

Fokusstudie

«Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick»»

Auftraggeber: Forum Energiespeicher Schweiz
Titel: Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick
Datum: Februar 2019
Autoren: Michel Haller, Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR
Florian Ruesch, Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR

Unter Mitwirkung von:
Luca Baldini, EMPA
Stefan Brändle, Amstein & Walthert AG
Andreas Haselbacher, ETH Zürich
Hubert Palla, VSG Verband der Schweizerischen Gasindustrie
Willy Villasmil, CC Thermische Energiespeicher, HSLU

Die vorliegende Fokusstudie gibt die Einschätzungen und Positionen der Autoren, jedoch nicht zwingend des Forums Energiespeicher Schweiz und dessen Partner wieder.

Warum eine Fokusstudie «Saisonale Wärmespeicher»?

«Die Denkweise unserer modernen Zivilisation basiert auf einem fatalen Fehler: Wir sehen den fundamentalen Unterschied zwischen Energiequellen und Energiespeicher nicht! Unser globaler Energieverbrauch basiert mehrheitlich auf Energiespeichern wie Öl, Gas, Kohle und Uran ohne jede Nachhaltigkeit und mit fatalen Konsequenzen für kommende Generationen.»

Dieses Zitat aus einem Referat des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) aus dem Jahr 2005 hat heute mit den ersten Anzeichen einer dramatischen Klimaerwärmung und dem IPCC Sonder-Report SR1.5 eine neue Dimension erreicht.

Erneuerbare Wärmequellen sind zwar in grossem Ausmass verfügbar, jedoch besteht in unseren Breiten eine grosse saisonale Verschiebung von Angebot im Sommer und Bedarf im Winter.

Die vorliegende Fokusstudie «Saisonale Wärmespeicher» zeigt anhand von Beispielen, dass es möglich ist mittels geeigneter Wärmespeicher einen saisonalen Ausgleich zu schaffen. Die Studie zeigt auch auf, dass, je grösser die Wärmespeicher sind, desto tiefer liegen die Kosten der zur Verfügung gestellten Wärme und damit die Lebenszykluskosten.

Für die erfolgreiche Umsetzung von grossen Wärme- und Kältenetzen braucht es immer ein Zusammenspiel von Politik, Investoren, Planern, Betreibern, Branchenvertretern und Immobilienverantwortlichen. Die vorliegende Fokusstudie des Forums Energiespeicher Schweiz soll Anstösse geben, die Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger und Abwärme voranzutreiben. Wo kein Öltank mehr möglich oder erwünscht ist, können saisonale Wärmespeicher zu meist vergleichbaren Wärmegestehungskosten diese Funktion übernehmen.

Mit der längst überfälligen Erschliessung des Wärmesektors für erneuerbare Energien werden wir einen «schlafenden Riesen» wecken!

Stefan Brändle

Leiter Arbeitsgruppe Wärmespeicher
Forum Energiespeicher Schweiz
2.2019

EXECUTIVE SUMMARY

Die Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes erfordert die Ausweitung der Produktion erneuerbarer Wärme und erneuerbaren Stromes um ein Vielfaches. Wind- und Solarenergie, denen ein hohes Potenzial attestiert wird, fallen jedoch nicht kontinuierlich an, sondern zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von meteorologischen Bedingungen sowie Tages- und Jahreszeiten. Die daraus resultierende fluktuierende Produktion von Energie muss durch entsprechende Energiespeichertechniken ausgeglichen werden.

Wärme- und Kältespeicher bieten hierfür sehr interessante Möglichkeiten, da ein grosser Teil (50 %) der Endenergie in der Schweiz als Wärme oder Kälte anfallen, und beide eine ausgesprochene Saisonalität aufweisen. Der Wärmebedarf ist im Winter um ein vielfaches höher als im Sommer und damit azyklisch zur Verfügbarkeit von Solarenergie. Er übersteigt auch den Mehrertrag aus Windkraft im Winter um ein Vielfaches. Zudem stehen im Bereich der Wärmespeicher Lösungen und Techniken zur Verfügung, welche in Bezug auf die Gestehungskosten, insbesondere für die saisonale Speicherung in grossem Massstab, deutlich günstiger sein können als der Aufbau und Betrieb zusätzlicher saisonaler Stromspeicherkapazitäten. Dies eröffnet die Möglichkeit, durch saisonale Verlagerung (Heizen und Kühlen) nicht nur den Bedarf an fossilen Energieträgern, sondern auch den Bedarf an elektrischer Energie im Winter und im Sommer zu reduzieren. Wenn Dank Wärmespeichertechniken die Deckung des Wärmebedarfs im Winter mit hohem Anteil erneuerbarer Energie weniger elektrische Energie für Wärmepumpen benötigt, so kann damit ein Ausbau der Stromproduktions- und Übertragungskapazitäten zur Deckung des Winterbedarfs vermieden werden. Gleichzeitig bieten intelligent mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken kombinierte Wärmespeicher die Möglichkeit, dem Stromnetz insbesondere im Winter sowohl eine positive als auch eine negative Sekundärregelleistung anzubieten und so zur Stromnetzstabilisierung beizutragen.

Dieser Bericht gibt eine Übersicht über heute auf dem Markt verfügbare Wärmespeichertechniken, mit einem speziellen Fokus auf die Anwendung zur saisonalen Wärmespeicherung. Die Speichertechniken werden unterschieden in Bezug auf die Temperaturen, Speicherdichten, typischen Speichergrossen, sowie die Kosten für Erstellung und Betrieb. Dazu werden Beispiele für die Speicherverluste und Kosten pro MWh ausgespeicherte Energie für einen typischen Anwendungsfall gegeben.

Heute bereits am Markt verfügbare und erfolgreich eingesetzte saisonale Wärmespeichertechniken lassen sich unterteilen in Niedertemperaturspeicher, welche zur Entladung auf eine Wärmepumpe angewiesen sind, zusätzlich im Sommer aber Kälte auf Nutztemperaturniveau abgeben können, und in Nutztemperaturspeicher, welche Wärme direkt auf Nutztemperaturniveau zur Verfügung stellen können. Je nach Wärmespeichertechnik und Wärmespeicherprojekt lassen sich die Kosten für die ausgespeicherte Energie einordnen zwischen 25 CHF/MWh und 400 CHF/MWh. Im Vergleich dazu betragen die Kosten für die *saisonale* Speicherung von elektrischer Energie 100 CHF/MWh bei Speicherkraftwerken und über eine Zehnerpotenz mehr bei Batterien. Tendenziell lassen sich Niedertemperaturspeicher mit geringeren Kosten realisieren als Nutztemperaturspeicher. Wesentliche Voraussetzung für die Realisierung sehr geringer Wärmespeicherkosten sind jedoch der weitgehende Verzicht auf eine statisch tragende Hülle, was durch eine Platzierung des Speichervolumens in der Erde erreicht werden kann oder durch die Nutzung des Untergrundes bzw. von Aquiferen selbst, sowie der Verzicht auf Wärmedämmung gegenüber dem umgebenden Erdreich. Dies wiederum setzt voraus, dass ein grosses Speichervolumen bewirtschaftet wird und entsprechend grosse Wärmemengen, typischerweise > 1'000 MWh/a, gespeichert werden können. Es handelt sich entsprechend um Lösungen, welche auf Grossverbraucher oder Wärmenetze angewiesen sind. Für einzelne Niedrigenergiehäuser in lockerer Siedlungsüberbauung sind nur saisonale Wärmespeichertechniken am oberen Ende der Preisskala (zum Beispiel oberirdischer Wassertank) verfügbar.

Die erzielbaren Speicherdichten der marktverfügbaren Techniken bewegen sich im Bereich zwischen 3 und 120 kWh/m³. Wird die Wärme in natürlichen Erdschichten und Aquiferen gespeichert, so ist die Wärmespeicherdichte besonders gering, jedoch gleichzeitig von untergeordneter Bedeutung. Dies deshalb, weil nicht das Volumen kostenbestimmend ist, sondern dessen Erschliessung. Für den Einsatz von Wasserspeichern oder Eisspeichern innerhalb der Gebäudehülle ist jedoch die Speicherdichte von hoher Relevanz. Hier besteht Hoffnung, dass die derzeit in Forschung und Entwicklung befindlichen chemisch/physikalischen Wärmespeicher- und Hybridspeicherprojekte Speicherdichten ermöglichen werden, die um ein Vielfaches höher als die von Wasser bzw. Eis sind.

Mögliche Konflikte ergeben sich bei Wasser- und Eisspeichern innerhalb der Gebäudehülle durch das benötigte Raumvolumen, bei Erdbeckenspeicher durch deren oberflächlich sichtbaren Flächenbedarf und bei allen erdgelagerten Speichertechniken durch die lokale Erwärmung des Untergrundes. Letzteres schliesst eine Realisierung in Gebieten mit signifikanten Grundwasserströmungen weitgehend aus. Im Hinblick auf eine kostengünstige Umsetzung der Energiestrategie müssen den Möglichkeiten der saisonalen Wärmespeicherung nach Ansicht der Autoren in Politik und Forschung mehr Beachtung geschenkt werden. Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte in diesem Bereich sind wichtig um diese Techniken weiter zu entwickeln, das KnowHow im Umgang mit diesen Techniken zu verbreiten, und die Kosten weiter zu reduzieren. Voraussetzung für die Realisierung saisonaler Speicherprojekte ist immer eine Zeitabhängigkeit der Energiepreise oder eine Zeitabhängigkeit der Verfügbarkeit von Energie. Unterschiedliche Energiepreise für Sommer und Winter sind derzeit jedoch sowohl bei elektrischer Energie als auch bei fossilen Energieträgern kaum ausgeprägt.

GLOSSAR

Physikalische Einheiten

J	Physikalische Einheit für Energiemengen, $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1/3600 \text{ Wh}$
PJ	$1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ J}$
kWh	Im Alltag gebräuchliches Mass zur Angabe von Energiemengen, $1 \text{ kWh} = 3.6 * 10^6 \text{ J}$, $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh}$
TWh	$1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh}$

Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
CAPEX	Capital Expenditure, Kapitalkosten
HD-PE	High Density Polyethylene
LCOES	Levelized Cost of Energy Storage
OPEX	Operational Expenditure, Betriebs- und Wartungskosten
PCM	Phase Change Material / Phasenwechselmaterial
PVT	Photovoltaisch-Thermische Kollektoren

Begriffe

Ein **Aquifer** ist ein Grundwasserleiter, respektive ein Gesteinskörper mit Hohlräumen, der zur Leitung von Grundwasser geeignet ist.

Graue Energie ist Energie, welche aufgewendet werden muss für die Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes

Niedertemperaturspeicher sind Speicher, welche auf einem für Wärmebedarf nicht direkt nutzbaren Temperaturniveau betrieben werden und deshalb mittels einer Wärmepumpe entladen werden. Sie haben aber den Vorteil, dass sie für Kältebedarf direkt oder über eine Kältemaschine genutzt werden können.

Nutzungsgrad bezeichnet bei einem Wärmespeicher das Verhältnis von ausgespeicherter zu eingespeicherter Wärmeenergie

Nutzwärmespeicher werden auf ein Temperaturniveau beladen, welches es erlaubt, die Wärme ohne Einsatz einer Wärmepumpe direkt für die angestrebte Anwendung einzusetzen.

Power-to-X bezeichnet Technologien, mit welchen es möglich ist elektrische Energie in eine chemisch gespeicherte Form zu überführen, zum Beispiel in ein brennbares Gas, einen Feststoff oder eine Flüssigkeit. Das X steht dabei für das resultierende Produkt.

Schmelzenthalpie bezeichnet die Energiemenge, die benötigt wird, um ein festes Material am Schmelzpunkt bei konstantem Druck zu schmelzen

Transmissivität ist ein Mass für die Fähigkeit eines Grundwasserleiters, Wasser zu transportieren

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung und Motivation	7
2 Ausgangslage	8
3 Wärmespeichertechniken und deren Merkmale	11
3.1 Übersicht Wärmespeichertechniken	11
3.2 Merkmale von Wärmespeichern	11
3.2.1 Unterteilung in Niedertemperatur- und Nutztemperaturspeicher	11
3.2.2 Kenngrößen – Key Performance Indicators	12
3.3 Effekte auf das Gesamtenergiesystem	13
4 Beispiele marktreifer Speichertechnologien	14
4.1 Niedertemperaturspeicher	14
4.1.1 Erdreichspeicher	14
4.1.2 Aquiferspeicher	15
4.1.3 Eisspeicher	16
4.2 Nutzwärmespeicher	18
4.2.1 Oberirdische Speicherbehälter	18
4.2.2 Erdbeckenspeicher	19
4.2.3 Erdsondenspeicher	20
4.2.4 Aquiferspeicher	22
5 Ausblick aktuelle Forschung	24
5.1 Sorptionsspeicher	24
5.2 Phasenwechselspeicher	25
5.3 Hybride Speicher für Wärme, Transport, Strom	26
5.4 Sektorkopplung und Beitrag zur Stromversorgungssicherheit	26
6 Vergleich der Speichertechniken	28
6.1 Speicherdichte und Nutzungsgrad	28
6.2 Wärmespeicherkosten	29
7 Schlussfolgerungen	31
8 Literatur und Quellen	33
Annex A Methodik der Berechnung der Speicherkosten	36
Annex B Speicherkosten anhand realisierter Projekte	37

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Die Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes erfordert die Ausweitung der Produktion erneuerbarer Wärme und erneuerbaren Stromes um ein Vielfaches. Erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie wird dafür ein hohes Potenzial attestiert.¹ Die von Windkraft sowie von thermischen und photovoltaischen Solaranlagen produzierte Energie fällt jedoch nicht kontinuierlich an, sondern zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit von meteorologischen Bedingungen, sowie von Tages- und Jahreszeiten. Die daraus resultierende fluktuierende Produktion von Energie muss durch entsprechende Energiespeichertechniken kurzfristig (Tag/Nacht, Flauten/Böen) und bei höheren Anteilen an der Gesamtenergieproduktion auch längerfristig über die Jahreszeiten hinweg ausgeglichen werden.

¹ Eine von Meteotest ausgeführte Studie im Auftrag von Swissolar beziffert das Potenzial auf 10 TWh Solarwärme und 30 TWh Solarstrom [1], während in der Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 des Bundesrates «nur» von 10 TWh/a für Solarstrom zu lesen ist. Die heutige Produktion von Solarstrom liegt bei ca. 2 TWh/a (ca. 3 % des Jahresverbrauchs der Schweiz)

Der Endenergieverbrauch der Schweiz betrug im Jahr 2016 rund 770 PJ², davon wurden ca. 50 % (Abbildung 1) für Wärmezwecke³ eingesetzt [2]. Der zweitgrösste Sektor des Endenergieverbrauchs ist derjenige der Mobilität (30 %), gefolgt vom Endenergieverbrauch an Elektrizität für diverse Anwendungen, welche nicht der Mobilität oder der Wärmeerzeugung dienen (ca. 20 %).

Endenergieverbrauch der Schweiz 2016

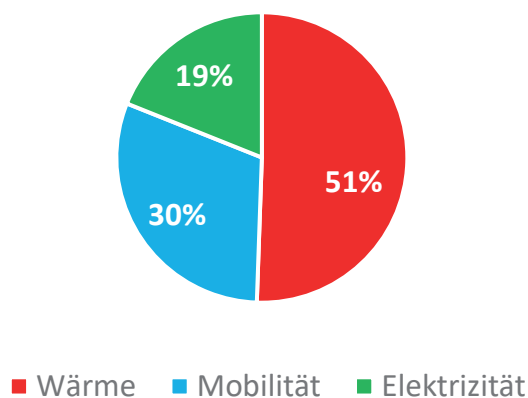


Abbildung 1: Endenergieverbrauch der Schweiz in 2016 nach Verwendungszwecken gemäss [2], ohne Tanktourismus und Flugverkehr, rund 770 PJ.

Der Bedarf an elektrischer Energie ist in den Wintermonaten in der Schweiz heute ca. 15 % höher als im Jahresdurchschnitt⁴ und somit über die Jahreszeiten relativ ausgeglichen (Abbildung 2, oben). Der Bedarf an Wärme für Gebäudeheizung und Warmwasser jedoch weist eine ausgeprägte Saisonalität auf und ist in Wintermonaten – je nach Witterung – gegenüber dem Durchschnitt um den Faktor 2.5 und gegenüber einem Sommermonat um den Faktor 10 höher (Abbildung 2, unten).

Der grösste Teil des Wärmebedarfs der Schweiz wird noch immer über fossile Brennstoffe gedeckt. Ein Ersatz durch erneuerbare Energien wie Solarwärme, Wärmepumpen oder Holzheizungen findet derzeit statt. Insbesondere der hohe Winterbedarf kann jedoch nicht ausschliesslich durch im Winter erzeugte Solarwärme oder Holzenergie bereitgestellt werden.

Die Energieperspektiven des Bundes [4] gehen davon aus, dass der Heizwärmebedarf bis 2050 auf Grund der Klimaerwärmung um 15 % sinken wird. Gleichzeitig soll der Bedarf an Wärme in Haushalten gegenüber 2010 insgesamt auf Grund von zusätzlichen Effizienzsteigerungen um insgesamt 33 % sinken. Im Gegensatz dazu wird mit einer Zunahme der Kühlenergienachfrage um 130 % gerechnet.

² ohne Tanktourismus und Flugverkehr.

³ Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme.

⁴ Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2016, S. 14, [3].

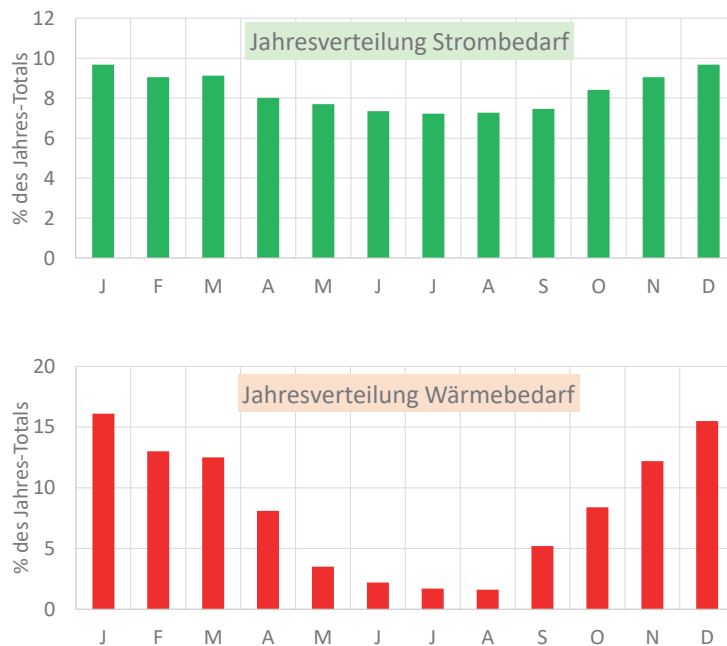


Abbildung 2: Exemplarische Verteilung des Strom- (oben) und Wärmebedarfs (unten) anhand von Aufzeichnungen der Stadtwerke München.

Aus den Energiemengen und der Saisonalität des Strom- und Wärmebedarfs geht hervor, dass der Bedarf an saisonalen Energiespeichertechniken in Zukunft bei steigendem Anteil solarer Energieversorgung (Abbildung 3) vor allem zur Bereitstellung von Wärme im Winter benötigt wird, und in einem weitaus geringeren Ausmass zur Bereitstellung von elektrischer Energie.

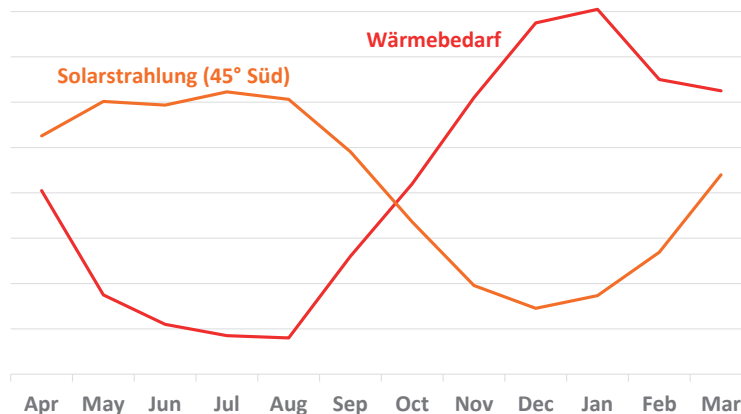


Abbildung 3: Jahreszeitlicher Verlauf des Solarstrahlungsangebotes im Vergleich zur jahreszeitlichen Verteilung des Wärmebedarfs, exemplarisch für einen Mittellandstandort in der Schweiz.

Eine Entwicklung, die sich im Wärmemarkt abzeichnet, ist der starke Zuwachs an Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung und somit die zunehmende Kopplung mit elektrischer Energie. Dies birgt grosse Chancen, da zum Beispiel durch Wärmepumpen mit drei- bis fünfmal geringerem Einsatz von elektrischer Energie geheizt werden kann als mit einer elektrischen Direktheizung. Bei der Kombination von elektrisch betriebenen Wärmepumpen mit Wärmespeichern ergibt sich der Vorteil, dass der Wärmepumpenbetrieb vom Wärmebedarf zeitlich um einige Stunden entkoppelt und auf Zeitfenster mit günstigen Strompreisen verschoben werden kann. Damit kann auf kurzfristige Überangebote oder Engpässe im Stromnetz reagiert und ausgleichend agiert werden. Diese Entwicklung des zunehmenden Einsatzes von Wärmepumpen ist zudem auch aus Gründen der Energieeffizienz und des Klimaschutzes zu begrüssen.

Gleichzeitig zeigt jedoch Abbildung 4 auch deutlich, dass es aus Sicht der verfügbaren Stromproduktionskapazitäten nicht wahrscheinlich ist, dass der gesamte Gebäudepark in Zukunft ausschliesslich mit Wärmepumpen beheizt werden kann. Selbst unter Berücksichtigung einer Reduktion des Wärmebedarfs um 33 % wäre dazu im Januar der elektrische Leistungsbedarf für ausschliesslich über Luft-Wärmepumpen beheizte Gebäude bereits in der gleichen Grössenordnung wie die maximale Leistung des heutigen Schweizer Kraftwerksparks. Selbst wenn ausschliesslich die sehr effiziente aber auch etwas teurere Sole/Wasser Technologie eingesetzt würde, wäre voraussichtlich eine Verdreifachung der bisher für Wärmezwecke verwendeten Kapazität nötig.

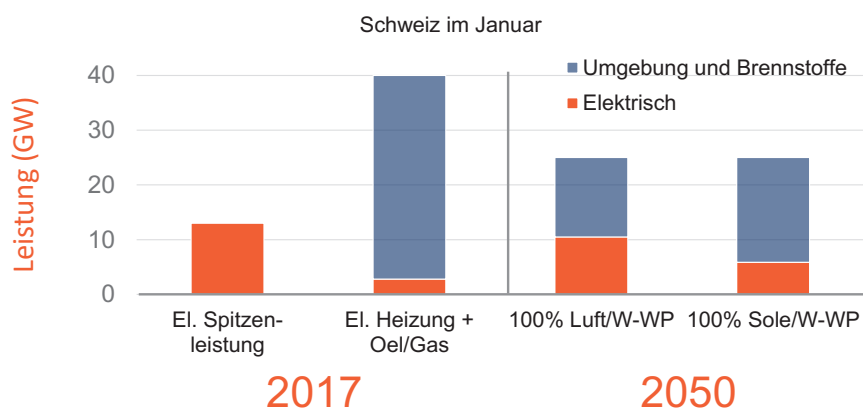


Abbildung 4: Heute (2017) installierte elektrische Leistung des Schweizer Kraftwerksparks im Vergleich zu Strom welcher für Heizzwecke eingesetzt wird. Im Vergleich dazu die im Jahr 2050 unter Annahme einer Deckung des Wärmebedarfs ausschliesslich mit Luft-Wasser oder Sole-Wasser Wärmepumpen benötigte elektrische und thermische Leistung.

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie im Winter bietet die saisonale Speicherung von Wärme. Wärmespeicherung auf tiefen Temperaturniveaus im Erdreich oder in Wasser-/Eisspeichern ermöglicht es, Wärmepumpen im Winter mit höheren Arbeitszahlen zu betreiben und damit mit weniger elektrischem Aufwand als bei Verwendung von Luft als Wärmequelle. Bei saisonalen Speichern auf einem tiefen Temperaturniveau ist oft auch eine Koppelung/Synergie mit dem stark wachsenden Kühlbedarf möglich. Ein ausgekühlter Saisonspeicher kann direkt oder indirekt zur effizienten Kühlung von Gebäuden oder Prozessen im Sommer verwendet werden und wird dadurch automatisch für den Winter wieder erwärmt. Die saisonale Wärmespeicherung auf dem Temperaturniveau des Wärmebedarfs ermöglicht es, selbst im Winter vollständig auf Wärmepumpen verzichten zu können. Dadurch können im Winter sowohl das Stromnetz als auch die Produktionskapazitäten entlastet und ein Ausbau derselben vermieden werden.

Weitere Informationen zum Bedarf und zur Klimarelevanz von Wärme in den verschiedenen Sektoren im Vergleich zu anderen Energieformen sind in der Faktensammlung «Wärme» des Forums Energiespeicher Schweiz und der Wärme Initiative Schweiz enthalten.

3.1 Übersicht Wärmespeichertechniken

Zur Speicherung von Wärme stehen verschiedene Materialien und Techniken zur Verfügung, welche man auf Grund des physikalischen Prinzips der Wärmespeicherung unterteilt in [5–7]:

- Sensible Wärmespeicherung
- Latente Wärmespeicherung
- Thermochemische Wärmespeicherung

Sensible Wärmespeicher zeichnen sich dadurch aus, dass eine Wärmeaufnahme zu einer Erhöhung der Temperatur des Speichermediums führt, die Abgabe von Wärmeenergie die Temperatur wiederum erniedrigt. Zu diesem Speichertyp gehört die wohl am weitesten verbreitete Technik der Wasserspeicher, die zum Beispiel zur Speicherung von Brauchwarmwasser im Gebäude oder zur Speicherung von Wärme in Fernwärme- und Fernkältesystemen eingesetzt werden. Sensible Wärmespeicherung findet jedoch auch statt im Erdreich, zum Beispiel in Erdsondenfeldern, oder in der thermischen Masse, die in Form von Holz, Beton, Stahl und anderen Materialien in Gebäuden verbaut ist. Prinzipiell kann sensible Wärme in jedem Material gespeichert werden.

Latentwärmespeicher zeichnen sich dadurch aus, dass die aufgenommene Wärme nicht primär zu einer Änderung der Temperatur des Speichermediums führt, sondern zu einer Änderung des Aggregatzustandes von fest zu flüssig oder von flüssig zu dampfförmig. Denkbar ist auch eine Umstrukturierung von Gitterstrukturen in einem Festkörper bei Wärmez- oder abfuhr. Die verbreitetsten Latentwärmespeicher sind Wasser/Eis-Speicher zur Speicherung von Kälte und Wasser/Dampf-Systeme zur Speicherung von Wärme für den Transport in Fernwärmenetzen.

Thermochemische Wärmespeicher zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Lage sind, Wärme über eine endotherme (kühlende) chemische Reaktion aufzunehmen, und über eine exotherme (heizende) chemische Reaktion wieder abzugeben. Dies geschieht meist über die Sorption respektive Aufnahme von Molekülen (Sorbit) in einer Flüssigkeit (Absorption) oder an einer Oberfläche (Adsorption). Thermochemische Wärmespeicher erreichen höhere Speicherdichten als Wasser und speichern das Potenzial Wärme freizusetzen auch noch nach Abkühlen auf Umgebungstemperatur, was sie vor allem für die Anwendung als Langzeitspeicher interessant macht. Bisher beschränkt sich ihre Anwendung hauptsächlich auf Forschungsprojekte. Ein Durchbruch am Markt konnte bisher zumindest für die Langzeitspeicherung nicht verzeichnet werden.

3.2 Merkmale von Wärmespeichern

3.2.1 Unterteilung in Niedertemperatur- und Nutztemperaturspeicher

Niedertemperaturspeicher sind Speicher, welche auf einem nicht direkt nutzbaren Temperaturniveau betrieben werden und deshalb immer mittels einer Wärmepumpe entladen werden. Die Wärmepumpe hebt die gespeicherte Energie auf ein nutzbares Temperaturniveau und benötigt hierfür eine höherwertige Antriebsenergie, welche meist als elektrische Energie zur Verfügung gestellt wird. Diese elektrische Energie wird im Wärmepumpenprozess ebenfalls in Wärme umgewandelt.

3.2.2 Kenngrössen – Key Performance Indicators

Kosten und Lebensdauer

Die Kosten von Energiespeichertechniken werden nach [8] ausgewiesen als «Levelized Cost for Energy Storage» (LCOES) in Kosten pro kWh ausgespeicherter Energie, was sowohl Investitionskosten als auch Betriebskosten des gesamten Lebenszyklus beinhaltet. Die Methodik ist in Anhang A beschrieben. Zu beachten ist dabei, dass eine unterschiedliche Dauer der Speicherung und unterschiedliche Betriebskonzepte auch zu unterschiedlicher Anzahl Speicherzyklen über die Lebensdauer führen und somit verschiedene Speichertechniken nur unter gleichen Einsatzbedingungen verglichen werden dürfen. Zum Beispiel sind die Kosten pro kWh ausgespeicherter Energie eines Wärmespeichers, der als Saisonspeicher (ein Speicherzyklus pro Jahr) betrieben wird, per Definition 365 mal höher als die Kosten desselben Speichers der als Tagesspeicher (365 Zyklen pro Jahr) eingesetzt wird.

Für die Analyse wird analog zu [8] von einem Kapitalzinssatz von 5% ausgegangen und von Lebensdauern, welche spezifisch sind für die jeweiligen Speichertechniken. Die Kosten werden einmal ohne Kosten für die Wärmequelle ausgewiesen und einmal mit Wärmeerzeugungskosten von CHF 50/MWh. Der Versuch, die Investitionskosten in einen Leistungsteil und einen Energieteil aufzuschlüsseln, erwies sich bei allen betrachteten Techniken als nicht durchführbar. Dies deshalb, weil entweder ein linearer Zusammenhang besteht zwischen der Leistung und der Energie, wie zum Beispiel bei Erdsonden, oder weil die Leistungskomponenten im Vergleich zu der Energiekomponente bei der saisonalen Speicherung schlicht vernachlässigbar waren (zum Beispiel Pumpen und Wärmetauscher bei grossen Wasserspeichern). In der Berechnung der Kosten der einzelnen Speichertechniken wurden sie auf Grund der Geringfügigkeit in die Wartung der Anlage inkludiert.

Für die Betriebskosten (Wartung, Unterhalt, Strom für Pumpen) wurde, wenn nicht projektspezifische Kosten vorlagen, mit einem Standardwert von 0.5 % der Investitionskosten gerechnet⁵.

Sämtliche Investitionskosten gelten für den Schweizer Markt und für schlüsselfertig installierte Speicher inklusive Be- und Entladevorrichtungen, jedoch ohne Mehrwertsteuer. Zusatzkosten, welche durch das benötigte Speichervolumen anfallen, zum Beispiel für umbauten Raum im Falle eines Wärmespeichers der in einem Wohnhaus installiert ist, werden nicht erfasst⁶. Preise, welche auf Grund von Projekten im Ausland ermittelt wurden, wurden nach Vergleich mit ähnlichen Listen- und Bauwerkspreisen auf Schweizer Preise umgerechnet.

Temperaturniveau der Wärmespeicherung und Speicherkapazität

Die Speicherdichte kann als volumetrische (d.h. pro Volumeneinheit) oder als gravimetrische (pro Gewichtseinheit) Speicherdichte angegeben werden. Für sensible Wärmespeicher bestimmt die nutzbare Temperaturdifferenz die effektiv nutzbare Speicherkapazität und damit auch die erreichbare Speicherdichte.

Speicherverluste

Die Speicherverluste sind gerade bei saisonalen Wärmespeichern eine wichtige Grösse, da die Verluste bei den meisten der eingesetzten Speichertechnologien mit der Speichertemperatur und mit der Speicherdauer zunehmen. Gleichzeitig nehmen die prozentualen Verluste mit der Grösse der Speicher ab, da sich aus einem grösseren Volumen in der Regel auch ein geringeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ergibt.

Sicherheit

Sicherheitsaspekte umfassen zum Beispiel Toxizität, Brennbarkeit und Explosionsfähigkeit. Sind in allen diesen Bereichen kaum sicherheitsrelevante Aspekte aufzuführen, so wird dies pauschal als «sicherheitstechnisch unbedenklich» deklariert. Dies ist bei den heute marktgängigen Wärmespeichertechniken praktisch immer der Fall.

⁵ Siehe auch Berechnungstool „Variantenvergleich Energiesysteme des AHB Zürich: <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/beratung/energie-gebauedetechnik/planungshilfen-werkzeuge.html>

⁶ Diese fallen je nach Standort und Bauobjekt sehr unterschiedlich aus.

3.3 Effekte auf das Gesamtenergiesystem

Wärmespeicher ermöglichen in erster Linie eine zeitliche Entkoppelung von Produktion und Nachfrage von Wärme, sowie eine Reduktion der installierten Kapazitäten zur Deckung einer kurzfristig hohen Last. Dank Wärmespeichern können Anlagen zur Erzeugung oder für den Transport von Energie kleiner dimensioniert werden, was sich positiv auf die Kosten des Energiesystems auswirken kann. Direkte CO₂-Emissionen gibt es in der Regel keine, die Betriebsenergie in Form von Pumpleistung zur Be- und Entladung bewegt sich im tiefen einstelligen Prozentbereich und fällt weder primärenergetisch noch bei der Erfassung der Kosten ins Gewicht. Die graue Energie zur Erstellung der Speicher ist in aller Regel äusserst gering im Vergleich zu den umgesetzten Energiemengen.

Für die saisonale Speicherung von elektrischer Energie stehen mit Ausnahme der Speicherkraftwerke kaum kostengünstige Lösungen zur Verfügung. Wenn es gelingt, durch kostengünstige saisonale Wärmespeicher fossile Energieträger im Winter zu ersetzen und dank effizienterer Wärmepumpen oder Vermeidung von Strom zur Produktion von Wärme im Winter das Stromnetz zu entlasten, so stehen den Ausgaben für diese Wärmespeicher die vermiedenen Ausgaben für den Ausbau der Stromproduktion, der Stromspeicherung oder der Übertragungskapazitäten gegenüber. Zudem kann auf Importe fossiler Energieträger oder Stromerzeugnisse unbekannter oder fossiler Herkunft zur Deckung des Wärmebedarfs verzichtet werden. Anstatt dessen kann der Bedarf durch erneuerbare Quellen wie Solarenergie, Wind und Abwärme gedeckt werden, welche nicht zeitgleich mit dem Bedarf zur Verfügung stehen.

Wärmespeicher leisten aus diesen Gründen wichtige Beiträge an eine effiziente und erneuerbare Energieversorgung, reduzieren CO₂-Emissionen durch Vermeidung von fossiler Wärmeerzeugung und tragen zur Versorgungssicherheit bei.

4.1 Niedertemperaturspeicher

Die Speicherung von Wärme auf einem tiefen Temperaturniveau hat den Vorteil, dass keine grossen Temperaturdifferenzen zur Umgebung entstehen, und somit die Wärmeverluste gering sind. Je nach Temperaturverlauf kann sogar netto über das Jahr oder kurzfristig im Winter ein Wärmegewinn, zum Beispiel aus umgebendem Erdreich, resultieren. Daher kann bei Niedertemperaturspeichern meist vollständig oder teilweise auf eine Wärmedämmung verzichtet werden, was die Kosten deutlich reduziert.

4.1.1 Erdreichspeicher

Beschreibung der Technik

Das Erdreich stellt auf Grund des verfügbaren Volumens eine sehr grosse thermische Kapazität dar. Diese kann mit einzelnen Erdsonden oder Erdsondenfeldern, mit Energiepfählen, Erdkörben oder Erdkollektoren bewirtschaftet werden. Diese Technologien werden im kleinen Massstab oft als reine Wärmequellen eingesetzt. Wenn grosse Entzugsdichten, wie beispielsweise in Erdsondenfeldern, realisiert werden, so müssen diese Speicher wieder beladen oder regeneriert werden, da sonst das aktivierte Volumen über die Jahre auskühlt. Durch eine nahezu ausgeglichene saisonale Bilanz der Be- und Entladung werden grosse Erdsondenfelder von reinen Energiequellen zu saisonalen Speichern. Dies gilt auch für Felder aus Energiepfählen oder grössere «mehrschichtige» Erdregister. Grosse Erdspeicher sind wirtschaftlich vor allem dann interessant, wenn sie sowohl als Wärmequelle im Winter als auch als Kältequelle im Sommer genutzt werden können.

Beispiel

In der Schweiz existieren einige Beispiele in Kombination mit «Anergienetzen» [9], PVT-Kollektoren [10] oder auch Luft-Wärmetauschern [11], über welche die Regeneration der Wärme im Sommer bewerkstelligt wird. So wurden beispielsweise bei der Familienheim-Genossenschaft Zürich [12], im Suurstoffi Areal in Rotkreuz [13] oder bei der ETH Höggerberg [14] mehrere zehntausend Sondenmeter gebohrt, welche saisonal bewirtschaftet werden.

Kosten und Lebensdauer

Auf Grund der Technologie fallen die Kosten nicht für das eigentliche Speichermedium Erdreich an, sondern für die Erschliessung durch Wärmetauscher. Aufgrund der tiefen Betriebstemperaturen und den langjährigen Erfahrungen mit den eingesetzten Materialien können Lebensdauern von 50 Jahren und mehr angenommen werden.



Abbildung 5: Bohrungen für den ersten Erdsondenspeicher der Familienheim-Genossenschaft Zürich (Bild: Matthias Kolb).

Temperaturniveau und Speicherdichte

Die mittlere Temperatur des oberflächennahen Erdreiches liegt wenige Grad über der mittleren Umgebungstemperatur. In der Schweiz also bei ca. 10–15 °C. Diese Temperaturen werden bei der Beladung über- und bei der Entladung unterschritten. Um Schäden zu verhindern, sollte der Gefrierpunkt im Erdreich nicht unterschritten werden. Wenn Wasser als Wärmeträger in den Sondenrohren eingesetzt wird, bestimmen Sicherheitsaspekte im System (kein Einfrieren der Verdampfer der Wärmepumpen) die minimale Temperatur, welche dann einige Grad über dem Gefrierpunkt liegt. Meist werden die Beladetemperaturen auf einen Bereich von 20–30 °C begrenzt. Auf Grund des Wärmeleitwiderstands des Erdreichs und der Wärmediffusion im Erdreich erreicht der Grossteil des bewirtschafteten Erdvolumens Temperaturen merklich unter den Beladetemperaturen der Sonde.

Speicherverluste

Bei Tieftemperaturspeichern sind übers Jahr gemittelt keine Speicherverluste zu erwarten. Bei vielen Anwendungen mit Doppelnutzung ist ein hoher thermischer Austausch mit dem umgebenden Erdreich sogar wünschenswert.

Sicherheit

Das Bohren von Erdwärmesonden ist in einigen Gebieten aus Grundwasserschutzgründen nicht zulässig. Grundsätzlich bestehen aber vor allem bei der Nutzung von Wasser als Wärmeträgerfluid keine Sicherheitsbedenken.

4.1.2 Aquiferspeicher

Beschreibung der Technik

Grundwasserleiter können unter Umständen als thermische Speicher genutzt werden. Bedingung dazu sind eine hohe Wasserdurchlässigkeit der grundwasserführenden Schicht, eine gute Dichtheit der begrenzenden Schichten und eine sehr geringe Fließgeschwindigkeit [15]. Dazu wird im Sommer Grundwasser aus einem «kalten Brunnen» gepumpt, erwärmt und in einem «warmen Brunnen» wieder zurückgeführt. Im Winter wird dann in entgegengesetzter Richtung gepumpt und das erwärmte Grundwasser aus dem «warmen Brunnen» entnommen und ausgekühlt. Diese Technologie ist vor allem in Holland weit verbreitet, wo grosse oberflächennahe Grundwasserleiter ohne wesentliche Strömung vorhanden sind. Die Erschliessung eines Grundwasserleiters wird meist dann realisiert, wenn sowohl ein Wärme- als auch ein Kältebedarf bedient werden muss. In der Schweiz darf Grundwasser nur lokal

stark eingeschränkt um mehr als 3 K erwärmt oder ausgekühlt werden [16]. Für eine Bewilligung muss also ein lokaler Grundwasserfluss eindeutig ausgeschlossen werden können.

Beispiel

In Holland sind bereits mehrere tausend Aquiferspeicher zur Wärmenutzung im Winter und zur Kältenutzung im Sommer in Betrieb. Dabei ist z.B. im Stadtzentrum von Utrecht bereits eine hohe Dichte erreicht, so dass ein weiterer Ausbau nur bedingt möglich ist [17].



Abbildung 6: Wärme und Kälte-Zonen von zahlreichen Aquiferspeichern in Utrecht (Reprinted from Energy Policy, Volume 66, Martin Bloemendal / Theo Olsthoorn / Frank Boons, How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage, Pages 104–114, Copyright (2014), with permission from Elsevier)

Kosten und Lebensdauer

Mit Aquiferspeichern können grosse Speichervolumen zu geringen Kosten erschlossen werden. Allerdings braucht es aufwändige geologische Abklärungen vor der Realisation. Die Investitionskosten sind dabei hauptsächlich der Erschliessung zuzuschreiben. Einige Kantone erheben Gebühren auf die thermische Nutzung von Grundwasser. Die Lebensdauer ist auf Grund der mit der Zeit auftretenden Verschmutzung und Verstopfung der Brunnen stark abhängig von den Bedingungen, respektive von der Zusammensetzung des Wassers im Aquifer. Es kann mit ca. 30 Jahren Betrieb gerechnet werden [18], ohne dass neue Brunnen gebohrt werden müssen.

Temperaturniveau und Speicherdichte

Weil die Temperatur gegen das Erdinnere zunimmt, können tiefere Speicher auf höheren Temperaturniveaus betrieben werden. Bei grossen Speichern kann der Grundwasserleiter aber auch über das Temperaturniveau des umgebenden Erdreiches aufgeheizt werden. Der Übergang zur Speicherung auf direkt nutzbarem Temperaturniveau ist hier fliessend. Einmal erschlossen, können auch grosse Volumen bewirtschaftet werden. Die Speicherdichte ist hier eine wenig relevante Grösse.

Speicherverluste

Bei Tieftemperaturspeichern, respektive bei Speicherung auf dem in der betreffenden Schicht natürlichen Temperaturniveau, sind übers Jahr gesehen keine relevanten Speicherverluste zu erwarten.

Sicherheit

Es sind für den Betrieb von Aquiferspeicher keine relevanten Sicherheitsaspekte bekannt.

4.1.3 Eisspeicher

Beschreibung der Technik

Eisspeicher werden hauptsächlich als Phasenwechselspeicher betrieben. Entzieht man Wasser bei 0 °C Wärme, so wird dieses zu Eis ohne dass sich die Temperatur weiter abkühlt. Erst wenn alles Wasser gefroren ist sinkt die Temperatur unter 0 °C. Wärmezufuhr bringt dieses Eis zum Schmelzen. Auf diese Weise können Eisspeicher Wärme liefern unter Eisbildung, und Kälte liefern während dem Schmelzprozess.

Die Speicherung von Kälte in Eis wurde vor allem in Japan für das Brechen von Lastspitzen und entsprechend zur Vermeidung hoher Stromkosten über die Mittagsstunden in grossem Stil betrieben. In den letzten Jahren wurden Eisspeicher in Deutschland und der Schweiz vermehrt auch als Quelle von Wärmepumpen zu Heizzwecken eingesetzt, meist in Kombination mit Solarwärme. In diesen Anlagen ersetzen Eisspeicher in Kombination mit Solarkollektoren andere Wärmequellen wie Luft oder Erdsonden. Der Eisspeicher dient dabei zur Überbrückung von sehr kalten Tagen oder Perioden mit Schnee auf den Kollektoren.

Beispiele

In der Minergie-P Sanierung der Siedlung La Cigale in Genf wurden insgesamt 60 m³ Eisspeichervolumen (Abbildung 7, links) in Kombination mit 1740 m² unverglasten selektiven Solarkollektoren und einer Wärmepumpe für das Beheizen von Mehrfamilienhäusern mit 273 Wohnungen installiert [19,20]. Ein ähnliches Systemkonzept mit 210 m³ Eisspeicher (Abbildung 7, rechts) und 120 m² Solarkollektoren wurde im Gewerbepark der Elektrizitätswerk Jona-Rapperswil AG (EWJR AG) für eine Mischnutzung aus Wohnen und Gewerbe in Rapperswil-Jona verfolgt [21]. Im Gegensatz zum Eisspeicher von La Cigale wurde hier der Behälter aus Beton gefertigt und die Wärmetauscher sind durch kurzfristige Wärmezufuhr enteisbar.



Abbildung 7: links: 60 m³ Eisspeichervolumen für 273 Wohnungen in der Minergie-P Sanierung La Cigale in Genf (Bild: Energie Solaire SA); rechts: Eisspeicher der EWJR AG in Rapperswil-Jona mit enteisbaren Wärmetauschern vor dem Befüllen (Bild: SPF).

Kosten und Lebensdauer

Die Kosten von Eisspeichern sind vor allem gegeben durch den Behälter, der üblicherweise aus Beton oder Stahl gefertigt ist, und durch die Wärmetauscher. Das Speichermedium Wasser ist im Gegensatz dazu kostenmässig nicht relevant. Als Richtwert für die Lebensdauer kann von ca. 30–50 Jahren ausgegangen werden.

Temperaturniveau und Speicherdichte

Das Temperaturniveau des Eisspeichers liegt auf Grund des Schmelzpunktes von Wasser bei 0 °C. Somit kann Kälte für die meisten Anwendungen auf einem Nutzt Temperaturniveau (zum Beispiel für Gebäudekühlung oder Lebensmittelkühlung) gespeichert werden. Für Wärmeanwendungen ist jedoch eine Wärmepumpe zur Anhebung des Temperaturniveaus erforderlich. Die Schmelzenthalpie von Wasser definiert mit 333 kJ/kg (93 kWh/t) auch die erreichbare Speicherdichte. Um eine vergleichbare Energiemenge durch sensible Wärmespeicherung in Wasser erreichen zu können, müsste dieses von 0 °C auf 80 °C aufgeheizt werden. Theoretisch kann die Speicherdichte eines Eisspeichers durch Kombination mit sensibler Wärmespeicherung und Anhebung der Temperatur auf 80 °C verdoppelt werden.

Speicherverluste

Eisspeicher zur Wärmespeicherung weisen meist keine Verluste an die Umgebung auf, da diese in der Regel wärmer ist als der Eisspeicher und somit der Wärmeaustausch zu Wärmegewinnen führt.

Sicherheit

Das Speichermedium Wasser ist sicherheitstechnisch unbedenklich.

4.2 Nutzwärmespeicher

Nutzwärmespeicher werden auf ein Temperaturniveau beladen, welches es erlaubt, die Wärme ohne Einsatz einer Wärmepumpe direkt für die angestrebte Anwendung einzusetzen. Für Gebäudeheizungen und Warmwasser sind dies meist Temperaturniveaus von 40–90 °C. Für Wärmenetze, welche mit Dampf betrieben werden, können Temperaturniveaus über 100 °C erforderlich sein. Für industrielle Prozesse kommen prozessspezifisch teils noch höhere Temperaturen für die Speicherung von Wärme in Frage. Mit der Temperaturdifferenz zur Umgebung steigen jedoch auch die Wärmeverluste. Bei der Prozesswärme ist saisonal nicht mit stark erhöhtem Verbrauch im Winter gegenüber dem Sommer zu rechnen. Somit ist es meist unwirtschaftlich, saisonale Wärmespeicher auf sehr hohem Temperaturniveau zu betreiben. Eine Ausnahme besteht allerdings bei Aquiferspeichern in tiefen Erdschichten, welche von Natur aus hohe Temperaturen aufweisen und deshalb auch keine zu hohen Speicherverluste haben. Für alle anderen Anwendungen beschränken sich die hier portraitierten Techniken jedoch auf Speicher mit Temperaturen unter 100 °C, was auch den grössten Teil (>75 %) des Wärmebedarfs in der Schweiz abdeckt.

4.2.1 Oberirdische Speicherbehälter

Beschreibung der Technik

Oberirdische Speicherbehälter werden meist zur sensiblen Wärmespeicherung in Wasser zwischen 10 und 95 °C eingesetzt⁷. Die Behälter sind meist aus Stahl, wobei zur Speicherung von Trinkwarmwasser, welches immerzu neuen Sauerstoff ins System führt, aus Korrosionsschutzgründen meist Edelstahl oder emaillierte Behälter zur Anwendung kommen. Wasser, welches nicht erneuert wird, kann auch in gewöhnlichen Stahlbehältern gespeichert werden, was die Kosten deutlich reduziert. Meist sind die eingesetzten Wasserspeicher mit Druck beaufschlagt und deshalb aus Gründen der Stabilität von zylindrischer Bauform. Alternative Behältermaterialien sind Kunststoffe, in welchen das Wasser bei Umgebungsdruck gelagert werden kann, und Beton. Eine Teilenthärtung des Wassers ist oft erforderlich, weil sich Kalk vor allem an den wärmeren Stellen der Beladewärmetauscher ablagern und so die Wärmeübertragung behindern oder zu Betriebsstörungen führen kann. Aus Gründen des Korrosionsschutzes ist jedoch eine vollständige Enthärtung zu vermeiden.

Beispiel

Grosse oberirdische Speicherbehälter werden seit vielen Jahren zur Speicherung von Wärme und Kälte eingesetzt. In der Schweiz sind vor allem die Saisonspeicher der Firma Jenni Energietechnik AG bekannt [22,23], mit Behältern bis 15 MWh Speicherkapazität.



Abbildung 8: links: Transport eines grossen Wasserspeichers vom Werk auf die Baustelle per Sattelschlepper; rechts: Aufstellen der Speicher in Niedrigenergie-Solarhäusern in Deutschland (Bild: Jenni Energietechnik AG).

⁷Speicherung von Wärme auf höheren Temperaturen als 100 °C ist möglich unter Beaufschlagung von höheren Drücken.

Kosten und Lebensdauer

Die Kosten des Speichermediums fallen bei Wasserspeicher selbst unter Berücksichtigung einer Vorbehandlung (Enthärtung) kaum ins Gewicht. Ausschlaggebend für die Kosten sind in erster Linie das Behältermaterial und die Wärmedämmung, gefolgt von Wärmeübertrager und Pumpen für die Be- und Entladung, sofern letztere nicht durch die Wärmeverteilung bereits vorhanden sind. Die Lebensdauer reicht von 25 Jahren im Minimum bis über 50 Jahre.

Temperaturniveau und Speicherdichte

Die Speicherdichte von Wasser hängt von der Temperaturdifferenz zwischen dem entladenen und dem beladenen Zustand ab. Eine Temperaturspreizung von 20 auf 90 °C entspricht dabei etwa 80 kWh Wärme pro m³ Volumen⁸.

Speicherverluste

Die Speicherverluste sind je nach Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und nach eingesetzter Isolationstechnik (Steinwolle, Hochleistungsisolation) sehr unterschiedlich. Steht der Speicher in einer beheizten Umgebung, so tragen Wärmeverluste des Speichers in der Heizperiode zur Beheizung des Objektes bei, und sind somit keine Systemverluste. Steht der Speicher jedoch im Freien, so sind die Wärmeverluste zum einen höher auf Grund der grösseren Temperaturdifferenz zur Umgebung, und zum anderen sind sie auch endgültig für das System verloren.

Für die saisonale Speicherung muss in der Regel mit ca. 20% Wärmeverlusten gerechnet werden, von denen auch bei Platzierung im beheizten Raum nur ein Teil an die Beheizung des Raumes angerechnet werden kann. Erfolgt eine Aufstellung im Aussenbereich, so sind die Wärmeverluste deutlich höher.

Sicherheit

Der Volumenausdehnung des Wassers bei der Erwärmung ist durch das notwendige Expansionsvolumen und Drucksicherheitsventile Rechnung zu tragen. Ansonsten bieten Wasserspeicher kaum sicherheitsrelevante Herausforderungen.

4.2.2 Erdbeckenspeicher

Beschreibung der Technik

Sehr grosse Wasserspeicher lassen sich in künstlichen Erdbecken realisieren. Dazu wird ein Erdbecken ausgehoben und der Aushub wird als Wall um den Aushub aufgeschüttet. Das so entstandene Erdbecken wird mit Kunststoffolie (z. Bsp. HD-PE) ausgelegt, abgedichtet und mit Wasser gefüllt. Einige der älteren Erdbeckenspeicher wurden gegen das Erdreich wärmedämmend, jedoch meist mit mässigem Erfolg. Grössere Erdbeckenspeicher (mehrere 10'000 m³ Volumen) der neueren Generation in Dänemark werden inzwischen ohne Wärmedämmung gegenüber dem Erdreich realisiert. Gegen oben wird jedoch immer eine wärmedämmende Abdeckung installiert, welche bei den Speichern neuerer Bauart meist als schwimmende Abdeckung realisiert wird. Eine bessere Stabilität kann erreicht werden, wenn die Grube nicht nur mit Wasser, sondern mit wassergesättigtem Kies gefüllt wird (Kies- oder Schotterpeicher). Dadurch wird zwar die Wärmespeicherkapazität pro Volumen um den Faktor 1.3-2[24] vermindert, dafür kann jedoch das Areal über dem Speicher genutzt werden, weil die Konstruktion druckstabil ist.

Beispiel

Grosse Erdbeckenspeicher wurden in letzter Zeit insbesondere in Dänemark realisiert, immer in Kombination mit Nah- oder Fernwärmenetzen und meist in Verbindung mit grossen Solarwärmeanlagen. Der grösste bis heute installierte Erdbeckenspeicher der Fernwärme Vojens (DK)[25] umfasst 200'000 m³ Wasser und dient zur Speicherung eines Teils der Wärme von 70'000 m² Solarkollektoren.

⁸ 1.16 kWh/(m³K)

Kosten und Lebensdauer

Die Kosten von Erdbeckenspeichern sind im Wesentlichen gegeben durch den isolierenden Deckel (ca. 60 %), den Aushub, die Folienauskleidung (je ca. 15 %), sowie dem Wasser (ca. 10 %)[26]. Die Lebensdauer der verwendeten Auskleidungsfolien wird von den Herstellern auf Grund der für PE relativ hohen Temperaturen in diesen Speichern mit 20 Jahren angegeben. Trotz der im Vergleich zu anderen Techniken relativ tief eingeschätzten Lebensdauer der Folie erreicht diese Speichertechnik insgesamt die tiefsten LCOES von allen betrachteten Techniken, die in der Lage sind, Wärme auf Nutztemperaturniveau saisonal zu speichern (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 9: Erdbeckenspeicher von Dronninglund, DK (62'000 m³) links: fertig mit Deckel; rechts: beim Befüllen (mit freundlicher Genehmigung von NIRAS, Aalborg).

Temperaturniveau und Speicherdichte

In Erdbeckenspeichern lässt sich Wasser bis ca. 90 °C speichern und die Speicher können schichtend bewirtschaftet werden. Die Speicherdichte hängt stark von der Temperaturdifferenz und somit von der Anwendung und der Systemeinbindung ab. Durch die ergänzende Entladung mittels Wärmepumpe können diese Speicher auf ein tiefes Temperaturniveau im Winter entladen werden, wodurch eine wesentlich höhere Speicherdichte erreicht wird.

Speicherverluste

Die spezifischen Speicherverluste hängen von der Isolation und der Speichergrosse ab. Je grösser der Speicher, desto geringer die spezifischen Verluste. Bei grossen Projekten wurden auch ohne Isolation gegen das Erdreich Speicherverluste von lediglich ca. 10 % über ein ganzes Jahr erreicht[26].

Sicherheit

Das Speichermedium Wasser ist sicherheitstechnisch unbedenklich. Die schwimmenden Isolationsdeckel müssen jedoch abgesperrt werden, da sich insbesondere nach Regen Wasserlachen unterschiedlicher Tiefe bilden können, die ein Ertrinkungsrisiko darstellen.

4.2.3 Erdsondenspeicher

Beschreibung der Technik

Erdsondenfelder können auch auf direkt nutzbare Temperaturniveaus beladen werden. Dabei wurden in bisherigen Umsetzungsprojekten Temperaturen bis ca. 80 °C realisiert. Bei derart hohen Temperaturen müssen temperaturstabile Kunststoffe (meist vernetztes Polyethylen PEX) für die Erdsonden verwendet werden[27]. Diese Speicher werden dann gegen oben mit Wärmedämmung versehen und gegen Regenwasser abgedichtet, um die Verluste zu reduzieren. Mit einer seriellen Verschaltung der einzelnen Sonden vom Kern hin zu den äusseren Regionen bei der Beladung, respektive in umgekehrter Richtung während der Entladung, kann eine Art konzentrische Schichtung mit warmem Kern und kälteren Randgebieten erzeugt werden[28]. Dadurch werden Verluste verringert und es kann bei der Be- und Entladung eine höhere Temperaturdifferenz von 10–20 K gefahren werden.

Beispiel

Es gibt einige Beispiele von Hochtemperaturwärmespeichern in Deutschland und Dänemark. Am bekanntesten ist wohl der Erdsondenspeicher der Drake Landing Solar Community in Kanada, welcher im Sommer solar beladen wird und im Winter eine Siedlung mit ca. 50 Einfamilienhäusern beheizt. Mit dem System wurde eine solare Deckung von 90 % angestrebt und in milden Wintern sogar eine 100 % solare Versorgung erreicht [29].



Abbildung 10: Verrohrung des Erdsondenspeichers der Drake Landing Solar Community in Kanada (mit freundlicher Genehmigung von NRCan).

Kosten und Lebensdauer

Kosten fallen für die Erschliessung, d.h. das Bohren und Installieren von Erdsonden sowie für die Isolation an. Das Speichermedium Erdreich verursacht keine Kosten und auch das Areal darüber kann genutzt werden. Es wird mit einer Lebensdauer von 50 Jahren gerechnet. Allerdings fehlen Langzeiterfahrungen über diesen Zeitraum.

Temperaturniveau und Speicherdichte

Erdsondenspeicher lassen sich bis ca. 80°C beladen (Temperaturstabilität der Sondenrohre bis 95 °C). Die Speicherdichte hängt stark von der Temperaturdifferenz und somit von der Anwendung und Systemeinbindung ab. So kann durch eine ergänzende Entladung mittels Wärmepumpe auf ein tiefes Temperaturniveau im Winter eine wesentlich höhere Speicherdichte erreicht werden.

Speicherverluste

Weil eine Wärmedämmung zum umgebenden Erdreich nicht möglich ist, weisen Erdsondenspeicher, welche auf Nutztemperaturniveau betrieben werden, erheblich Verluste auf. Die relativen Verluste können durch eine Verbesserung des Volumen- zu Oberflächen-Verhältnisses minimiert werden. Es wurden einige Projekte mit Speichern in der Größenordnung von 5'000–10'000 Sondenmetern realisiert[28,30,31]. Diese weisen jedoch relative Verluste um die 50 % auf und sind damit, insbesondere wenn die Gesteungskosten für die zur Beladung verwendete Wärme nicht marginal sind, immer noch an der unteren Grenze einer wirtschaftlich vertretbaren Dimensionierung. Bei einem 20-mal grösseren Speicher würden die Verluste auf ca. 20–30 % reduziert[32], und damit auch die Wirtschaftlichkeit entsprechend verbessert.

Sicherheit

Als Wärmeträgerfluid wird meist unbedenkliches Wasser verwendet. Diese Art der Wärmespeicherung gilt als sicherheitstechnisch unbedenklich.

4.2.4 Aquiferspeicher

Beschreibung der Technik

Auch Grundwasserleiter oder Aquifere können auf direkt nutzbaren Temperaturniveaus betrieben werden. Sei dies, weil sie sich tief unter der Erdoberfläche befinden und daher bereits natürlicherweise direkt nutzbare Temperaturen aufweisen, oder weil sie im Sommer durch Beladung stark erwärmt werden. Erstere weisen dabei keine oder nur im beladenen Zustand Wärmeverluste auf oder können gar durch das umgebende Erdreich erwärmt werden. Dafür sind Erschließung und geologische Abklärungen in diesem Falle aufwändig und teuer. Es gibt jedoch langjährige Erfahrungen, beispielsweise aus dem Pariser Becken, wo schon zahlreiche Speicherdoubletten auf einer Tiefe von ca. 1500–2000 m (mit Temperaturen im Bereich 55–80 °C) realisiert wurden[33]. Diese Speicher nutzen Abwärme aus Kehrlichtverbrennung oder Kraft-Wärme-Kopplung und versorgen im Winter grosse Fernwärmenetze. In einigen Projekten wird die Transmissivität der Speicherschicht vor der Nutzung aktiv erhöht, und so ein künstlich erzeugter oder künstlich verbesserter Aquifer geschaffen.

Beispiele

Eines der bekanntesten Beispiele ist der deutsche Bundestag, bei dem Kälte in einem Grundwasserleiter auf 60 m und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung bei ca. 70°C in ein Aquifer auf 320 m Tiefe gespeichert wird[34]. In der Schweiz finden derzeit sowohl in Bern als auch in Genf Abklärungen zur Errichtung von künstlich erzeugten Aquiferspeichern in mittleren bis grossen Tiefen statt.

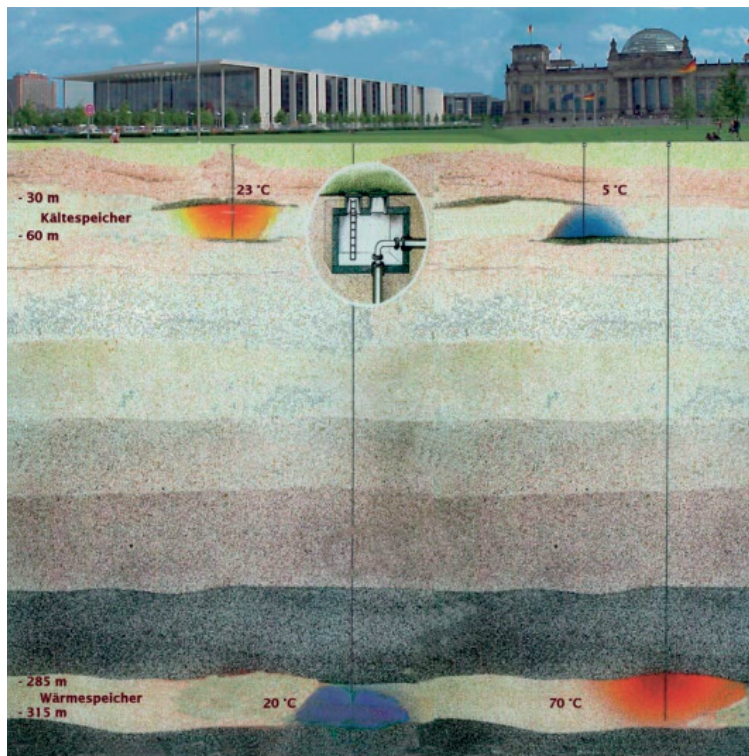


Abbildung 11: Schematische Darstellung der beiden Aquiferspeicher des Deutschen Bundestages (mit freundlicher Genehmigung der Geothermie Neubrandenburg GmbH).

Kosten und Lebensdauer

Bei dieser Technologie fallen meist beträchtliche Kosten in der Abklärungsphase an. Diese umfassen geologische Abklärungen und Gutachten und eventuell auch Probebohrungen. Dabei kann von bereits bestehenden Anlagen in der näheren Umgebung profitiert werden. Bei neuen Standorten besteht das Risiko, dass sich keine gut nutzbaren Aquifere finden lassen. Ist das Potenzial bekannt, so sind die Kosten der Realisierung stark von der Bohrtiefe (d.h. von der angestrebten Temperatur) abhängig. Bei hohen Temperaturen und Drücken sind in der Anfangsphase dieser Technik Korrosionsprobleme aufgetreten. Inzwischen sind jedoch zum Beispiel im Pariser Becken viele Anlagen schon über mehrere Jahrzehnte in Betrieb.

Temperaturniveau und Speicherdichte

Tiefe Aquifere können ohne Verluste auf höheren Temperaturen betrieben werden. Die Kapazität einer Speicherdoulette hängt hauptsächlich von der Transmissivität, aber auch von der Mächtigkeit der leitenden Schicht ab. Die Speicherdichte ist hier nicht unbedingt von hoher Relevanz.

Speicherverluste

Wenn der Speicher in einer Tiefe realisiert werden kann in welcher die natürlich vorherrschende Temperatur gleich oder höher ist als die Nutztemperatur, so sind die Speicherverluste minimal oder es resultieren durch Wärmeaustausch mit dem umgebenden Gestein sogar Gewinne. Oberflächennahe Aquiferspeicher verlieren hingegen einen Teil der gespeicherten Wärme an das umgebende Erdreich. Auch hier gilt der Grundsatz: Je grösser der Speicher, desto geringer die relativen Verluste.

Sicherheit

Die geologische Eignung des Untergrundes für tiefe Bohrungen muss abgeklärt werden. Sicherheitsrelevante Aspekte treten vor allem während der Erstellung, das heisst während den Bohrungen auf. Es besteht die Gefahr von Gasaustritt. In Projekten in denen die Transmissivität der Speicherschicht aktiv erhöht wird kann es zur Entladung von unterirdischen Spannungen und somit zu Beben kommen. Nach der Erstellung sind kaum mehr sicherheitsrelevante Probleme zu erwarten.

5.1 Sorptionsspeicher

Bei der Adsorption von Molekülen an einer Oberfläche und auch bei der Absorption in einer Flüssigkeit kann Wärme frei werden. Um dieses Wärmeerzeugungspotenzial zu regenerieren, wird der sorbierte Stoff unter Zufuhr von Wärme wieder vom Sorptionsmittel getrennt. Auf diese Art und Weise kann mit Ab- und Adsorptionsprozessen Wärme gespeichert werden [35,36]. Im Gegensatz zu den klassischen sensiblen Wärmespeichern bieten diese Prozesse die Möglichkeit, höhere Speicherdichten zu erreichen (siehe Kapitel 6.1). Zudem bleibt auch nach Abkühlen des Materials auf Umgebungstemperatur das Potenzial der Wärmeerzeugung durch Sorption erhalten.

Nachteile dieser Speichertechnik sind Temperaturverluste, welche sich aus der Differenz der Temperatur der Beladung und der effektiv bei der Entladung zur Verfügung gestellten Temperatur ergeben, sowie der höhere Aufwand für Material und Apparate. Für die meisten Techniken muss für die Entladung Wasser in dampfförmigem Zustand zugeführt werden. Der grösste Teil der bei Sorption frei werdenden Wärme entspricht dann der Phasenwechselwärme des Übergangs von Wasserdampf in den flüssigen Zustand. Da der Dampf aber auch (bei einem deutlich niedrigeren Druck und niedriger Temperatur) produziert werden muss, entspricht der Prozess einem thermisch angetriebenen Wärmepumpenprozess.

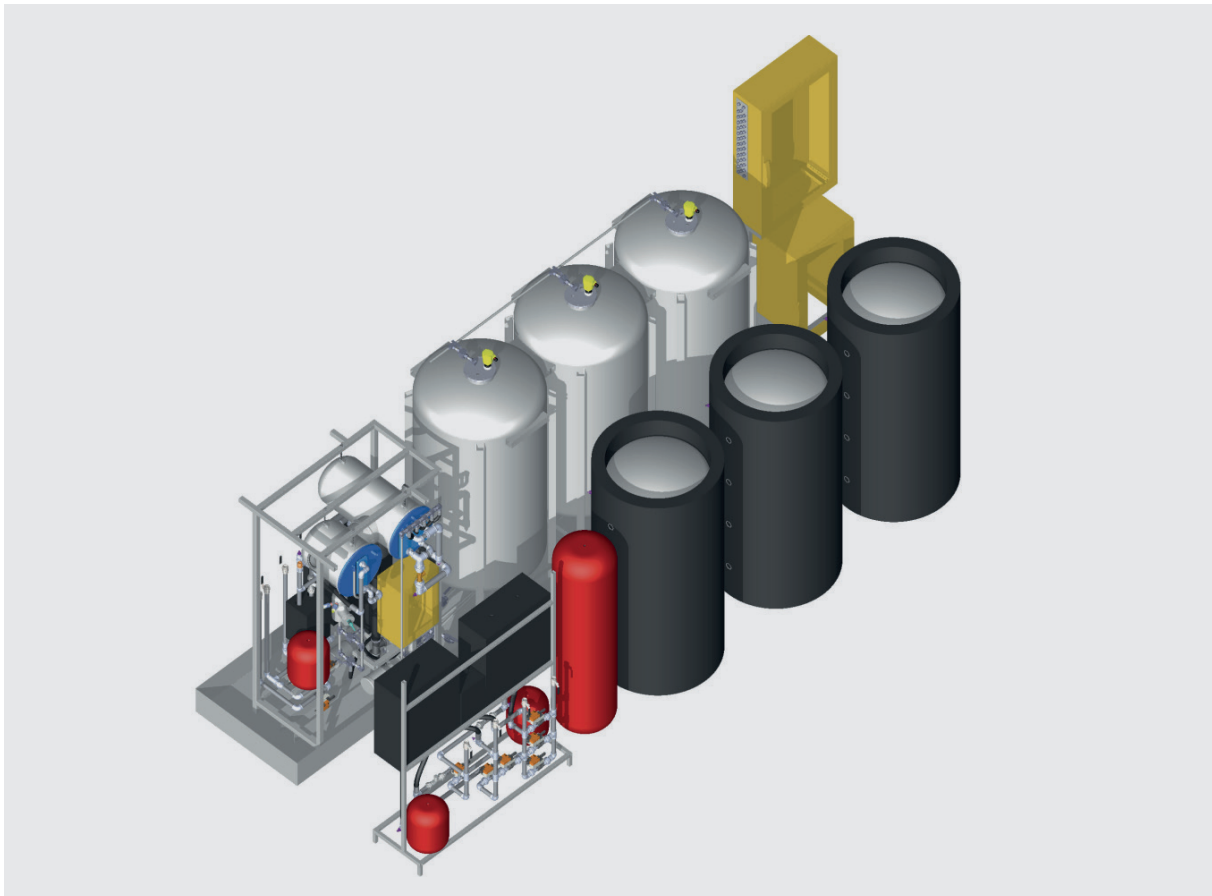


Abbildung 12: Sorptionsspeicheranlage aus dem Projekt COMTES mit Beteiligung EMPA und SPF Institut für Solartechnik (mit freundlicher Genehmigung der EMPA).

Bei der Angabe der Speicherdichten der Sorptionsspeichertechniken wird die Phasenwechselenthalpie meist mitgerechnet, obwohl im gespeicherten Material nur das Potenzial der Freisetzung dieser Wärme gespeichert ist, nicht jedoch die eigentliche Wärmeenergie selber. Letztere muss zusätzlich durch eine Niedertemperaturquelle (zum Beispiel eine Erdsonde) zum Zeitpunkt der Entladung zur Verfügung gestellt werden.

In der Schweiz werden derzeit vor allem Absorptionsprozesse mit der Stoffpaarung Natriumhydroxid + Wasser [37] untersucht. Neben weiteren Stoffpaarungen für Absorptionsprozesse wie Lithiumbromid und Lithiumchlorid in Kombination mit Wasser, ist auch die Adsorption von Wasser an Silikagel oder Zeolith von Interesse.

5.2 Phasenwechselspeicher

Als Phasenwechsel bezeichnet man den Übergang eines Stoffes vom festen in den flüssigen, respektive vom flüssigen in den gasförmigen Zustand [38,39]. Auch die bereits in Kapitel 4.1.3 behandelten Eisspeicher gehören zu den Phasenwechselspeichern. Für die Langzeitspeicherung kommen Speicher, welche auf dem Übergang von flüssig oder fest hin zu gasförmig beruhen, auf Grund der dabei auftretenden hohen Volumenzunahme praktisch nicht in Frage.

Den Vorteilen einer höheren Speicherdichte als Wasser können Phasenwechselspeicher nur dann ausspielen, wenn sie in einem relativ eng begrenzten Temperaturhub zwischen Be- und Entladung eingesetzt werden. Deshalb ist die passende Schmelztemperatur ein entscheidendes Kriterium für oder gegen eine Eignung für eine bestimmte Anwendung. Verschiedene Phasenwechselmaterialien können unter den theoretischen Schmelzpunkt abgekühlt werden, ohne dass sie erstarren und somit ihre Phasenwechselwärme abgeben wird. Dadurch kann die gespeicherte Energie bei Umgebungstemperatur saisonal gelagert werden. Bei einer späteren Anregung des Speichermaterials (bei manchen Materialien mittels Kristallisationskeim), wird die Phasenwechselwärme frei, was zu einer Temperaturzunahme des Mediums und in der Folge Wärmeabgabe auf höherem Temperaturniveau führt.

Den Vorteilen einer höheren Speicherdichte und geringerer Verluste stehen Nachteile wie höhere Kosten und Temperaturverluste durch die notwendigen Wärmeübertragungsprozesse gegenüber. Bisher werden Phasenwechselspeicher vor allem in Nischenanwendungen eingesetzt. Solche Anwendungen sind zum Beispiel die Kühlung von Lebens- oder Arzneimitteln auf eine exakt durch den Schmelzpunkt des Speichermaterial definierte Temperatur während eines Transportes, Handwärmer, welche nach Unterkühlung manuell aktiviert werden können, etc. Generell nimmt die Schmelzwärme und deshalb auch die Speicherdichte mit der Temperatur des Phasenwechsels zu (Abbildung 13), so dass gerade im Temperaturbereich $>> 100\text{ °C}$ interessante Anwendungsmöglichkeiten bestehen.

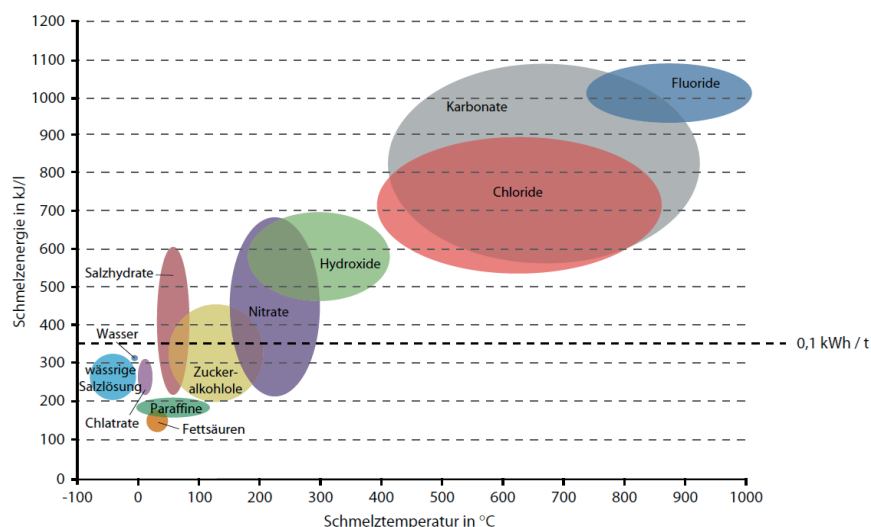


Abbildung 13: Schmelzenergie pro Volumen und Schmelztemperatur verschiedener Phasenwechselmaterialien [M. Sterner / I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, published 2014 Springer reproduced with permission of SNCSC].

Bei Phasenwechselspeichern ist die Speicherdichte sehr hoch, wenn sie als Wert pro K Temperaturhub angegeben wird und nur ein geringer Hub über den Phasenwechselpunkt angenommen wird. Als absoluter Wert in kWh/m³ jedoch ist die Speicherdichte höher, wenn der Temperaturhub erweitert wird. Dabei sinken jedoch gleichzeitig die Vorteile gegenüber einem konventionellen sensiblen Speicher.

Der Einsatz für die saisonale Speicherung grösserer Wärmemengen wurde in Forschungsprojekten untersucht⁹. Eine Markteinführung ist für diese Anwendung jedoch in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.

5.3 Hybride Speicher für Wärme, Transport, Strom

In den letzten Jahren konnten die Preise für erneuerbaren Strom aus Wind- und Solarenergie so weit reduziert werden, dass die saisonale Wärmespeicherung zunehmend nicht mehr zwingend von Wärme als Beladungsenergie ausgehen muss, sondern auch elektrische Energie in Frage kommt. Dies eröffnet völlig neue Perspektiven nach dem Prinzip Power-to-X, wobei X ein Gas sein kann, wie Wasserstoff oder Methan, aber auch ein flüssiger oder fester Energieträger, der einfacher als Gase saisonal zu speichern ist. Diese Energieträger können in der Folge als Treibstoffe dienen, aber auch zur Strom- und Wärmeproduktion. Am verbreitetsten ist sowohl in Forschung als auch in Demonstrationsanlagen die Umwandlung von Strom zu einem Gas wie Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas). Ausgehend von diesen Gasen können dann in weiteren chemischen Umwandlungen flüssige Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, deren Einsatz sich vom Einsatz heutiger Erdölprodukte kaum unterscheidet. Eine ausführlichere Betrachtung dieser Umwandlungsprozesse findet sich in Friedl u.a. [40]. Als Alternativen Speicherprozess mit welchem Solarenergie aus dem Sommer für die Wärme- und Stromproduktion im Winter gespeichert werden kann wurde der Redox-Zyklus von Aluminium vorgeschlagen. Dabei wird oxidiertes Aluminium mit elektrischer Energie reduziert und dann in elementarer Form gelagert. Dieses Material hat eine sehr hohe Speicherdichte und kann bei Bedarf jederzeit wieder in Wärme und Strom umgewandelt werden [41,42].

5.4 Sektorkopplung und Beitrag zur Stromversorgungssicherheit

Wärmespeicher können Beiträge liefern zur elektrischen Versorgungssicherheit. Werden sie als saisonale Speicher eingesetzt, so können sie den Einsatz von Wärmepumpen im Winter reduzieren oder deren Effizienz steigern und somit elektrische Energie im Winterhalbjahr einsparen. Auch kurzfristig können Wärmespeicher überall, wo Wärme benötigt wird, in Kombination mit Wärmepumpen und/oder Blockheizkraftwerken so eingesetzt werden, dass Leistungsspitzen reduziert und Stromnetze entlastet werden [43,44].

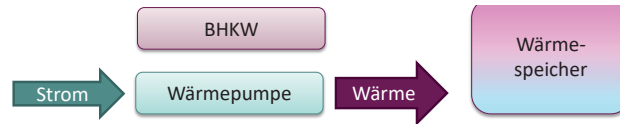
Abbildung 14 zeigt ein Beispiel, in welchem ein Wärmespeicher zur Entkopplung von Wärmeproduktion und -nachfrage so eingesetzt wird, dass immer dann Strom produziert werden kann, wenn die Nachfrage und die Preise hoch sind. Dieselbe Anlage kann zu Zeiten von Stromüberschüssen und entsprechend tiefen Strompreisen Strom aufnehmen und Wärme produzieren. Sind die Strompreise weder besonders hoch noch besonders tief, so ist weder der Betrieb des Blockheizkraftwerkes (BHKW) noch der Betrieb der Wärmepumpe interessant, und der Wärmebedarf kann vorübergehend durch den beladenen Speicher gedeckt werden.

⁹ <http://comtes-storage.eu/comtes-project/>

Angebot geringer als Nachfrage: Strompreis hoch oder Abruf von Sekundärregelleistung



Nachfrage nach elektrischer Energie geringer als Angebot: Strompreis tief oder Abruf negativer Sekundärregelleistung



Wärmebedarf: Strompreis uninteressant, respektive kein Abruf von Regelleistung



Abbildung 14: Netzdienlicher Einsatz von Wärmespeichern.

6.1 Speicherdichte und Nutzungsgrad

Zwei wesentliche Eigenschaften von Langzeit-Wärmespeichern sind die Speicherdichte und der Nutzungsgrad. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Temperaturbereiche und Speicherdichten verschiedener Wärmespeichertechniken. Während sich die volumetrischen Speicherdichten der Niedertemperaturanwendungen mit Ausnahme der Phasenwechselspeicherung fest/flüssig im Bereich von 3–30 kWh/m³ bewegen, erreichen Nutztemperatur-Wärmespeicher für Anwendungen unter 100 °C volumetrische Dichten von 30–90 kWh/m³. Grössere Speicherdichten sind möglich mit Phasenwechselmaterialien oder mit Sorptionsspeichern, wobei mit zunehmender Temperatur auch höhere Speicherdichten zu erreichen sind. Die Berechnungen der in Tabelle 1 dargestellten Speicherdichten beruhen für PCMs auf der Annahme eines Temperaturhubes von ± 5 K um den Schmelzpunkt. Für die Sorptionsmaterialien wurde von einem beladenen Wärmespeicher ausgegangen, was für Absorptionsspeicher einer konzentrierten Lösung entspricht, und für Adsorptionsspeicher dem trockenen Substrat.

Tabelle 1. Temperaturbereiche und Speicherdichten verschiedener Wärmespeichertechniken.

Technik	Temperatur		Speicherdichte pro Volumen		Speicherdichte pro Gewicht	
	unterer Wert °C	oberer Wert °C	unterer Wert kWh/m ³	oberer Wert kWh/m ³	unterer Wert kWh/t	oberer Wert kWh/t
Niedertemperatur						
Erdreich Niedertemperatur	0	30	15	30	6	15
Aquifer	10	18	3	7	1.5	3.5
Eisspeicher	-5	25	93	125	84	113
Nutztemperatur						
Wassertank & Erdbecken	10	90	69	92	69	92
Erdbecken mit Kies	20	90	50	60	20	30
Erdreich	20	80	30	60	12	30
Aquifer	20	80	30	50	15	25
Forschung, Entwicklung, Spezialanwendungen						
PCM, < 200 °C	Tpc - 5 K bis Tpc + 5 K		30	170	22	200
PCM, > 400 °C	Tpc - 5 K bis Tpc + 5 K		140	300	70	200
Sorption (Ab / Ad), < 200 °C	10 °C bis + 200 °C		100	870	90	580
Flüssigsalz (sensible Wärme)	150 - 250	400 - 500	80	150	50	110

Tpc = Phasenwechseltemperatur. Die Speicherdichte der Absorptionsspeicher bezieht sich auf das Volumen der konzentrierten Lösung und der Annahme einer minimalen Verdampfungstemperatur von 10 °C und einer minimalen Absorbieretemperatur von 20 °C. Für Adsorptionsspeicher beruht die Annahme auf dem trockenen Substrat (Zeolith, respektive Silikagel). Für alle Sorptionsprozesse wurde die Kondensationsenthalpie von Wasser, welche von der kalten (10 °C) Wärmequelle zur Verfügung gestellt wird bei Entladung, in der ausgewiesenen Wärmespeicherdichte inkludiert.

Durch Kombination von Nieder- und Nutztemperaturanwendung kann der jeweilige Temperaturbereich erweitert und die erreichbare Speicherdichte entsprechend erhöht werden. So kann zum Beispiel ein Eisspeicher nach Schmelzen des Eises auch zusätzlich als sensibler Speicher genutzt werden.

Der Nutzungsgrad sagt etwas darüber aus, welcher Anteil der eingelagerten Energie bei einer typischen Bewirtschaftung auch wieder entnommen werden kann. Tiefe Nutzungsgrade verringern die tatsächlich saisonal nutzbare Speicherdichte gegenüber den hier dargestellten Werten. Die LCOES erhöhen sich bei tiefen Nutzungsgraden ebenfalls, weil ein grösseres Speichervolumen aktiviert werden muss um den gleichen Nutzen zu erzielen, und wenn die einzuspeichernde Wärme nicht gratis zur Verfügung steht zusätzlich noch durch den Verlust von wertvoller Wärme. Die für die LCOES angenommenen Nutzungsgrade der verschiedenen Techniken sind in Anhang B aufgeführt.

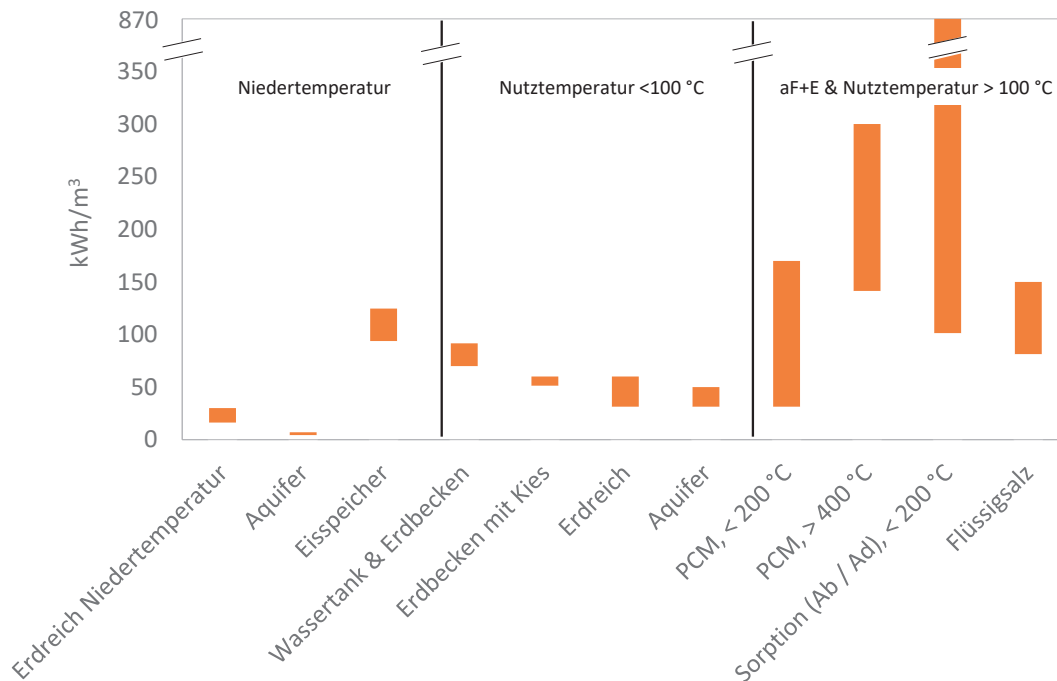


Abbildung 15: Speicherdichten thermischer Energiespeichertechniken, in Abhängigkeit von Technologien und Temperaturbereichen.

Niedertemperaturspeicher werden oft im Erdreich oder umgeben von Erdreich realisiert und weisen vor allem in der Entladephase oft geringere Temperaturen auf als das umgebende Erdreich. Aus diesem Grund führt der Wärmeaustausch mit der Umgebung nicht nur zu Verlusten, sondern auch zu Gewinnen. Oft gleichen die Gewinne die Verluste aus oder übersteigen diese sogar, weshalb bei diesen Speichern auch von Nutzungsgraden $\geq 100\%$ ausgegangen werden kann. Entsprechend kann unter Umständen mehr Wärme entnommen werden als ihnen aktiv zugeführt wurde. Dies ist bei Wärmespeichern welche auf Temperaturen deutlich über der Umgebungstemperaturen arbeiten nicht möglich. Diese weisen teilweise Nutzungsgrade deutlich unter 100% auf. Generell gilt, dass die Verluste mit der Temperatur einerseits und mit der Oberfläche andererseits zunehmen. Weil das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen bei gleichbleibender Gestalt mit steigender Speichergrösse abnimmt, sinkt der Anteil der Verluste mit der Speichergrösse, was sich zusätzlich zur economy of scale positiv auf die Wirtschaftlichkeit grosser Speicherprojekte auswirkt.

6.2 Wärmespeicherkosten

Abbildung 16 zeigt die LCOES (Levelized Cost of Energy Storage) für die verschiedenen Wärmespeichertechniken, mit und ohne Preis für den Einkauf von Wärme zur Speicher-Beladung. Die CAPEX und OPEX (Definition siehe Annex A) der jeweiligen Speichertechnologien wurden hier bezogen auf die jährlich ausgespeicherten Energiemengen. Diese können neben der saisonal gespeicherten Energie auch kurzfristiger gespeicherte Energiemengen enthalten. Werden die Speicherkosten nur auf die saisonal gespeicherten Energiemengen überwälzt, so können insbesondere bei den Wasserspeichern, welche typischerweise als Lang- und als Kurzzeitspeicher genutzt werden, erheblich höhere Werte resultieren.

Die Kosten, welche für Erdbecken mit Kiesfüllung ausgewiesen werden, sind mit Vorsicht zu betrachten. Für diese Technik konnten mit Ausnahme eines einzigen Projektes kaum Kostendaten gefunden werden¹⁰.

¹⁰ Das ausgewertete Kiesspeicher-Projekt hatte zudem mit erheblichen technischen Problemen zu kämpfen. Es ist deshalb unklar, ob unter günstigeren Bedingungen mit dieser Technik nicht auch deutlich geringere LCOES erreicht werden können.

Wärmespeicherkosten sind in der Regel stark abhängig von der Grösse des realisierten Wärmespeicherprojektes (Abbildung 17 und Abbildung 18). Tiefe Kosten von < 100 CHF/MWh für die saisonale Speicherung von Wärme werden meist nur mit Speicherkapazitäten > 1000 MWh realisiert.

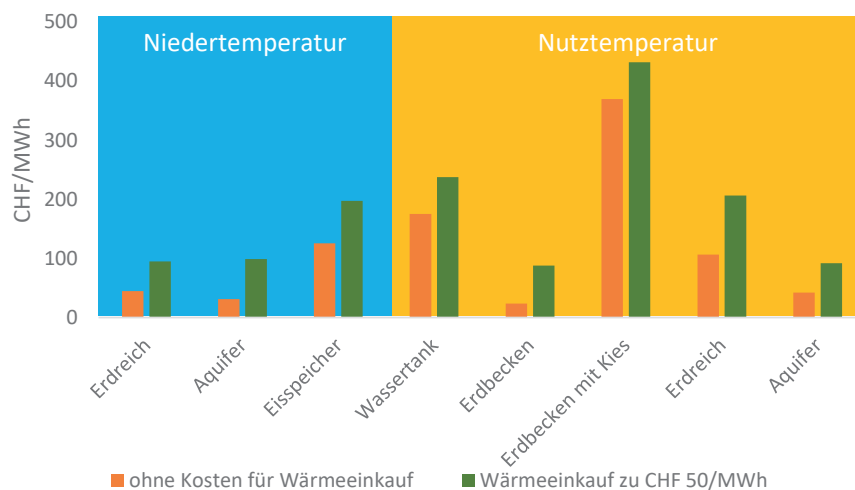


Abbildung 16: LCOES pro Wärmeumsatz (= über das Jahr ausgespeicherte Energiemenge) für verschiedene Wärmespeichertechniken, mit und ohne Preis für den Wärmeeinkauf zur Speicherbeladung.

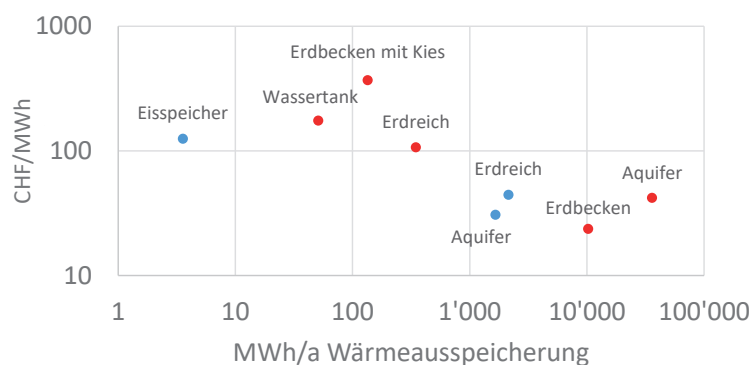


Abbildung 17: LCOES ohne Kosten für Wärmeeinkauf in Abhängigkeit von der Speichergrosse (rot = Nutz-, blau = Niedertemperaturniveau).

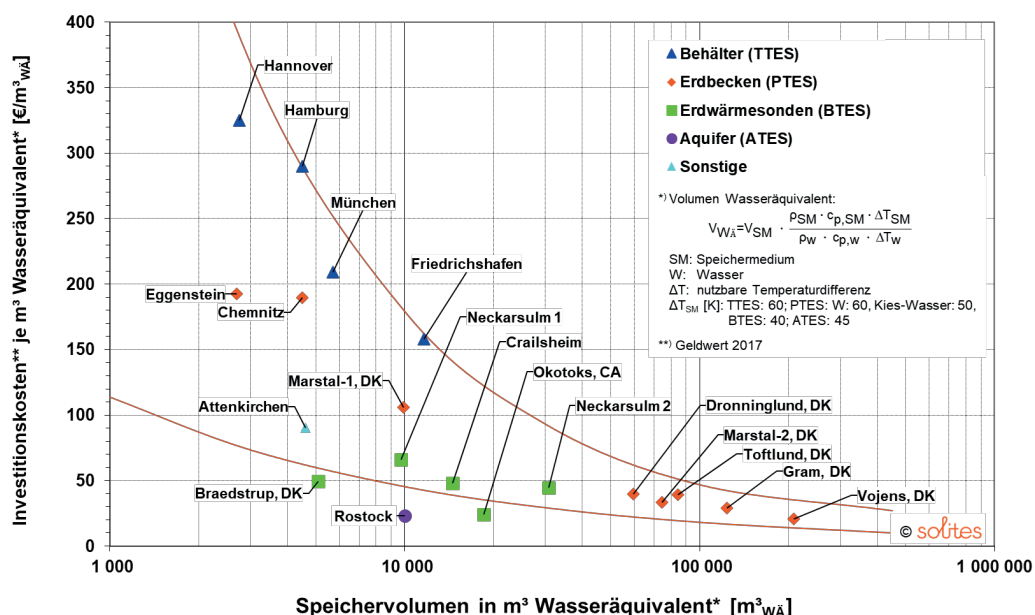


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und spezifischen Investitionskosten (mit freundlicher Genehmigung von Solites, Stuttgart).

Wärmespeicher und Power-to-X sind vermutlich die Schlüsseltechnologien, welche es ermöglichen, auch im Winter den Bedarf an Wärme, Strom und Transport zu einem grossen Teil durch einheimische erneuerbare Energien zu decken. Reine Wärmespeicher können dabei einen grossen Beitrag an die bedarfsgerechte Wärmeversorgung leisten und die Stromerzeugung und Stromübertragung vor allem in Spitzenzeiten und im Winter entlasten. Dies gilt insbesondere für ein System, in welchem Solarenergie und Wärmepumpen die derzeit vorherrschenden fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas weitgehend ersetzt haben werden.

Die Beladung der Wärmespeicher erfolgt idealerweise durch Abwärme, Solarwärme, Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke. Letztere verwenden vorzugsweise Biomasse oder andere erneuerbare Energieträger als Brennstoff.

Die derzeit im Markt am weitesten verbreiteten Wärmespeicher verwenden Wasser oder Erdreich / Gestein als Speichermaterial und speichern sensible Wärme, was zwangsläufig mit einer Temperaturerhöhung des Speichermediums verbunden ist, über welche auch die nutzbare Speicherkapazität bestimmt wird. Von den Phasenwechselspeichern konnten sich bisher nur die Eisspeicher im Bereich der saisonalen oder teil-saisonalen Wärmespeicherung am Markt etablieren. Andere Phasenwechselspeicher sowie auch Sorptionsspeichertechniken, welche derzeit in Nischenanwendungen am Markt sind, befinden sich für den Zweck der Langzeitspeicherung im Stadium der Forschung und Entwicklung, weswegen für diese Anwendung derzeit auch noch keine Marktpreise zu beziffern sind.

Als prinzipielle Tendenz kann festgehalten werden, dass die Kosten der Wärmespeicherung vor allem dann gering sind, wenn die Wärme auf tiefem Temperaturniveau – und somit praktisch verlustfrei – gespeichert werden kann. Dies erfordert jedoch zum Zeitpunkt der Nutzung den Einsatz einer Wärmepumpe, und entsprechend den Einsatz von elektrischer Energie. Der Nutzen dieser Wärmespeicher besteht darin, dass die Wärmepumpe dank höherer Temperaturen der Wärmequelle im Vergleich zur Aussenluft weniger elektrische Energie und auch weniger elektrische Spitzenleistung benötigt. Dies wiederum entlastet das Stromnetz insbesondere zu Zeiten mit hohem Wärmedarf und tiefen Aussenlufttemperaturen, d.h. im Januar und im Februar. Zudem kann auf Aussenluftwärmetauscher und die damit einhergehenden Raumansprüche sowie optische und lärmemissionstechnische Nachteile verzichtet werden. Die Kosten solcher Niedertemperatur-Saisonspeicher sind mit Ausnahme der Eisspeicher unter 50 CHF/MWh.

Für die Speicherung von Wärme auf dem Temperaturniveau des Wärmebedarfs können sehr tiefe Kosten nur dann realisiert werden, wenn die zu speichernde Energiemenge sehr hoch ist und in einem zusammenhängenden erdgelagerten Volumen gespeichert werden kann. Hier sind mit grossen Erdbecken- und Aquiferspeichern ebenfalls Kosten unter 50 CHF/MWh möglich. Auf Grund der erforderlichen Speichermengen sind diese Techniken abhängig von hohem Wärmebedarf, was zwangsläufig auf einen Grossverbraucher oder auf ein mittelgrosses Wärmenetz hinaus läuft. Zudem muss der Untergrund geeignet sein für die entsprechenden Techniken. Diese Speicherprojekte können nicht realisiert werden, wenn ein bewegter Grundwasserleiter vorhanden ist, der die gespeicherte Wärme im Verlauf des Jahres abtransportieren würde.

Für einzelne Wärmebezugsobjekte, zum Beispiel Ein- oder Mehrfamilienhäuser in lockerer Überbauung, sind saisonale Wärmespeicher auf Nutztemperaturniveau mit deutlich höheren Kosten verbunden. Rechnet man als Nutzen dieser Wärmespeicher nur die saisonal gespeicherte Energiemenge an, so liegen diese Kosten im Bereich von 500 CHF/MWh. Verteilt man die Kosten auch auf die kurzfristig über den Speicher geführte Wärmeenergie, so reduzieren sich diese auf 150–250 CHF/MWh.

Einsatz und Verbreitung von Wärmespeichern sind abhängig von den finanziellen Anreizen, die gesetzt werden. So lange die Energiekosten für den Endkunden nicht abhängig sind von der Zeit, besteht kein

Anreiz, den Energiebezug durch den Einsatz eines Wärmespeichers zu verschieben. Bei der Einspeisung von Solarenergie und Abwärme, die hauptsächlich im Sommer in grosser Menge zur Verfügung stehen, ist die zeitliche Abhängigkeit praktisch immer gegeben. Bei den heute implementierten Stromtarifmodellen fehlen entsprechende Anreize für die Endkunden weitgehend, so lange nicht mit entsprechenden Konzepten und Kapazitäten an Regelenergiemärkten teilgenommen werden kann. Hier besteht erheblicher Spielraum, um die tarifären Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass diese Technologien gewinnbringend eingesetzt werden können.

In der Schweiz wurden bisher hauptsächlich oberirdische Wasserspeicher und Erdsondenfeldern auf tiefem Temperaturniveau umgesetzt. Beispiele aus dem Ausland zeigen jedoch, dass auch Aquiferspeicher, Erdwärmespeicher auf höheren Temperaturniveaus und Erdbeckenspeicher als kostengünstige Varianten bei entsprechender Grösse erstellt werden können. Die geographische Häufung dieser Projekte (Aquiferspeicher in Holland und Erdbeckenspeicher in Dänemark) lässt folgern, dass solche Projekte erst nach dem Erlangen von Umsetzungs- und Betriebserfahrungen in grossen Zahlen umgesetzt werden. Aus diesem Grunde sollten Pilot und Demonstrationsprojekte dieser Technologien forciert werden. Gleichzeitig sollte bei der Planung und Überwachung der Wärmespeicher nicht nur die energetische Bilanz, sondern auch die exergetische Bilanz, die sich durch das Erhalten des Temperaturniveaus auszeichnet, berücksichtigt werden.

Die in diesem Bericht gemachten Aussagen stützen sich im Wesentlichen auf die Literatur und Umsetzungsbeispiele der einzelnen Speichertechniken. Die Schlussfolgerungen entsprechen der Expertenmeinung der Autoren und der Lektoren.

- [1] J. Remund, Solarpotenzial Schweiz - Solarwärme und PV auf Dächern und Fassaden, Meteotest im Auftrag von Swissolar, Bern, 2017.
- [2] A. Kemmler, S. Koziel, P. Wüthrich, B. Notter, M. Keller, M. Jakob, G. Catenazzi, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2016 nach Verwendungszwecken, Bern, 2017. file:///d:/temp/Verwendungszwecke2013_Bericht_140930.pdf [accessed March 31, 2015].
- [3] Bundesamt für Energie BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2016, Bern, 2017.
- [4] A. Kirchner, Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 - Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 - 2050, 2012.
- [5] P. Rundel, et al., Speicher für die Energiewende, Fraunhofer UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg, 2013.
- [6] M. Sterner, I. Stadler, Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. <http://www.springer.com/de/book/9783642373800> [accessed August 27, 2017].
- [7] R.A. Huggins, Energy storage - Fundamentals, Materials and Applications, 2nd Edition, Springer, 2016.
- [8] A. Abdon, X. Zhang, D. Parra, M.K. Patel, C. Bauer, J. Worlitschek, Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales, Energy. 139 (2017) 1173–1187. doi:10.1016/j.energy.2017.07.097.
- [9] F. Ruesch, M. Rommel, M. Kolb, T. Gautschi, Heat and Cold Supply for Neighborhoods by Means of Seasonal Borehole Storages and Low Temperature Energetic Cross Linking, in: Proceedings of CISBAT 2013 International Conference, EPFL, Lausanne, 2013: pp. 835–840.
- [10] A. Baggenstos, P&D Projekt Oberfeld - Monitoring einer PVT Grossanlage - Ergebnisse aus dem ersten Betriebsjahr 2015, in: 26. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, OTTI e.V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 2016. P:\SPF-Publikationen\2016\OTTI TSE\Aleksis Baggenstos_P&DOberfeld\Paper\OTTI2016_Paper_Oberfeld_AleksisBaggenstos_mitHeader.pdf.
- [11] S. Signorelli, E. Rohner, Betriebsverhalten des Geothermiespeichers «The Dolder Grand», Bundesamt für Energie BFE Forschungsprogramm Geothermie, Bern, 2011. <https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj0-fu8PvcAhXoo4sKHVSnAV4QFjAAegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fwww.bfe.admin.ch%2Fphp%2Fmodules%2Fenet%2Fstreamfile.php%3Ffile%3D000000011307.pdf%26name%3D000000291066&usg=AOvVaw0RZYSCN2HBTxpuJ8FrL1RG> [accessed August 20, 2018].
- [12] F. Ruesch, M. Rommel, J. Scherer, Pumping Power prediction in Low Temperature District Heating Networks, in: CISBAT 2015, Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), EPFL, Lausanne, Switzerland, 2015: pp. 753–758. p:\SPF-Publikationen\2015\150906_CISBAT\7_RUESCH.pdf.
- [13] N. Vetterli, M. Sulzer, «Dynamic analysis of the low-temperature district network '«Saurstoffi''' through monitoring,» in: Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale, LESO-PB, EPFL, EPFL, Lausanne, 2015: pp. 517–522. doi:10.5075/epfl-cisbat2015-517-522.
- [14] M. Sulzer, T. Gautschi, ETH Zürich, Höggerberg Masterplan Energie, in: 15. Schweizerisches Status - Seminar «Energie - Und Umweltforschung Im Bauwesen», Zürich, 2008. https://moodle.polymtl.ca/file.php/309/Soupes_du_jour/Semaine_7/Solar_heat_injection_into_boreholes.pdf [accessed June 21, 2012].
- [15] D. Mangold, D. McClenahan, R. Djebbar, J. Thornton, B. Wong, J. Carriere, J. Kokko, Seasonal storage – a German success story, Sun and Wind Energy. 1/2007 (2007) 48 ff.

- [16] Der Schweizerische Bundesrat, 814.201 Gewässerschutzverordnung (GSchV), [2017]. <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19983281/index.html> [accessed November 23, 2017].
- [17] M. Bloemendal, T. Olsthoorn, F. Boons, How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage, *Energy Policy*. 66 [2014] 104–114. doi:10.1016/j.enpol.2013.11.034.
- [18] M. Le Brun, V. Hamm, S. Lopez, P. Ungemach, M. Antics, J. Ausseur, E. Cordier, E. Guiglaris, P. Goblet, P. Lalos, Hydraulic and Thermal Impact Modelling of the Geothermal Heating Doublet in the Paris Basin, in: *Proceedings of Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, 2011. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2011/lebrun.pdf> [accessed June 18, 2012].
- [19] G. Tornare, G. Barras, R. Elio, F. Baud, J. Scheider, W. Thiele, O. Graf, P. Hollmuller, F. De Oliveira Filho, M. Fell, Rapport technique et de communication du projet d'assainissement Minergie-P des immeubles «La Cigale»[GE]–Chauffage par pompes à chaleur solaires couplées à des stocks à changement de phase, 2017.
- [20] P. Hollmuller, F. de Oliveira, O. Graf, W. Thiele, Solar assisted heat pump with ice storage for a 19'000 m² retrofitted multi-family building complex, *Energy Procedia*. 122 [2017] 271–276. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.321.
- [21] D. Philippen, D. Carbonell, M. Battaglia, M. Haller, Eisspeicher in der Forschung und im praktischen Einsatz (in English), in: 23. Tagung Des BFE-Forschungsprogramms, HTI Burgdorf, 2017. p:\SPF-Publikationen\2017\2017_Waermepumpentagung\Tagungsband_WpTagung17_PhilippenEtAl.pdf.
- [22] J. Jenni, *Speicher in Theorie und Praxis*, Jenni Energietechnik AG, Oberburg bei Burgdorf, 2000.
- [23] J. Jenni, *Das Sonnenhaus - mit hohem solarem Deckungsgrad für Warmwasser und Heizung*, 3. Auflage, Jenni Energietechnik AG, Oberburg bei Burgdorf, 2010.
- [24] T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen, Central solar heating plants with seasonal storage in Germany, *Solar Energy*. 76 [2004] 165–174. doi:10.1016/j.solener.2003.07.025.
- [25] Seasonal Thermal Energy Storage – A Major Breakthrough for Solar Heating | Solution | Arcon-Sunmark | State of Green, (n.d.). <https://stateofgreen.com/en/profiles/arcon-sunmark/solutions/seasonal-thermal-energy-storage-a-major-breakthrough-for-solar-heating> [accessed February 7, 2018].
- [26] D. Svenbjörnsson, N. From, Fernwärme-Erdbecken als Langzeit-Wasserspeicher für Dänische Wärmenetze, [2017].
- [27] D. Mangold, L. Deschaintre, *Seasonal Borehole Thermal Energy Storages - Guidelines for design & construction*, [2015].
- [28] B. Sibbitt, D. McClenahan, R. Djebbar, J. Thornton, B. Wong, J. Carriere, J. Kokko, The Performance of a High Solar Fraction Seasonal Storage District Heating System – Five Years of Operation, *Energy Procedia*. 30 [2012] 856–865. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.097>.
- [29] A. Snijders, D. McClenahan, B. Wong, >90 % Solaranteil bei der Raumheizung - Erdsondenspeicher mit bis zu 80°C bei der Drake Landing Solar Community, Alberta, Canada, [2017].
- [30] M. Rieger, Saisonaler ErdsondenWärmespeicher Crailsheim, *Fachmagazin Für Brunnen Und Leitungsbau*. 9 [2009] 24–32.
- [31] D. Mangold, L. Deschaintre, *Seasonal Borehole Thermal Energy Storages - State of the Art and necessary further R&D*, [2015].
- [32] B. Sibbitt, D. McClenahan, *Seasonal Borehole Thermal Energy Storages - Guidelines for design & construction*, [2015].
- [33] S. Lopez, V. Hamm, M. Le Brun, L. Schaper, F. Boissier, C. Cotiche, G. Elodie, 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France, 2010. doi:10.1016/j.geothermics.2010.09.005.
- [34] F. Kabus, P. Seibt, Aquifer Thermal Energy Storage for the Berlin Reichstag Building - New Seat of the German Parliament, in: *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Kyushu - Tohoku, Japan, n.d.
- [35] A. Hauer, Sorption Storages for Solar Thermal Energy - Possibilities and Limits, in: *Solar World Congress 2009*, Johannesburg, South Africa, 2009: pp. 371–380. file:///Q:/Literature/Conference%20Proceedings/SWC-2009/PDF/57%20Hauer%20A.pdf [accessed October 16, 2009].
- [36] B. Fumey, R. Weber, P. Gantenbein, X. Daguenet-Frick, I. Hughes, V. Dorer, Limitations Imposed on Energy Density of Sorption Materials in Seasonal Thermal Storage Systems, *Energy Procedia*. 70 [2015] 203–208. doi:10.1016/j.egypro.2015.02.116.

- [37] X. Daguenet-Frick, P. Gantenbein, J. Müller, B. Fumey, R. Weber, Seasonal thermochemical energy storage: Comparison of the experimental results with the modelling of the falling film tube bundle heat and mass exchanger unit, *Renewable Energy*. 110 (2017) 162–173. doi:10.1016/j.renene.2016.10.005.
- [38] H. Mehling, L.F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM*, Springer Verlag, 2008.
- [39] H. Mehling, Enthalpy and temperature of the phase change solid–liquid – An analysis of data of the elements using information on their structure, *Solar Energy*. 88 (2013) 71–79. doi:10.1016/j.solener.2012.10.018.
- [40] M. Friedl, T. Kober, J. Mühlethaler, *Saisonale Flexibilisierung einer nachhaltigen Energieversorgung der Schweiz*, AEE FESS, Rapperswil, 2018.
- [41] J. Wochele, C. Ludwig, *Aluminium als Brennstoff und Speicher*, Paul Scherrer Institut, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2004.
- [42] A. Witt, Schweizer entwickeln neues Speicherkonzept, *Solarthemen+Plus*. 507/2 (2018).
- [43] M. Maier, *Grosswärmespeicher - Zentraler Baustein einer Flexiblen Strom- und Wärmeversorgung*, Agentur für Erneuerbare Energien e. V., Berlin, 2017.
- [44] C. Kunz, M. Maier, *Metaanalyse: Zusammenspiel von Strom- und Wärmesystem*, Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2017.
- [45] D. Mangold, O. Miedaner, E. Primoudi Tziggili, T. Schmidt, M. Unterberger, B. Zeh, *Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung – Wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für Solarthermie2000Plus*, Solites, Stuttgart, Germany, 2012.

ANNEX A METHODIK DER BERECHNUNG DER SPEICHERKOSTEN

Die Kosten von Energiespeichertechniken werden nach [8]¹¹ ausgewiesen als «Levelized Cost for Energy Storage» (LCOES) in Kosten pro kWh ausgespeicherter Energie, was sowohl Investitionskosten als auch Betriebskosten des gesamten Lebenszyklus beinhaltet.

$$LCOES = (CAPEX * AF + OPEX) / W$$

$$AF = \frac{i}{(1 - (1 + i)^{-n})}$$

mit

CAPEX Kapitalkosten (capital expenditures)

OPEX Betriebskosten (operational expenditures)

W jährliche Ausspeicherung von Energie aus dem Speicher (kWh)

AF Annuitätsfaktor

i Zinssatz (5%)

n Lebensdauer

Alle Kosten beinhalten Planung und Installation, jedoch keine Mehrwertsteuer. Wo in den Grundlagen-
daten keine Planungskosten ausgewiesen oder inkludiert waren, wurde mit einem Aufschlag von 10 %
gerechnet. Alle Annuitätsfaktoren wurden mit einem Zinssatz von 5 % gerechnet.

¹¹ In der zitierten Literatur wurde der Rentenbarwertfaktor als Annuitätsfaktor deklariert. Die Formel unter Verwendung des Annuitätsfaktors in der Referenz unterscheidet sich deshalb von der derjenigen die hier präsentiert wird. Das Resultat ist jedoch identisch.

ANNEX B SPEICHERKOSTEN ANHAND REALISierter PROJEKTE

In Tabelle 2 sind die publizierten Kosten bereits realisierter Wärmespeicherprojekte mit saisonalem Charakter aufgeführt. Für die Berechnung des Annuitätsfaktors wurde mit der kostenbestimmenden Lebensdauer der Hauptkomponente und einem Zinssatz von 5 % gerechnet, der Nutzungsgrad wurde aus dem realisierten Projekt übernommen. Nutzungsgrade grösserer Anlagen können deutlich höher ausfallen. Dies bietet vor allem bei der Speicherung im Erdreich auf Nutztemperaturniveau noch erhebliches Potenzial zur Erhöhung der Effizienz und zur Reduktion der Kosten.

Tabelle 2: Kosten typischer Wärmespeicherprojekte, welche für die betreffenden Technologien eher zu den grösseren bereits realisierten Anlagen gehören.

Technik	Leistung	Theoretische Kapazität ^{a)}	Eingespeiste Energie	CAPEX	OPEX	Lebensdauer der Haupt-Komponente	Annuitätsfaktor Haupt-Komponente	Nutzungsgrad
	MW	MWh	MWh	CHF	CHF/a	Jahre	%	MWh/MWh (%)
Niedertemperatur								
Erdreich Niedertemperatur	1.080	19'590	2'134	1'590'000	7'950	50	5.5%	100%
Aquifer	1.500	4'479	2'250	485'808	19'432	30	6.5%	74%
Eisspeicher	0.006	0	5	7'500	38	50	5.5%	70%
Nutztemperatur								
Wassertank	0.050	16	64	150'000	750	50	5.5%	80%
Erdbecken	22.500	4'800	13'180	2'780'000	19'460	20	8.0%	78%
Erdbecken mit Kies	0.960	180	169	571'560	4'001	20	8.0%	80%
Erdreich	0.210	877	694	618'000	3'090	50	5.5%	50%
Aquifer	10.000	45'000	36'000	10'800'000	808'000	30	6.5%	100%

^{a)} nach Volumen und theoretischen Speicherdichten aus Tabelle 1. CAPEX = Capital expenses, OPEX = operational expenses. Nutzungsgrade sind (Wärme ausgespeichert)/(Wärme eingespeichert) über ein Jahr.

Bei allen betrachteten Speichertechniken ist eine Unterteilung der Kosten in einen Teil, der abhängig ist von der Energiemenge, und in einen Teil, der abhängig ist von der Leistung, nicht sinnvoll, respektive nicht realisierbar. Bei den Erdreich-, und Aquiferspeichern besteht in der Regel ein direkter Zusammenhang zwischen Leistung und Energie und bei den Wasser- und Erdbeckenspeichern fallen die leistungsabhängigen Komponenten, im Wesentlichen die Zuleitungsrohre, Pumpen und Wärmetauscher, nicht ins Gewicht. Die Kosten für Pumpen, Pumpenstrom und Komponenten zur Systemtrennung sind entsprechend in den oben aufgeführten Kosten nicht enthalten. Eine Ausnahme sind die Erdsonden-(Wärmetauscher) sowie Eisspeicher-Wärmetauscher welche inhärent im System vorhanden sind und somit in den aufgeführten Kosten auch berücksichtigt wurden.

Anhand der Daten aus Tabelle 2 wurden die Kosten pro MWh Energieumsatz errechnet (Tabelle 3). Als **Nutzkapazität** wurde auf die tatsächlich realisierte Wärmeeinspeisung abgestützt, wenn diese auf Grund der Speichertechnik (zum Beispiel Erdreich) geringer ausfällt als die theoretische Wärmespeicherkapazität des Mediums. Dies ist beim Erdreich der Fall, weil sich das Erdreich in der Nähe des Wärmeeintrages stärker erwärmt als in den sondenferneren Bereichen, somit die Übertragungsleistung mit zunehmender Beladung vermindert wird und nicht das ganze Volumen homogen aufgeheizt werden kann. Im Gegensatz dazu ist beim Wasser-Wärmespeichers die in den Speicher eingespeiste Energie deutlich höher als die theoretische Wärmekapazität. Dies ist zu einem geringen Teil mit Speicherverlusten zu erklären. Der weitaus grössere Anteil ist dem Umstand geschuldet, dass dieser Speicher nicht nur zur saisonalen Wärmespeicherung benützt wird, sondern auch für kurzfristige Wärmespeicherung¹².

¹² Im angeführten Beispiel eines Wärmespeichers, der in einem Mehrfamilienhaus innerhalb der isolierten und beheizten Zone installiert ist, gehen drei Viertel des Wärmeumsatzes auf das Konto der Kurzzeitspeicherung und nur ein Viertel ist wirklich als saisonale Speicherung zu betrachten.

ANNEX B SPEICHERKOSTEN ANHAND REALISierter PROJEKTE

Für die *Umsatzbezogenen Kosten* wurde als Basis für die Energiemenge die *tatsächlich ausgespeicherte Energie* verwendet. Diese kann gegenüber der eingespeicherten Energiemenge um den Anteil der Speicherverluste geringer ausfallen, was zu höheren Kosten pro MWh führt, oder sie kann im Falle einer zusätzlichen Verwendung des Speichers als Kurzzeitspeicher auch höher ausfallen, was zu einer Reduktion der Kosten pro MWh führt. Die LCOES, als Summe der energiemengenbezogenen CAPEX und OPEX, sind einmal ausgewiesen, indem die Kosten vollständig auf diejenige Energiemenge verteilt wurde, die saisonal transferiert und ausgespeichert wurde (LCOES saisonal), und einmal bezogen auf den gesamten Umsatz, respektive auf die Energiemenge, welche über ein ganzes Jahr gesamthaft ausgespeichert wurde (LCOES Umsatz). Diese beiden Werte unterscheiden sich vor allem dann, wenn der Energiespeicher auch in erheblichem Masse zur kurzfristigen Speicherung verwendet wird.

Tabelle 3: Wärmespeicherkosten verschiedener Techniken bezogen auf Nutzkapazität (Einspeicherung) sowie auf ausgespeicherte Energie, und LCOES der ausgespeicherten Wärme.

Technik	Annuität CAPEX pro Nutzkapazität	OPEX pro Nutzkapazität	Annuität CAPEX pro Umsatz (Ausspeicherung)	OPEX pro Umsatz (Ausspeicherung)	LCOES saisonal ohne Wärmepreis für Einspeicherung	LCOES saisonal bei Wärmeeinkauf zu CHF 50/MWh	LCOES Umsatz ohne Wärmepreis	LCOES Umsatz bei Wärmeeinkauf zu CHF 50/MWh
	CHF/(MWh*a)	CHF/(MWh*a)	CHF/(MWh*a)	CHF/(MWh*a)	CHF/MWh	CHF/MWh	CHF/MWh	CHF/MWh
Niedertemperatur								
Erdschicht Niedertemperatur	41	3.7	41	3.7	45	95	45	95
Aquifer	14	8.6	19	11.8	31	99	31	99
Eisspeicher	1104	100.8	115	10.5	1722	1793	126	197
Nutztemperatur								
Wassertank	514	46.9	160	14.6	701	763	175	238
Erdschicht	46	4.1	22	1.9	65	129	24	88
Erdschicht mit Kies	272	23.7	340	29.6	369	432	369	432
Erdschicht	49	4.5	98	8.9	106	206	106	206
Aquifer	20	22.4	20	22.4	42	92	42	92

Nutzkapazität = Minimum der theoretischen Kapazität und der eingespeisten Energiemenge; Saisonale Wärmepreise bezogen auf die Energiemenge, die sich durch die Nutzkapazität abzüglich der Verluste ergibt. Umsatzbezogene Wärmepreise sind bezogen auf die Energiemenge, die sich durch die eingespeiste Energiemenge abzüglich der Verluste (Q_{ein}/η) ergibt.