energiespeicher. Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial*. Neupert, U.; Euting, T.; Kretschmer, T.; Notthoff, C.; Ruhlig, K.; Weimert, B.. Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag. 217 pp.. ISBN: 978-3-8167-7936-0. Von: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-897426.pdf abgerufen.
- Nußbicker et al. (2004): *Bau und Betrieb des Erdsonden-Wärmespeichers in Neckarsulm-Amorbach*. Nußbicker, J.; Mangold, D.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.. Universität Stuttgart. DLR. Von: https://www.researchgate.net/profile/W_Heidemann/publication/224797620_Bau_und_Betrieb_des_Erdsonden-Warmespeichers_in_Neckarsulm-Amorbach/links/54dd9dbf0cf28a3d93f9cf1c/Bau-und-Betrieb-des-Erdsonden-Wae abgerufen.
- Pehnt et al. (2017): *Wärmenetzsysteme 4.0 Endbericht - Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“*. Pehnt, M.; Nast, M.; Götz, C.; Blömer, S.; Barkhausen, A.; Schröder, D.; Miljes, R. Pottbäcker, C., Breier, H., Nabe, C., Lindner, S., Dannemann, B.. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. adelphi consult GmbH. PricewaterhouseCoopers GmbH. PricewaterhouseCoopers GmbH. Ecofys Germany GmbH. Agentur für Erneuerbare Energien e.V.. Deutsche Energie-Agentur GmbH. BMWi. Von: <https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf> abgerufen.
- Pietruschka (2016a): *Kalte Nahwärme – ein zukunftsweisendes Konzept zur Vernetzung von LowEx Systemen*. Pietruschka, D.. envisage Wüstenrot. PtJ. BMWi. Von: <https://docplayer.org/30163595-Kalte-nahwaerme-ein-zukunftsweisendes-konzept-zur-vernetzung-von-lowex-systemen-dr-dirk-pietruschka.html> abgerufen.
- Pietruschka et al. (2016b): *Vision 2020 – Die Plusenergiegemeinschaft Wüstenrot*. Pietruschka, D.; Pietzsch, U., Monien, D.; Begleitforschung EnEff:Stadt c/o pro:21 GmbH. Hochschule für Technik Stuttgart. Zentrum für Nachhaltige Energietechnik. Von: <https://www.baufachinformation.de/kostenlos.jsp?sid=977D7FD2C1AECABFFE0412B5BFCAC>

- [2DD&id=2016099004074&link=http%3A%2F%2Fwww.irbnet.de%2Fdaten%2F16099004074.pdf](http://www.irbnet.de/daten/F16099004074.pdf) abgerufen.
- Röling (2019): *Vattenfall speichert Energie in Salz*. Röling, H.. emw Energie. Markt. Wettbewerb. Von: <https://www.emw-online.com/artikel/190639/vattenfall-speichert-energie-in-salz> abgerufen.
- Rosenkranz (2020): *Erdwärmetauscher für Lüftung und Wärmepumpe*. Rosenkranz, A.. Von: <https://heizung.de/heizung/wissen/erdwaermetauscher-fuer-lueftung-und-waermepumpe/> abgerufen.
- Rundel et al. (2013): *Speicher für die Energiewende*. Rundel, P.; Meyer, B.; Meiller, M.; Meyer, I.; Daschner, R.; Jakuttis, M.; Franke, M.; Binder, S.; Hornung, A.. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Institutsteil Sulzbach-Rosenberg. Von: <https://speicherinitiative.at/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/18-Speicher-fuer-die-Energiewende-Fraunhofer-UMSICHT.pdf> abgerufen.
- SAENA (2012): *Technologien der Abwärmenutzung*. Sächsische Energieagentur GmbH – SAENA. Von: https://www.saena.de/download/broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf abgerufen.
- Sanner et al. (2000): *Erfahrungen mit dem Thermal Response Test in Deutschland*. Sanner, B.; Reuß, M.; Mands, E.; Müller, J.. Institut für Angewandte Geowissenschaften der Justus-Liebig-Universität. Landtechnik Weihenstephan. TU München. UBeG GbR. Von: <https://buildingphysics.com/download/2000%20Sanner%20etal%20dgk%202000%20-%20TRT.pdf> abgerufen.
- Sauss (2018): *Überblick zur saisonalen Wärmespeicherung in Deutschland*. Sauss, D. Von: https://www.ib-sh.de/fileadmin/user_upload/downloads/energieagentur/eki/eki_vortrag_ff11_07_ueberblick_waermespeicherung_siz.pdf abgerufen.
- Schabbach et al. (2010): *Thermische Energiespeicher – Thermische Speichertechnologien zur effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien/Überschusswärme und ihre Umsetzung in Thüringen*. Schabbach, T.; Wesselak, V.; Steiner, P.. LEG Thüringen mbH, Erfurt. Von: https://www.cluster-thueringen.de/fileadmin/thcm/pdf/veranstaltungen/vortraege/thermische_energiespeicher/studie.pdf abgerufen.
- Schmid (2020a): *Power-to-Heat: Heizen mit Windstrom*. Schmid, A.. Von: <https://edison.media/erleben/power-to-heat-heizen-mit-windstrom/23843552.html> abgerufen.
- Schmid (2020b): *Vattenfall und das DLR forschen an thermischen Speichern aus Salz. Ende 2019 soll sich zeigen, ob die Technologie umsetzbar und wirtschaftlich ist*. Schmid, A.. Von: <https://edison.media/erklaren/vattenfall-und-dlr-testen-salz-waermespeicher/23984186.html> abgerufen.
- Schmidt und Müller-Steinhagen (2004): *The Central Solar Heating Plant with Aquifer Thermal Energy Store in Rostock – Results after four years of operation*. Schmidt, T.; Müller-Steinhagen, H.. Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT). Institute for Thermodynamics and Thermal

- Engineering (ITW). University of Stuttgart. Institute of Technical Thermodynamics (ITT). German Aerospace Center (DLR) Von: <https://silo.tips/download/the-central-solar-heating-plant-with-aquifer-thermal-energy-store-in-rostock-res> abgerufen.
- Schmidt-Pleschka und Milles (2005): *Wärme und Strom speichern*. Schmidt-Pleschka, R.; Milles, U.. BINE Informationsdienst basisEnergie. 19.
- Schneider et al. (2011): *recyclingfähig konstruieren – Subprojekt 3 zum Leitprojekt „gugler! build & print triple zero“*. Schneider, U.; Böck, M.; Mötzl, H.. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Von: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/endbericht_1121_recyclingfaehig_konstruieren.pdf?m=1469660550& abgerufen.
- Schroeteler et al. (2020): *TECHNO-ÖKONOMISCHE BEWERTUNG VON SAISONALEN WÄRMESPEICHERN – EIN SIMULATIONSBASIERTER ANSATZ*. Schroeteler, B.; Sperle, H.; Felder, T.; Meier, M.; M. Berger, J. Worlitschek. Hochschule Luzern, CC Thermische Energiespeicher. 16.Symposium Energieinnovation. Von: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_H3/833_LF_Schroeteler.pdf abgerufen.
- Seitz et al. (2018): *Technologiebericht – 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch)*. Seitz, A.; Zunft, S.; Hoyer-Klick, C.. Von: https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/70016A6DEDAD0237E0539A695E8684D6/current/document/3.3b_Energiespeicher_thermisch_thermo-chemisch_und_mechanisch.pdf DLR. BMWi. abgerufen.
- Solar Energy Laboratory – University of Wisconsin (2005): *TRNSYS: A Transient System Simulation Program*.
- Solites (2021a): Spezifische Investitionskosten saisonaler thermischer Speicher ohne Planungskosten und MwSt.
- Solites (2021b): *Solarsiedlung in Neckarsulm (Solites, 2021)*.
- Stolze et al. (2019): *Forschungs-und Entwicklungspotenziale der Thüringer Energiespeicherbranche. Energiespeicherstudie für das Bundesland Thüringen*. Stolze, C.; Gollmer, L.; Hager, M. D.; Stelter, M.; Schubert, U. S.; Liebe, J.; Ehrich, M.; Jelinek, B., Ammon, M., Fahmy, L.. Center for Energy and Environmental Chemistry Jena (CEEC Jena). Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e.V.. EuPD Research Sustainable Management GmbH. Von: https://www.ceec.uni-jena.de/ceec_fimedia/downloads/energiespeicherstudie.pdf abgerufen.
- Stryi-Hipp et al. (2012): *Forschungsstrategie Niedertemperatur-Solarthermie 2030*. Stryi-Hipp, G.; Drück, H.; Wittwer, V.; Zörner, W., Bollin, E., Hafner, B., Henning, H.-M., Jordan, U., Köbbemann-Rengers, R., Köhl, M., Lambrecht, K., Mangold, D., Stadler, C., Vajen, K.. DSTTP. GERTEC GmbH Ingenieurgesellschaft. Netzwerk Kälteeffizienz Hamburg. Von: https://www.solaroffice.de/fileadmin/solaroffice/dokumente/publikationen/DSTTP_strategie_einzelseiten.pdf abgerufen.

- Tech und Josfeld (2008): *Energieeffizienz in der Prozess- und Großkälte*. Tech, T.; Josfeld, F. J.. Von: <https://docplayer.org/5841908-Energieeffizienz-in-der-prozess-und-grosskaelte-6-11-2008.html> abgerufen.
- UBA (2020a): *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. Umweltbundesamt (UBA) Von: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme> abgerufen.
- UBA (2020b): *Kunststoffe* Umweltbundesamt. UBA. Von: <https://www.umweltbundesamt.de/kunststoffe#hinweise-zum-recycling> abgerufen. Vattenfall (2020a): *Elektrokessel „Karoline“ – ein Beitrag zur Norddeutschen Energiewende*. Vattenfall, Naoumis, H.. Vattenfall. Von: <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog/2018/april/elektrokessel-karoline--ein-beitrag-zur-norddeutschen-energiewende> abgerufen.
- Vattenfall (2020b): *Erste Power-to-Heat-Anlage in Hamburg ermöglicht Sektorenkopplung*. Vattenfall, Gross, B.. Von: <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog/2018/november/erste-power-to-heat-anlage-in-hamburg-ermoglicht-sektorenkopplung> abgerufen.
- Vattenfall (2020c): *Heike Tauber zur neuen Power-to-Heat-Anlage in Berlin*. Vattenfall. Von: <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/news/2019/september/3-Fragen-an-Heike-Tauber-Power-to-Heat> abgerufen.
- VDI 2067 Blatt 1 (2012): *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung*. VDI.
- VDI 4640 Blatt 3 (2001): *Thermische Nutzung des Untergrundes – Unterirdische Thermische Energiespeicher*. VDI.
- VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (2016): *PCM energy storage systems in building services*. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.
- Vela Solaris AG (2018): *Polysun Simulation Software – Benutzerhandbuch*. Vela Solaris AG. Von: https://velasolaris.com/wp-content/uploads/2020/07/Tutorial_DE.pdf abgerufen.
- VISSMANN (2012a): *Grundlage für Wärmepumpen*. Viessmann. Von: <http://www.linear.de/onlinebrowser/VISSMANN/Pdf/DEU/519.pdf> abgerufen.
- VISSMANN (2012b): *Heizen mit Eis – Effiziente und preisattraktive Wärmequelle für Wärmepumpen*. Von: http://viessmann.com.ua/images/uploads/pdfs/heizen_mit_eis.pdf abgerufen.
- VISSMANN (2012c): *Planungsanleitung – VITOCAL Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpe - ein- und zweistufig, 5,8 bis 117,8 kW*.
- VISSMANN (2016): *Planungsanleitung – Eisspeichersystem*. Viessmann. Von: <https://docplayer.org/50016194-Viesmann-vitofriocal-eisspeichersystem-fuer-vitocal-sole-wasser-waermepumpen-planungsanleitung-vitofriocal-eisspeichersystem.html> abgerufen.
- Wärme Hamburg GmbH (2021): *Elektrodenheizkessel Karoline in Hamburg (Foto)*.
- Werschy et al. (2019): *Abschlussbericht: Roadmap Gas ++ „Versorgungsstrategien von Niedrigenergiehäusern in Hinblick auf den Ausbau bestehender und zukünftiger Energienetze“*. Werschy, M.; Erler, F.; Feldpausch-Jägers, S.; Tali, E.. DVGW Deutscher Verein des Gas-und

Wasserfaches e.V.. Von: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201705-roadmap-gas-plus.pdf> abgerufen.

Wolf GmbH (2017): *Montageanleitung – Warmwasserspeicher für Wärmepumpen*. Wolf GmbH. Von: https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Daten/Dokumente/Produktdownloads/Speicher/Montage/3062842_201703_WP_Puffermodul-CPM-1-70_SPU-1-120_SEM-1W-360_CEW-1-200_CEW-2-200_SEW-1-300_400_SEW-2-200.pdf abgerufen.

ZAE Bayern (2015): *Chancen und Grenzen thermochemischer Speicher*. BINE Informationsdienst.

ZAE Bayern, Garching (2021): *Ackermannbogen in München*.

Abkürzungen

AS	Aquiferspeicher
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAFA WN 4.0	Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 des BAFA
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke
BauO Land	Landesbauordnung
BBergG	Bundesberggesetz
BEG EM	Bundesförderung für effiziente Gebäude - Einzelmaßnahmen
BEG WG	Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude
BEW	Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze vom 16.07.2021
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BNatSchG	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege
BVES	Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V.
BW	Baden-Württemberg
CEEC Jena	Center for Energy and Environmental Chemistry Jena
DH	Doppelhaus
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSTTP	Deutsche Solarthermie-Technologieplattform
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien
EFH	Einfamilienhaus
EiS	Eisspeicher
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnWG	Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung
ES	Erdwärmesondenspeicher

EWK	Erdwärmekollektor
FfE	Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH
FK	Flachkollektor
FVEE	ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
GeolDG	Geologiedatengesetz
GrwV	Verordnung zum Schutz des Grundwassers
GW	Gebäudeintegrierter Wasserspeicher
HB	Bremen
HH	Hamburg
HS	Hessen
HW	Heißwasser-Wärmespeicher
IGS	Institut für Gebäude- und Solartechnik
ITT	Institute of Technical Thermodynamics
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KfWIKK	Investitionskredit Kommunen der KfW
KfWIKU	Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen der KfW
kMFH	Kleines Mehrfamilienhaus
KS	Kies-Wasser-Speicher
KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LImSchG	Landesimmissionsschutzgesetz
LWG	Landeswassergesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
NRW	Nordrhein-Westfalen
NWG	Nichtwohngebäude
PCM	Phasenwechselmaterialien (englisch: Phase Change Materials)
PtH	Power-to-Heat
PV	Photovoltaik
RH	Reihenhaus
ROG	Raumordnungsgesetz

RP	Rheinland-Pfalz
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SLK	Spitzenlastkessel
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
StromStG	Stromsteuergesetz
SWT	Solar- und Wärmetechnik Stuttgart
TA Lärm	Technische Anleitung Lärm
TA Luft	Technische Anleitung Luft
TH	Thüringen
ThEEN e.V.	Thüringer Erneuerbare Energien Netzwerk e.V.
TS	Thermochemische Speicher
TWW	Trinkwarmwasser
UBA	Umweltbundesamt
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
UVP-V Bergbau	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WE	Wohneinheit
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts
WPtH	Wasserspeicher für PtH-Anlage
WSchVO	Wärmeschutzverordnung

Einheiten- und Indexverzeichnis

a	Jahr
el	elektrisch
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
th	thermisch
Vol.-%	Volumenprozent
Wh	Wattstunde

