

Schlussbericht, 9. Februar 2018

Programm „Thermische Netze“

Arbeitspaket Einsatz von thermischen (saisonalen) Speichern in thermischen Netzen



energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Karl-Heinz Schädle, Schädle GmbH

Thomas Schmidt, Magdalena Berberich, Steinbeis Innovation gGmbH - Solites

Co-Autoren:

Dirk Arndt, Geo-Explorers AG

Philip Klingler, Klenco

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Grundlagen und Ziel	4
2	Speichertypen	7
2.1	Behälter-Wärmespeicher	8
2.1.1	Stahltanks	8
2.1.2	Beton-Behälter	8
2.2	Erdbecken-Wärmespeicher	11
2.3	Erdsonden-Wärmespeicher	13
2.4	Aquiferspeicher ATES.....	16
2.5	Vergleich der Speicherkonzepte	20
3	Auswahlkriterien und Systemeinbindung	21
3.1	Systemanforderungen.....	22
3.2	Einbindung in Thermische Netze	23
3.3	Wärmequellen / Wärmesenken.....	26
3.4	Geologie / Hydrogeologie	27
3.5	Dimensionierung / Platzbedarf.....	27
3.6	Typische Fragen vor der Projektierung eines saisonalen Speichers.....	28
4	Rahmenbedingungen	29
4.1	Rechtliches.....	30
4.2	Bau- und Betriebsbewilligung	31
5	Kosten und Wirtschaftlichkeit	33
5.1	Betrieb und Unterhalt	35
5.2	Flexibilität	36
6	Chancen und Empfehlungen	36
7	Literatur	38

1 Grundlagen und Ziel

In diesem Dokument „**Einsatz von thermischen (saisonalen) Speichern in thermischen Netzen**“ wird der heutige Stand der Praxis abgebildet und es werden Hinweise und Empfehlungen zum Thema saisonale Wärmespeicher im Zusammenhang mit thermischen Netzen für zukünftige Vorhaben gegeben. Thematisiert werden dabei hauptsächlich der Stand der Technologien und der Auslegung von saisonalen Wärmespeichern.

Für thermische Netze ist die Betrachtung von Wärmespeichern bedeutend. Diese Technologie kann die Unabhängigkeit von anderen, meist fossilen Energiequellen erhöhen und die Flexibilität in der Nutzung von Energie bewirken, sowie die Betriebssicherheit erhöhen.

Für die Verwendung von Wärmespeichern in Wärmenetzen gibt es vielfältige Gründe. Eine Speicherung der Wärme ist prinzipiell immer dann zu betrachten, wenn das Angebot oder die Erzeugung zeitlich oder in ihrer Höhe nicht mit dem Bedarf übereinstimmen.

Kurzzeit-Wärmespeicher werden beispielsweise verwendet, um die Effizienz von Erzeugungsanlagen zu erhöhen, Taktungen von Wärmeerzeugungsanlagen (Wärmepumpen, Heizkessel) zu vermeiden oder die Bereitstellung von Wärme aus Solarthermie über einige Stunden oder Tage zu speichern. Auch in große Fernwärmenetze werden heute Wärmespeicher integriert, welche die Wärme aus strommarktorientierter gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung zwischenspeichern, bis sie im Wärmenetz benötigt wird.

Große saisonale Wärmespeicher dienen meist zur Speicherung von regenerativ erzeugter Wärme, die in den Sommermonaten erzeugt und in den Wintermonaten benötigt wird (Abbildung 1). Durch eine Mehrfachnutzung des Wärmespeichers für die Pufferung von Spitzenlasten im angeschlossenen Wärmenetz, für die Speicherung von Abwärme oder auch für die Überbrückung von Ausfallzeiten anderer Wärmeerzeuger kann der Speicher sehr flexibel eingesetzt werden. Diese Wärmespeicher müssen meist ein großes Volumen haben, da große Wärmemengen zu speichern sind. Außerdem sind bei kleinen Speichereinheiten die volumenbezogenen Wärmeverluste relativ gesehen gross gegenüber grossen Einheiten. Saisonale Wärmespeicher müssen außerdem zuverlässig arbeiten und kostengünstig erstellt werden, weshalb diese meist in den Untergrund (teil-)integriert werden. Damit kann der Untergrund die statische Last der Wasserfüllung mittragen und der Speicher kann kostengünstiger ausgeführt werden.

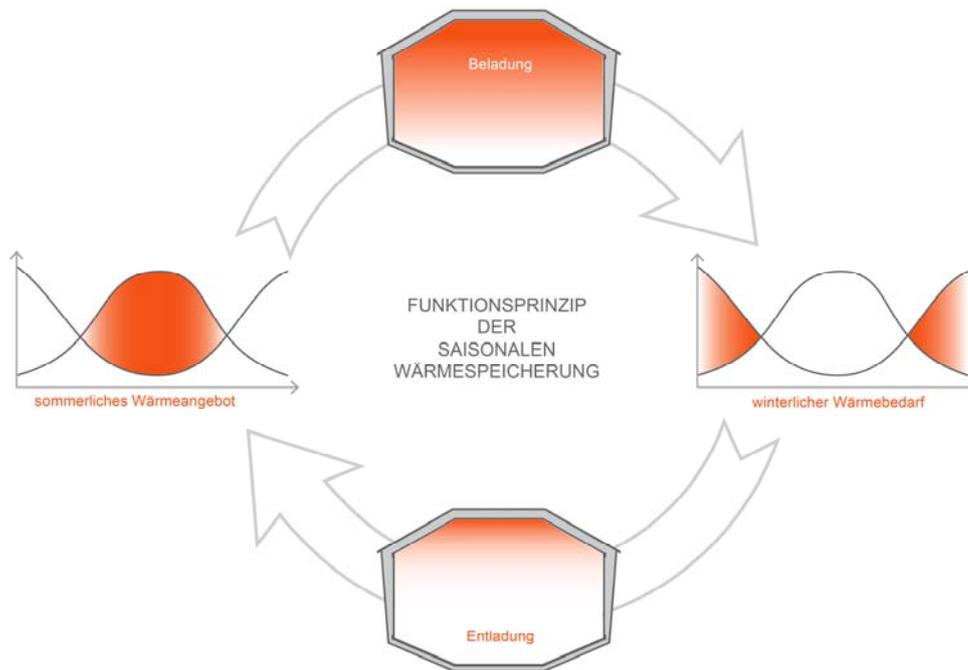


Abbildung 1 Funktionsprinzip der saisonalen Wärmespeicherung (Solites, 2017)

Anhand einer Beispielrechnung kann die Auswirkung eines saisonalen Wärmespeichers auf die Jahresenergiebilanz gut erläutert werden. Als Haupt-Wärmequelle für das thermische Netz dient dabei eine nahezu konstante Wärmequelle. Dies kann eine industrielle Abwärmequelle (zum Beispiel eine KVA) oder auch eine Geothermieanlage sein. Als Wärmesenke dient in diesem Fall ein Wärmenetz mit einem Jahresenergiebedarf von 48,5 GWh/a.

In der Abbildung 2 ist die Energiebilanz des thermischen Netzes in einer Jahresdauerlinie dargestellt. Die Wärmequelle liefert dabei knapp 60 % der benötigten Wärmeenergie, die Spitzenlastzentrale erzeugt den zusätzlich benötigten Anteil von 40 % Wärme. Aufgrund der Charakteristik des Netzes (Wärmesenke) kann ein grosser Anteil (etwa 31 %) der zur Verfügung stehenden Abwärme nicht genutzt werden. Bei einer volatilen Wärmequelle, zum Beispiel einer Solaranlage, ist die zur Verfügung stehende Wärme nicht konstant, weshalb auch die zur Verfügung stehende Überschusswärme auch nicht konstant ist. Das Prinzip ist jedoch dasselbe wie bei einer konstanten Wärmequelle.

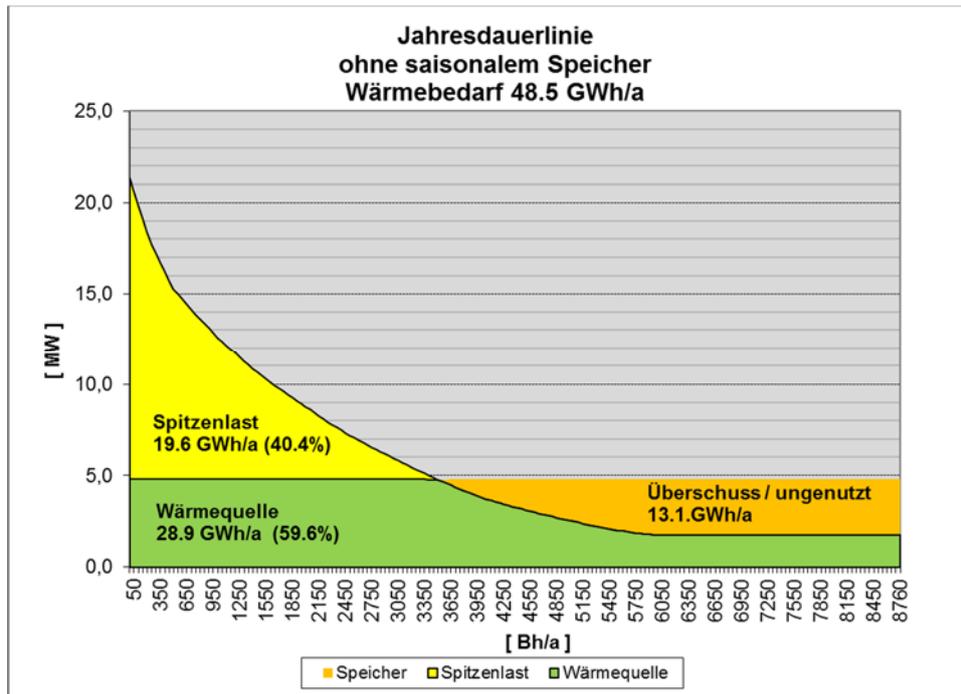


Abbildung 2 Beispiel: Jahresdauerlinie eines Wärmenetzes ohne Speicher

In der Abbildung 3 ist dargestellt, wie sich die Energiebilanz durch den Einsatz eines saisonalen Speichers verbessern lässt. Der Spitzenlastanteil, welcher in der Regel durch fossile Energie erzeugt wird, kann von 40 % auf unter 20 % gesenkt werden. Damit verbunden ist eine massive Verringerung der CO₂-Emissionen. In der Beispielrechnung wurden 20 % Speicherverluste eingerechnet.

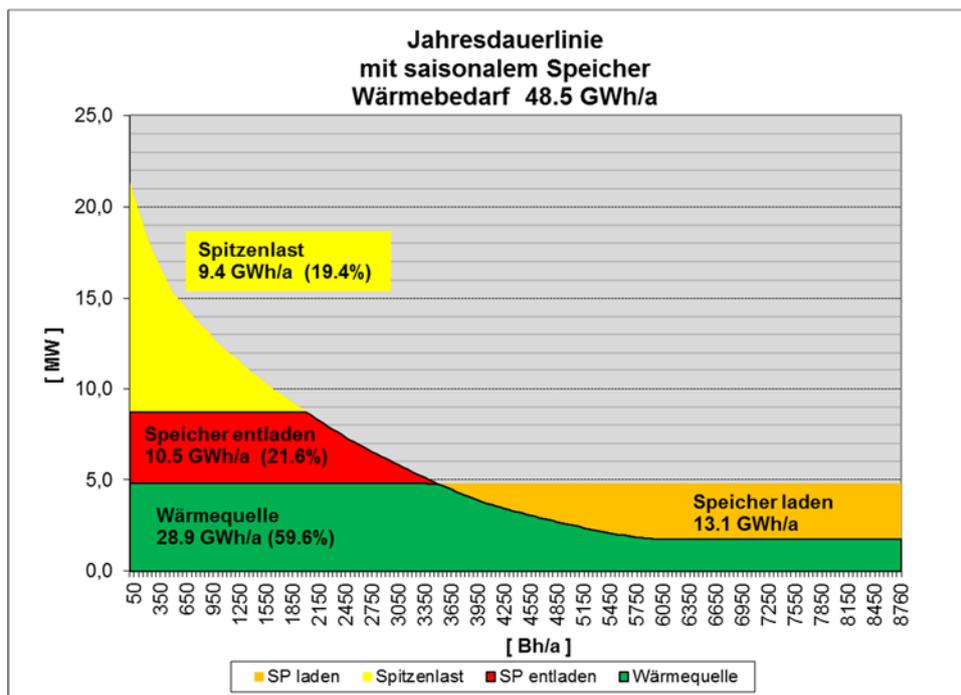


Abbildung 3 Beispiel. Jahresdauerlinie eines Wärmenetzes mit Speicher

2 Speichertypen

Je nach Anwendungsfall und Randbedingungen werden verschiedene Bauarten von Wärmespeichern eingesetzt. Für die saisonale Wärmespeicherung in Wärmenetzen wurden vier Speichertypen entwickelt und in verschiedenen Pilot- und Demonstrationsanlagen realisiert.

In **Behälter-Wärmespeichern** wird Wasser, in **Erdbecken-Wärmespeichern** kann Wasser, ein Wasser-Kies-Gemisch oder Wasser-Erdreich-Gemisch als Speichermedium eingesetzt werden während **Erdsonden-** und **Aquifer-Wärmespeicher** direkt den Untergrund als Speichermedium nutzen. Die spezifische Wärmekapazität ist bei Verwendung von Wasser als Wärmespeichermedium deutlich höher als bei Nutzung von Wassergemischen oder des Untergrunds (siehe Abbildung 4).

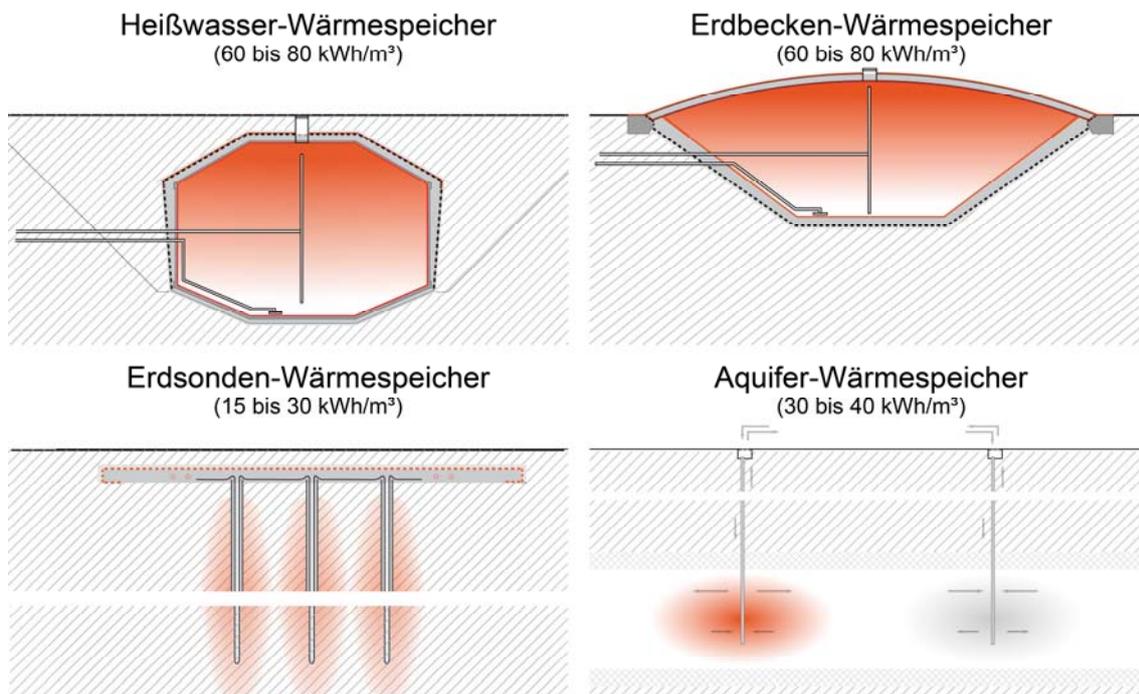


Abbildung 4 Schematische Darstellung der vier Speichertypen zur saisonalen Wärmespeicherung (Solites, 2017)

In den direkt mit Wasser betriebenen Wärmespeichern ist die mögliche Dynamik so ausgeprägt, dass diese sowohl als Kurzzeit-Wärmespeicher für den Ausgleich des Tagesganges als auch für saisonale Schwankungen eingesetzt werden können. Bei Wärmespeichern, bei denen als wesentlicher Wärmeträger Gestein oder Kies eingesetzt wird, wird für kurzzeitige Schwankungen häufig ein separater «Pufferspeicher» zum Leistungsausgleich vorgesehen.

Zur Beladung eines Wärmespeichers wird das erwärmte Wärmeträgermedium direkt oder indirekt (zum Beispiel über Wärmeübertrager oder Rohrschlangen) in das kühlere Speichermedium eingeströmt und damit die Wärme in den Wärmespeicher übertragen. Eine Entladung von Wärme kann bis zum niedrigsten, im System verfügbaren Temperaturniveau erfolgen (gegebenenfalls unter

Berücksichtigung zusätzlicher Wärmeübertrager). Dies ist normalerweise durch die Rücklauftemperatur des angeschlossenen Wärmenetzes bestimmt. Ein weiterer Wärmeentzug aus dem Speicher ist über eine Wärmepumpe möglich.

2.1 Behälter-Wärmespeicher

Behälter-Wärmespeicher werden traditionell als Stahltanks ausgeführt und sind für viele Anwendungen der Stand der Technik bei der Wärmespeicherung. Zur saisonalen Wärmespeicherung werden sie selten eingesetzt, da hohe Baukosten in Kombination mit wenigen Speicherzyklen, wie sie bei der saisonalen Wärmespeicherung in der Regel vorliegen, häufig zu einer ungünstigen Wirtschaftlichkeit führen. Dennoch sind auch bei Großspeichern, z.B. in der Fernwärmetechnik, Stahltanks der Stand der Technik. Um geringere Baukosten zu erreichen, werden große Behälter-Wärmespeicher zur saisonalen Wärmespeicherung auch aus Beton errichtet.

Die beiden Behälter-Arten werden im Folgenden dargestellt.

2.1.1 Stahltanks

Für Groß-Wärmespeicher werden häufig grosse Stahlbehälter / Stahltanks freistehend eingesetzt. Das Volumen kann dabei bis zu 100 000 m³ betragen. Die Behälter können drucklos oder druckbehaftet betrieben werden. Zusätzlich können die Behälter auch zur Druckhaltung verwendet werden, wenn die Netzstruktur dies zulässt. Stahlbehälter können als Druckbehälter auch im Heisswasserbereich, mit bis zu 200 °C eingesetzt werden, wobei die hauptsächliche Anwendung im Bereich unter 105 °C liegt. Ein Behälterspeicher weist praktisch eine unbegrenzte Lade-Entlade-Zyklenzahl auf und kann mit grosser Leistung be- und entladen werden. Diese können auf Grund ihrer Höhe von bis zu 60 Metern jedoch nur in Industriegebieten, neben Großkraftwerken o.ä. realisiert werden. Aufgrund der hohen Kosten und der Wärmeverluste von 10-15 W/m² Oberfläche werden grosse Behälter meist als Pufferspeicher mit einer Entladezeit von mehreren Stunden bis zu einigen Tagen und nicht als saisonale Wärmespeicher eingesetzt.

2.1.2 Beton-Behälter

Behälter-Wärmespeicher zur saisonalen Wärmespeicherung bestehen meist aus erdvergrabenen Stahlbetonbehältern, die vor Ort aus Beton gegossen oder aus Beton-Fertigteilen zusammengesetzt werden. Außen werden die Behälter rundum wärmegeämmt und im Inneren mit Edelstahlblech oder Kunststoffolie wasserdicht ausgekleidet. Als Dämmstoffe werden je nach Belastungsfall Schaumglasschotter für den Boden und Blähglasgranulat in einer Membranschalung für Wand und Dach verwendet. Bei oberirdischen Behältern kommen auch herkömmliche Dämmmaterialien zum Einsatz.

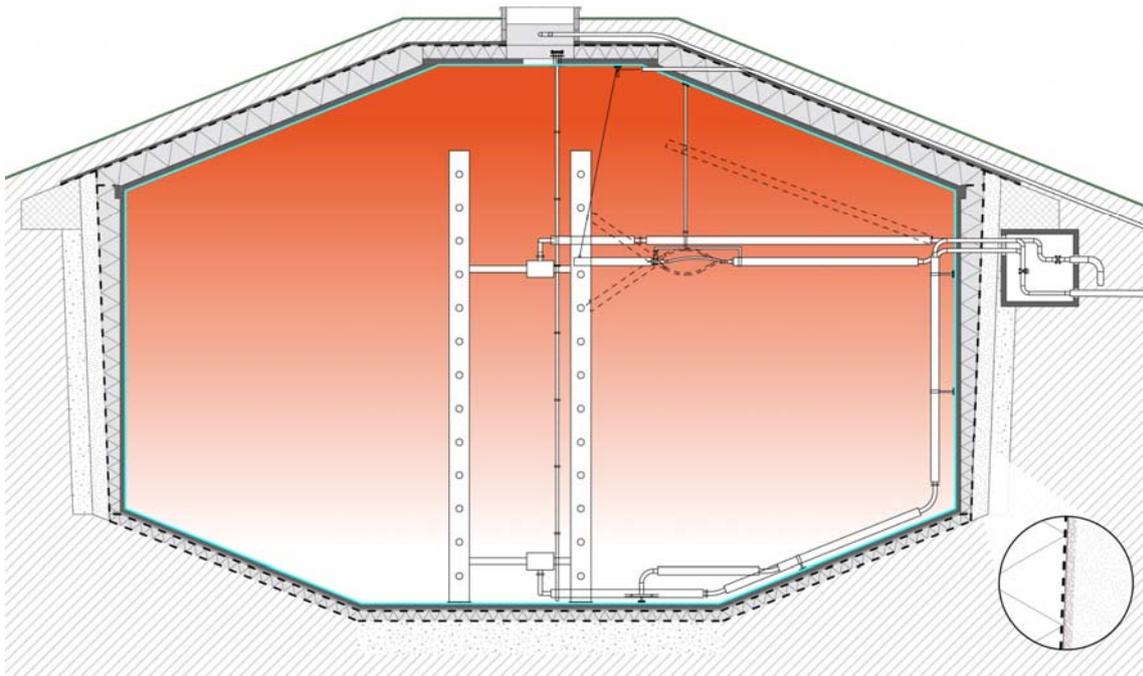


Abbildung 5 Schematische Darstellung des erdvergrabenen Behälter-Wärmespeichers in München (Mangold, et al., 2009)

Die Behälter werden oft erdvergraben, da diese Bauart kostengünstiger und platzsparend ist und das Erdreich den Speicher zusätzlich wärmedämmt. Die Behälter sind mit Wasser gefüllt und können bei Speichertemperaturen unter 95 °C drucklos oder für höhere Speichertemperaturen druckbehäftet ausgeführt werden.

Für die Realisierung eines Behälter-Wärmespeichers muss der Untergrund eine hohe Belastbarkeit aufweisen und sollte eine steile Abböschung der Baugrube zulassen. Auch sollte bis in einige Meter unterhalb des Speicherbodens kein Grundwasser anstehen.

Durch eine an eine Kugel angenäherte Form eines Behälter-Wärmespeichers werden, aufgrund eines günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses, die Speicherverluste gegenüber anderen Geometrien minimiert.

Zur Be- und Entladung der Behälterspeicher werden überwiegend Diffusoren in drei vertikalen Ebenen eingesetzt. Alternativ werden in einzelnen Projekten Schichtbeladeeinrichtungen genutzt (siehe Abbildung 5), die in der Beladungsphase das erhitzte Wasser gemäß dessen Temperatur in die passenden Speicherschichten einleiten und damit Durchmischungen vermeiden und das thermische Schichtungsverhalten verbessern.

Die Temperaturschichtung des Wassers erfolgt grundsätzlich automatisch über die Dichte des Mediums. Warmes Wasser besitzt eine geringere Dichte und steigt deshalb nach oben, kaltes Wasser sammelt sich hingegen am Boden. Ungünstige Einströmeffekte oder Konvektionswalzen können jedoch zu lokalen Durchmischungen führen.

Zur Entladung während der Heizperiode wird das Wasser aus dem oberen, heißesten Teil des Speichers entnommen. Saisonale Wärmespeicher mit reinem bzw. hohem Wasseranteil haben eine hohe Leistungsdichte und weisen eine geringe Trägheit auf. Die gespeicherte Wärme kann bei kurzen Zugriffszeiten auch mit hohen Volumenströmen entladen werden.

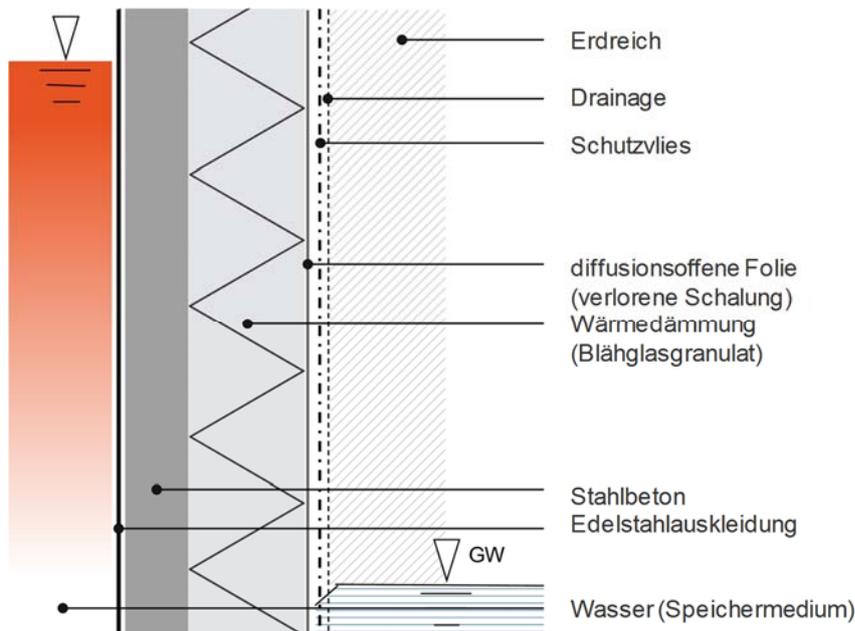


Abbildung 6 Typischer Wandaufbau eines Behälter-Wärmespeichers (Quelle: Solites)

In Abbildung 6 ist der Wandaufbau eines Behälter-Wärmespeichers schematisch dargestellt. Weitere Informationen über Behälter-Wärmespeicher und realisierte Anlagen sind zu finden in (Solites, 2017).

Die folgende Fotodokumentation zeigt den Bau des Behälter-Wärmespeichers in dem Projekt Solare Nahwärme Ackermannbogen München, der 2007 fertiggestellt wurde (Mangold, et al., 2009)



Einbau von 20 cm Schaumglasschotter als untere Dämmlage, Vliesabdeckung



Schichtaufbau am Speicherrand: rechts Wandanschluss, Mitte Sauberkeitsschicht, links Schaumglasschotter



Montagefuge zur Aufnahme der Montagetoleranzen (2 Stück). Innen mit Edelstahlblech



Schließen des Speicherdeckels mit zwei gegenüber liegenden Sonderfertigteilen zur Aufnahme der Vorspannanker.



Schrittweises Füllen der Membranschalung mit Blähglasgranulat und Anfüllen von außen



Abschnittweises Aufbringen von Blähglasgranulat in Gewebesäcken. Die Dichtbahn ist an den Speicherdeckel angeklebt.

Weitere Informationen über Behälter-Wärmespeicher und realisierte Anlagen sind zu finden in (Solites, 2017).

2.2 Erdbecken-Wärmespeicher

Für einen Erdbecken-Wärmespeicher wird eine Baugrube mit Kunststoffbahnen abgedichtet, wärmegeämmt und mit Wasser oder einem Wasser-Kies-Gemisch als Speichermedium gefüllt. Die Seitenwände sind entweder natürlich geböschert oder sie werden während des Baus mithilfe von Hilfskonstruktionen gestützt (z.B. Trägerbohlwände oder Spritzbeton). Der mögliche natürliche Böschungswinkel hängt von der lokalen Bodenbeschaffenheit ab. Der Wärmespeicher wird entweder rundherum gegen das Erdreich durch Blähglasgranulat in Gewebesäcken oder durch Membranschalung gedämmt oder die Seitenwände und der Bodenbereich verbleiben ungedämmt. Letzteres ist nur bei sehr großen Wärmespeichern und nach genauer Analyse der Wärmeverluste zu betrachten. Zur Oberseite wird das Becken durch einen wärmegeämmtten schwimmenden, freitragenden oder aufliegenden Deckel abgeschlossen. (Solites, 2017)

Der Erdbecken-Wärmespeicher kann mit Wasser oder einem Wasser-Kies-Gemisch gefüllt werden. Trotz der höheren Wärmespeicherfähigkeit von Wasser ist eine Mischung mit festen Speichermaterialien oft sinnvoll, da diese die Tragfähigkeit für den aufliegenden Deckel erhöhen. Bei einer Wasser-Kies-Füllung erreichen Erdbecken-Wärmespeicher eine Speicherkapazität von 30 – 50 kWh/m³, dies entspricht dem 0,5 bis 0,75-fachen von reinem Wasser. Je höher der Kiesanteil an der Speicherfüllung ist, desto geringer wird die maximal mögliche Speichertemperatur und desto höher wird die Trägheit des Speichers. In einem Erdbecken-Wärmespeicher können, abhängig von der Temperaturstandfestigkeit der inneren Dichtungsfolie, Maximaltemperaturen bis zu 90 °C gespeichert werden.

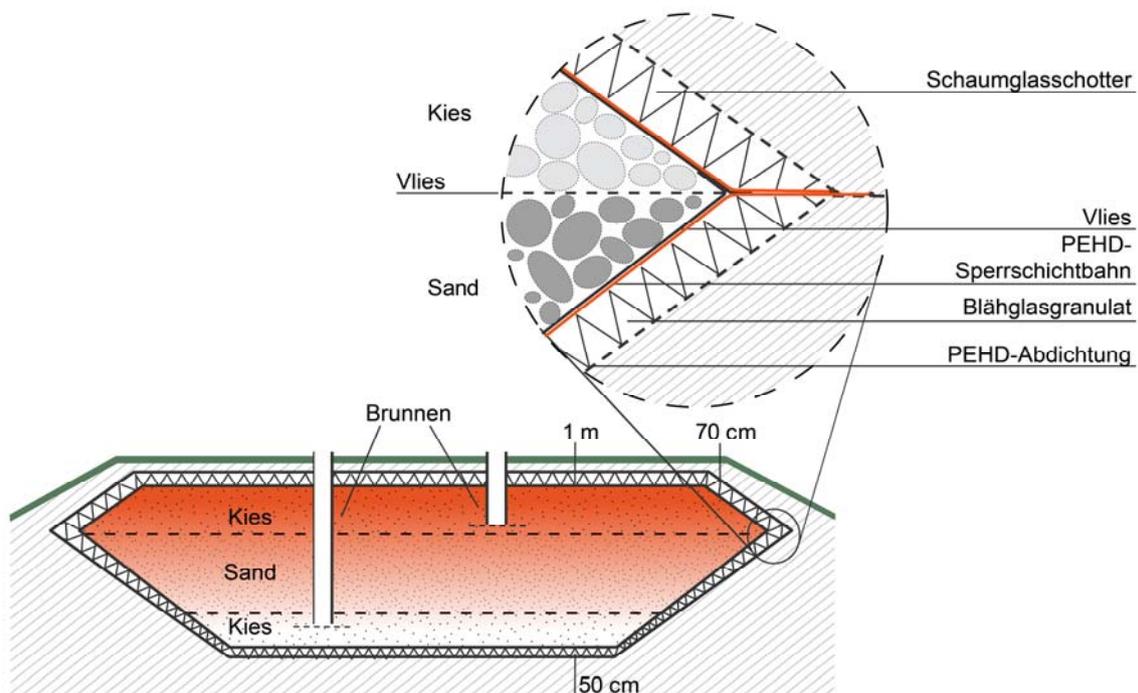


Abbildung 7 Schematische Darstellung des Erdbecken-Wärmespeichers in Eggenstein-Leopoldshafen mit Kies-Wasser-Volumen (Mangold, et al., 2009)

In Abbildung 7 sind ein Erdbecken-Wärmespeicher und dessen Wandaufbau schematisch dargestellt.

Der Erdbecken-Wärmespeicher wird entweder direkt oder mittels Rohrleitungen be- und entladen. Bei der Direktbeladung wird das erwärmte Wasser direkt in den Speicher eingespeist und ebenso entnommen, ähnlich wie beim Behälter-Wärmespeicher. Eventuelle Verunreinigungen durch das Speichermaterial im Falle einer Wasser-Kies-Füllung können Verstopfungen in der Anlagentechnik verursachen, denen mittels Filter vorgebeugt werden muss. Bei mit Wasser-Kies-Gemischen gefüllten Speichern wird daher manchmal auch eine indirekte Be- und Entladung gewählt. Dabei ist das Speichervolumen von Kunststoff-Rohrleitungen durchzogen, welche die Wärme an das Speichermaterial abgeben oder von diesem aufnehmen. Bei indirekter Be- und Entladung ist mit zusätzlichen Temperaturreduzierungen durch den Übertragungsprozess der Wärme zu rechnen. (Solites, 2017)

Wenn statische Gründe am Speicherstandort eine Rolle spielen und Parkplätze oder Bebauung oberhalb des Speichers vorgesehen sind, sind Erdbecken-Wärmespeicher mit Wasser-Kies-Füllung aufgrund der statischen Tragfähigkeit des Speichermaterials vorteilhaft und vermeiden Mehrkosten durch aufwendige statische Stützkonstruktionen.

In Dänemark wird eine kostengünstige Bauart der Erdbecken-Wärmespeicher bevorzugt, wobei nur der Deckel wärmegeklämt ausgeführt wird. Abbildung 8 zeigt den Bau des Erdbecken-Wärmespeichers mit 60.000 m³ Wasservolumen im dänischen Dronninglund.



Abbildung 8: Dokumentation des Baus des Erdbecken-Wärmespeichers in Dronninglund mit 60.000 m³ Wasservolumen (Fertigstellung 2013) (Quelle: Dronninglund Fjernvarme)

2.3 Erdsonden-Wärmespeicher

Erdsonden-Wärmespeicher, welche weltweit unter der englischen Abkürzung BTES (Borehole Thermal Energy Storage) bekannt sind, nutzen das Gestein im Untergrund zur Wärmespeicherung mittels Erdwärmesonden. Diese sind im Prinzip mit Flüssigkeit durchflossene Wärmeübertrager in Bohrungen. Der Wärmeaustausch mit dem Untergrund erfolgt über kompakt angeordnete vertikal abgeteufte Erdwärmesonden-Felder. In diesen zirkuliert als geschlossener Kreislauf die Wärmeträgerflüssigkeit (meist Wasser) und überträgt mittels Wärmeleitung die Wärme in den bzw. aus dem Untergrund zur Wärmespeicherung. Das Volumen des Speichers entspricht ungefähr der Bohrtiefe, multipliziert mit der Fläche des Erdwärmesonden-Felds inkl. einer Umrandung mit halbem Erdwärmesonden-Abstand. Eine Minimierung der Wärmeverluste des Speichers an das umliegende Gestein wird durch eine kompakte Anordnung der Sonden erreicht. Ausserdem kann der Speicher bei vorhandenem Kältebedarf im Sommer gegebenenfalls auch zur Kühlung von Gebäuden und Prozessen verwendet werden. Dadurch steigert sich die Effizienz des Gesamtsystems durch Nutzung im Sommer als Wärmesenke und im Winter als Wärmequelle.

Häufig wird bei einem Erdwärmesonden-Feldern dem Untergrund die natürliche geothermische Erdwärme entzogen und nutzbar gemacht, zusätzlich dazu kann auch Wärme zur Regeneration aktiv in den Geospeicher eingebracht werden. Anlagen dieses Typs sind im eigentlichen Sinne keine «Speicheranlagen», bei welchen aktiv Wärme eingelagert und wieder entnommen wird, sondern «Quellenanlagen», bei welchen das geothermische Potential inklusive Regeneration genutzt wird.

Üblicherweise werden doppel-U-förmige Rohre als Wärmetauscher verwendet. Diese bestehen aus zwei Vorlauf- und zwei Rücklauf-Kunststoffrohren, die am mit Gewicht beschicktem Sondenfuss umgelenkt werden. Zusätzlich zu den Wärmeübertragerrohren werden auch noch Injektionsrohre für die Hinterfüllung mitgeführt. In Bohrungen können Erdwärmesonden bis zu 500 m abgeteuft werden.



Abbildung 9: Sondenfuss einer Erdwärmesonde (Janssen AG) und Erdwärmesonden-Feld mit Anbindeleitungen vor Einbettung in Betonschutzhülle

Nach der Einbringung der Erdwärmesonde in ein Bohrloch wird dieses mit einer Hinterfüllung mit gutem Fließverhalten, geeigneter Dichte und möglichst hoher Wärmeleitfähigkeit aufgefüllt und so mit dem umgebenden Untergrund verbunden.

Zu beachten ist prinzipiell, dass ein Wärmeeintrag oder eine Wärmeentnahme immer nur bei einem Temperaturunterschied entstehen kann. Daher muss für einen Wärmeeintrag die Temperatur in der Wärmeträgerflüssigkeit wärmer als das umliegende Gestein und für einen Wärmentzug die Temperatur in der Wärmeträgerflüssigkeit kälter als das umliegende Gestein sein.

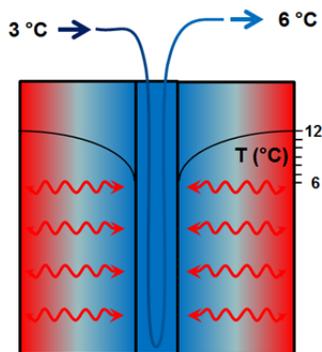


Abbildung 10 Schematische Darstellung der Wärmeleitung bei einer Quellenanlage

Für die Ladung des Speichers wird die erwärmte Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. Diese gibt bei Speicherbeladung die Wärme an die Hinterfüllung im Bohrloch ab, die wiederum die Wärme ins umliegende Gestein weiterleitet. Bei der Entladung werden die Erdwärmesonden mit kühlerem Wasser beschickt und entziehen so dem Untergrund die gespeicherte Wärme.

Die einzelnen Doppel-U-Erdwärmesonden werden manchmal mit Y-Hosenstücken am Sondenaustritt in einen gemeinsamen Vor- und Rücklauf zusammengefasst und mit Anbindeleitungen aus Kunststoff zu einem zentralen Verteiler geführt, wo jede Erdwärmesonde einzeln abgesperrt, reguliert und entlüftet werden kann. Häufig werden Erdsonden-Wärmespeicher mit einer seriell-parallelen Schaltung von mehreren Erdwärmesonden realisiert. Auch kann bei komplexen Anlagen mit mehreren unterschiedlichen Systemtemperaturen eine Mehrfeld-Strategie erwogen werden, wobei je ein Speicher mit einer spezifischen Systemtemperatur betrieben wird.

Die Bohrungen für die Erdwärmesonden haben einen Durchmesser von ca. 0,1 m - 0,2 m und benötigen je nach Bohrtiefe einen ausreichenden minimalen horizontalen Abstand von 2 bis 5 m zueinander. Der Abstand der Erdwärmesonden entspricht bei Quellenanlagen idealerweise der Ausbreitung des saisonalen thermischen Impulses nach ca. 6 Monaten (eine Saison): Dadurch soll die Ausbreitung der Wärme von der Einspeicherung im Sommer bei den umliegenden Sonden beim max. Wärmebezug im Winter eintreffen. Je nach thermischer Leitfähigkeit des Untergrunds beträgt diese Distanz ca. 4-8 m. Bei Wärmespeichern mit höheren Temperaturen werden die Sondenabstände kleiner gewählt, um hohe Temperaturen im Kernbereich des Wärmespeichers zu unterstützen. Die Wärmekapazität eines Erdsonden-Wärmespeichers beträgt je nach Wassersättigung und Wärmekapazität des trockenen Gesteins etwa die Hälfte (üblicherweise ca. 2.1-2.3 MJ/m³*K) gegenüber reinen Wasser-Wärmespeichern. Das nutzbare Volumen des Erdsonden-Wärmespeichers ist wegen nicht vorhandener baulicher Abschlüsse und Variationen bei der Wärmeleitfähigkeit in angrenzenden Gesteinsschichten nicht exakt bestimmbar. Erdsonden-Wärmespeicher sollten aus wirtschaftlichen Gründen nur in gut bohrfähigem Untergrund installiert werden. Auch wenn dies mit höheren Baukosten und Einschränkungen bei zukünftigen Eingriffen in die Anlage verbunden ist, werden Erdwärmesonden-Felder aufgrund des mangelnden Platzbedarfs und den hohen Bodenpreisen in der Schweiz oft unter Neubauten angelegt.

2.4 Aquiferspeicher ATES

Im Gegensatz zu den Erdsonden-Wärmespeichern (BTES) handelt es sich bei Aquifer-Wärmespeichern (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) um offene Systeme. Als Speicherträgermedium wird das natürlich vorhandene Grundwasser des Aquifers genutzt. ATES können sowohl zur Speicherung von Kälte als auch von Wärme genutzt werden. Zur Speicherung der thermischen Energie werden die thermische Speicherfähigkeit des Grundwassers und des Aquifers genutzt. Diese Form der thermischen Speicher zeichnet sich durch das Fehlen von baulichen Grenzen aus. Dadurch können vergleichsweise grosse Speicher und Speicherkapazitäten erschlossen werden. ATES können sich in unseren Breiten gut zur saisonalen Langzeitspeicherung von thermischer Energie eignen. Sie können in Gebieten mit ausgeprägten Temperaturdifferenzen auch im Tag-Nacht Zyklus eingesetzt werden. Im Folgenden werden ATES als System zur saisonalen Langzeit-Wärmespeicherung betrachtet.

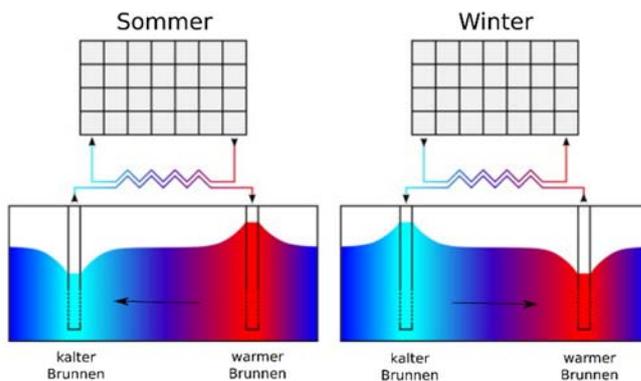


Abbildung 11: Funktionsprinzip eines Aquifer-Wärmespeichers (Grafik verändert nach (Possemiers, et al., 2014))

Aquifere finden sich in unterschiedlichen Tiefenlagen. Die Auswahl des geeigneten Aquifers, sowie die Anzahl und Platzierung der für ATES-Systeme notwendigen Grundwasserfassungen ergibt sich primär aus den Anforderungen des Netzes und den Eigenschaften des Aquifers. In der Regel handelt es sich um mindestens zwei Grundwasserfassungen. Eine Bohrung erschliesst, bzw. speichert Wärme, die andere Bohrung Kälte. Besteht im Sommer Kältebedarf, wird kaltes Grundwasser gefördert und zur Kältemaschine geführt oder direkt genutzt. Das so erwärmte Wasser wird dann wieder in der warmen Bohrung dem Grundwasser an anderer Stelle wieder rückgeführt. Im Winter wird der Kreislauf entsprechend umgedreht (vgl. Abbildung 11).

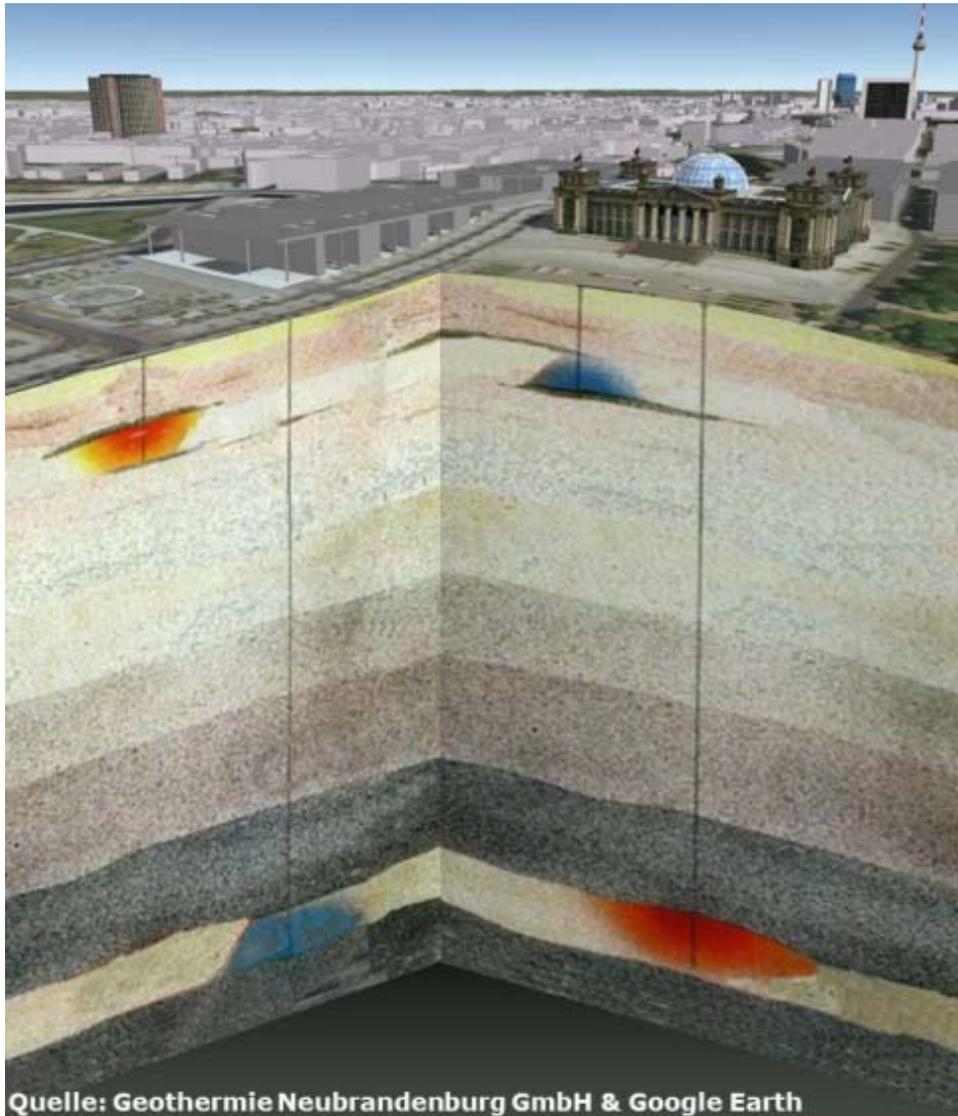


Abbildung 12: Schematische Darstellung des ATES am Reichstag in Berlin (aus Huenges et al. 2015)

Neben weltweit unzähligen Anlagen dieses Typs wird das Beispiel für einen ATES unterhalb des Reichstags in Berlin oft genannt (Abbildung 12). Hier wird sowohl Wärme als auch Kälte gespeichert. Heißes Wasser wird in einem Aquifer in etwa 300 m Tiefe und kaltes Wasser in einer Tiefe von ca. 45 m gespeichert. Die ungestörten Aquifertemperaturen betragen im Kältespeicher ca. 12 °C und im Wärmespeicher ca. 20 °C. Der kalte Speicher wird im Winter mit 5 °C, der Wärmespeicher im Sommer mit 70 °C beladen. Nach Angaben des Betreibers beträgt die Energie-Rückgewinnungsrate etwa 70 %.



Abbildung 13: Schematische Darstellung des ATES ewb, Bern (geplant)

Eine erste Anlage in der Schweiz wird derzeit durch die ewb in Bern geplant (Abbildung 13). Dabei werden mehrere Bohrungen in eine Tiefe von bis zu 500 Metern abgeteuft und ein Speicher geschaffen, welcher im Sommer durch die Abwärme aus der KVA beladen wird und die Wärme im Winter an das Fernwärmenetz abgibt.

Zur Planung und zum Betrieb eines ATES ist die genaue Kenntnis der hydrogeologischen Parameter des Aquifers essentiell. Der Aquifer sollte ausreichend gross und idealerweise nach oben und unten hin hydraulisch und thermisch undurchlässig sein. Um ausreichend hohe Leistungen, bzw. Förder- und Verpressraten zu erreichen, ist eine mittlere bis gute hydraulische Durchlässigkeit notwendig. Um Speicherverluste zu minimieren, sollte das Grundwasser zudem nur geringe Abstandsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese hydrogeologischen Randbedingungen werden am besten von Porengrundwasserleitern oder Kluftaquiferen mit möglichst engständiger Klüftung erfüllt. Karstgrundwasserleiter sind nicht automatisch ungeeignet, bedürfen aber einer intensiven Erkundung und sind meist mit höheren Planungsunsicherheiten belegt als die beiden Erstgenannten.

Für den Betrieb ist zudem die bio-chemische Zusammensetzung des Grundwassers zu berücksichtigen. Insbesondere bei tieferen Aquiferen ist mit stärkerer Mineralisation des Grundwassers zu rechnen, weshalb die meisten Anlagen mit indirekten Systemen und Wärmeübertragern arbeiten. Auch die Einspeichertemperatur kann hier ggf. begrenzt sein, um geochemische Ausfällungen im System oder dem Speicher zu vermeiden.

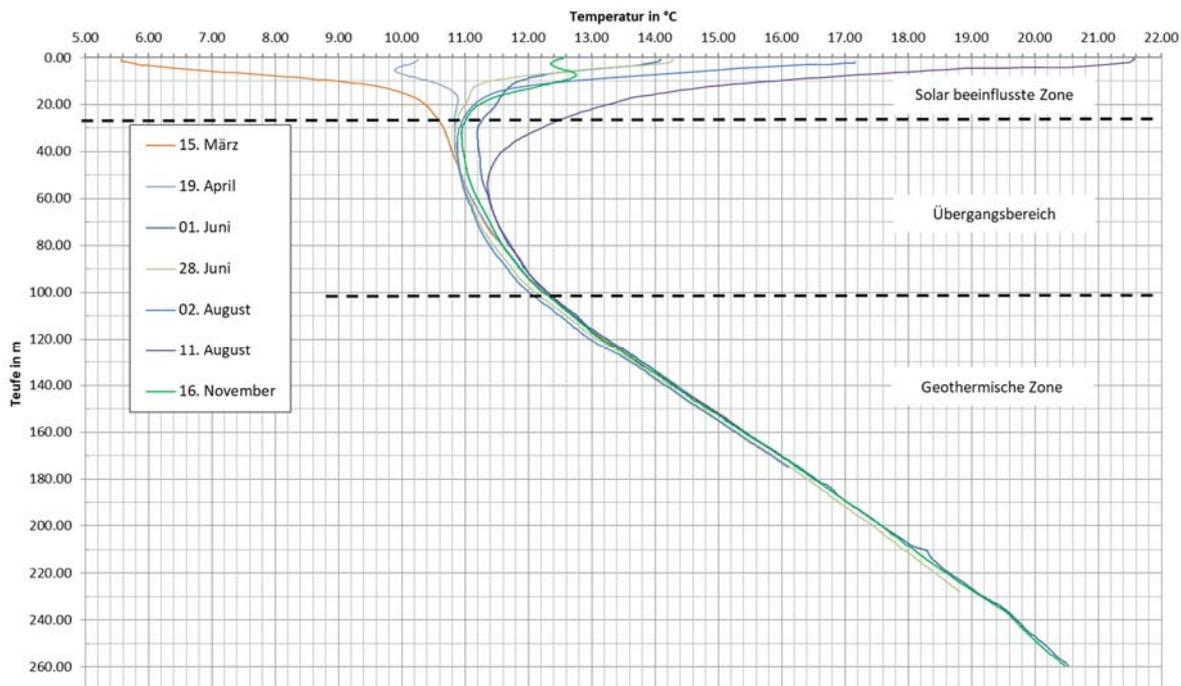


Abbildung 14: Temperaturprofile eines Standorts am Jura Südfuss im Jahresverlauf (Messung Geo Explorers AG) Die Einteilung der drei Zonen kann standortabhängig in verschiedenen Tiefen liegen.

Mit zunehmender Tiefe des Aquifers nimmt auch dessen ungestörte Temperatur zu (ca. 0,03 K/m). Dabei zeichnet sich das normale Temperaturprofil im Untergrund durch drei Zonen aus (Abbildung 14).

Aufgrund der saisonalen teils starken thermischen Beeinflussung der obersten solar beeinflussten Zone, sind Aquifere in diesen geringen Tiefen, ohne weitere Wärmedämmmaßnahmen, eher ungeeignet zur langfristigen Speicherung von thermischer Energie. Weiterhin ist Kälte in der Regel nur in oberflächennäheren Aquiferen (Übergangsbereich) gut zu speichern, während sich tiefere Aquifere besser für Wärme eignen.

Somit hängen die Temperaturniveaus, mit welchen ATEs betrieben werden können, stark von den hydrogeologischen Randbedingungen und insbesondere von der Tiefe der Aquifere ab.

Grundsätzlich entsprechen die einspeicherbaren Temperaturen den Grenzen des flüssigen Aggregatzustands von Wasser. Theoretisch sind auch Einspeichertemperaturen von mehr als 100 °C denkbar, solange das Wasser nicht verdampft (Druckabhängig), biologische und chemische Veränderungen des Grundwassers beherrscht werden und es dadurch nicht zu Ausfällungen aus dem Grundwasser kommt.

Für oberflächennahe Aquifere, die oftmals auch für Trink- und Brauchwassergewinnung genutzt werden, sind Nutzungskonflikte möglich und bereits in der Planung zu berücksichtigen. So gibt es hier behördliche/gesetzliche Restriktionen hinsichtlich der Temperaturdifferenzen zwischen ungestörter Aquifertemperatur und Speichertemperatur. Die Regel, dass die Veränderung der Grundwassertemperatur um mehr als 3 K in 100 m Abstand nicht überschritten werden darf, kommt

dabei in oberflächennahen Aquiferen zu tragen. In welchen Aquiferen und Tiefen diese Regel Anwendung findet, liegt letztlich im Ermessensspielraum der bewilligenden Behörde.

Bereits in der frühen Planungsphase müssen die hydrogeologischen Eigenschaften des Standorts sorgfältig abgeklärt werden. Dies führt zu gewissen initialen aber zumeist überschaubaren Investitionskosten. Liegt aber ein geeigneter Standort vor, können mit geringem Platzbedarf, wirtschaftlich grosse Langzeit-Wärmespeicher erschlossen werden.

2.5 Vergleich der Speicherkonzepte

Die nachfolgende Tabelle 1 vergleicht die Speicherkonzepte.

Tabelle 1: Kennwerte unterschiedlicher Speicherkonzepte (Solites, 2017), mit Ergänzungen

Behälter	Erdbecken		Erdsonden	Aquifer
<i>Speichermedium</i>				
Wasser	Wasser*	Kies-Wasser*	Untergrund / Fels	Sand/Kies-Wasser
<i>Wärmekapazität in kWh/m³</i>				
60 - 80	60 - 80	30 - 50	15 - 30	30 - 40
<i>Speichervolumen für 1 m³ Wasseräquivalent</i>				
1 m ³	1 m ³	1.3 - 2 m ³	3 - 5 m ³	2 - 3 m ³
<i>Hydrogeologische Anforderungen</i>				
<ul style="list-style-type: none"> - stabiler Untergrund - möglichst kein Grundwasser - 5 – 15 m tief 	<ul style="list-style-type: none"> - stabiler Untergrund - möglichst kein Grundwasser - 5 – 15 m tief 	<ul style="list-style-type: none"> - bohrbarer Untergrund - Grundwasser vorteilhaft - hohe Wärmekapazität - hohe Wärmeleitfähigkeit - niedrige hydraulische Durchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s) - Grundwasserströmung < 1 m/a - 30 - 200 m tief 	<ul style="list-style-type: none"> - Aquiferschicht mit hoher hydr. Durchlässigkeit ($k_f > 10^{-5}$ m/s) - Deckschichten ober- und unterhalb - geringe Grundwasserströmung - geeignete Grundwasserzusammensetzung bei hohen Temperaturen - Aquifer-Mächtigkeit > 30 m 	
<i>Vorteile</i>				
<ul style="list-style-type: none"> - hohe Wärmekapazität - hohe Be- und Entladeleistungen möglich - gute thermische Schichtung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Behälter - Investitionskosten niedriger als 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberfläche nutzbar - Investitionskosten niedriger als bei Behälter 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberfläche nutzbar - niedrige Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> - Große Speicher einfach realisierbar - Geringer Platzbedarf - zusätzlich geothermische Energie nutzbar

Behälter	Erdbecken		Erdsonden	Aquifer
	bei Behälter			- niedrige Investitionskosten
<i>Nachteile / Risiken</i>				
- hohe Investitionskosten	- Maximaltemperatur begrenzt (ca. 90 °C) - große Oberfläche	- Maximaltemperatur begrenzt (ca. 90 °C) - große Oberfläche - thermische Schichtung geringer als bei Wasser	- Maximaltemperatur begrenzt (ca. 90 °C) - geringe Be- und Entladeleistung - ggf. Zusatzkomponenten notwendig (Pufferspeicher, Wärmepumpe)	- abhängig von lokalen hydrogeol. Gegebenheiten - ggf. Konflikte mit Grundwassernutzungen - Chemismus des Grundwassers - ggf. Auflagen des Grundwasserschutzes - Fündigkeitsrisiko

3 Auswahlkriterien und Systemeinbindung

Bei der Auswahl eines geeigneten Speichertyps für ein bestimmtes Anlagenkonzept müssen alle relevanten Randbedingungen beachtet werden:

- lokale geologische und hydrogeologische Eigenschaften des Untergrunds
- Systemintegration des Speichers
- benötigte Speichergroße
- Speichertemperaturen und Speicherleistungen
- Anzahl der Speicherladezyklen
- rechtliche Bedingungen

Letztendlich wird die Entscheidung für ein Speicherkonzept von den Rahmenbedingungen und von der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Möglichkeiten abhängen.

Für alle Speichertypen ist eine geologische Untersuchung des Untergrunds in der Konzeptphase notwendig. Die höchsten Anforderungen an den Untergrund haben Aquifer- und Erdsonden-Wärmespeicher. Zudem müssen die rechtlichen Bedingungen für einen Speicherbau geprüft werden. In den meisten Ländern muss die lokale Wasserschutzbehörde ihre Erlaubnis zur Nutzung des Untergrunds geben, auch wenn der Untergrund nur durch die Speicherverluste eines Behälter- oder Erdbecken-Wärmespeichers erwärmt (oder abgekühlt) wird.

Nach Inbetriebnahme eines erdvergrabenen oder den Untergrund nutzenden saisonalen Wärmespeichers dauert es je nach Speicherkonzept zwei bis fünf Jahre, bis der Wärmespeicher seine planmäßigen Betriebsbedingungen erreicht. In dieser Anfangszeit wird der Untergrund erwärmt und die Speicherverluste sind höher als im planmäßigen Betrieb.

Ein entscheidender Faktor für den Betrieb eines Wärmespeichers sind die Rücklauftemperaturen des Wärmenetzes. In Systemen ohne Wärmepumpe stellt die Rücklauftemperatur in den Speicher

das niedrigste Temperaturniveau des Gesamtsystems dar, auf das der Wärmespeicher abgekühlt werden kann. In vielen Wärmenetzen sind die gemessenen Netzurücklauftemperaturen wesentlich höher als die zuvor geplanten Werte, wodurch eine geringere Wärmekapazität und Leistungsfähigkeit des Wärmespeichers verursacht wird (Mangold, et al., 2009) (Schmidt, et al., 2013).

Die Integration eines saisonalen Wärmespeichers in das Gesamtsystem und eine gute Planung des Wärmespeichers sowie der weiteren Komponenten der Wärmeerzeugung (Wärmenetz, Wärmeübergabestationen, technische Gebäudeausrüstung) sind für den Betrieb des Gesamtsystems wesentlich. Die Betriebsbedingungen wie Betriebstemperaturen, Qualität der Speicherschichtung und die Rücklauftemperaturen des Wärmenetzes sind in jedem System individuell und beeinflussen die Speichereffizienz. Diese Faktoren werden jedoch nicht allein durch den Wärmespeicher, sondern durch das Gesamtsystem bestimmt, dessen Eigenschaften deshalb sehr genau vorgeplant werden müssen. Die wichtigsten Eingangsgrößen für die Planung sind die Abschätzung der minimalen, maximalen und mittleren Temperaturen des Wärmespeichers sowie des Wärmebedarfs und der Temperaturen des Wärmenetzes. Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmenetzes definieren die maximale Temperaturdifferenz und damit die nutzbare Wärmekapazität des Wärmespeichers. Je nach Gesamtsystem können zusätzliche Komponenten wie Pufferspeicher oder Wärmepumpen wirtschaftlich sinnvolle Ergänzungen darstellen (Schmidt, et al., 2013).

3.1 Systemanforderungen

Thermische Netze werden unterteilt in Hochtemperaturnetze (Netz-Vorlauftemperatur $> 60\text{ °C}$) und Niedertemperaturnetze (Netz-Vorlauftemperatur $< 60\text{ °C}$), siehe Abbildung 15. Bei den Hochtemperaturnetzen unterscheidet man außerdem noch über Heißwassernetze (Netz-Vorlauftemperatur $> 105\text{ °C}$) und Warmwassernetze (Netz-Vorlauftemperatur zwischen 60 und 105 °C). Bei diesen Netzen kann die gelieferte Wärme direkt zur Heizung und Warmwasser-Erzeugung genutzt werden.

Niedertemperatur-Netze zwischen 30 und 60 °C Vorlauftemperatur können zur Direktheizung verwendet werden, zur Warmwassererzeugung werden Zusatzsysteme benötigt. Liegt die Netz-Vorlauftemperatur unter 30 °C muss immer ein Zusatzsystem, in der Regel eine Wärmepumpe, eingesetzt werden. Beträgt die Netz-Vorlauftemperatur weniger als 20 °C kann das Netz zur direkten Kühlung verwendet werden.

Grundlagen thermische Netze – Typisierung Thermischer Netze

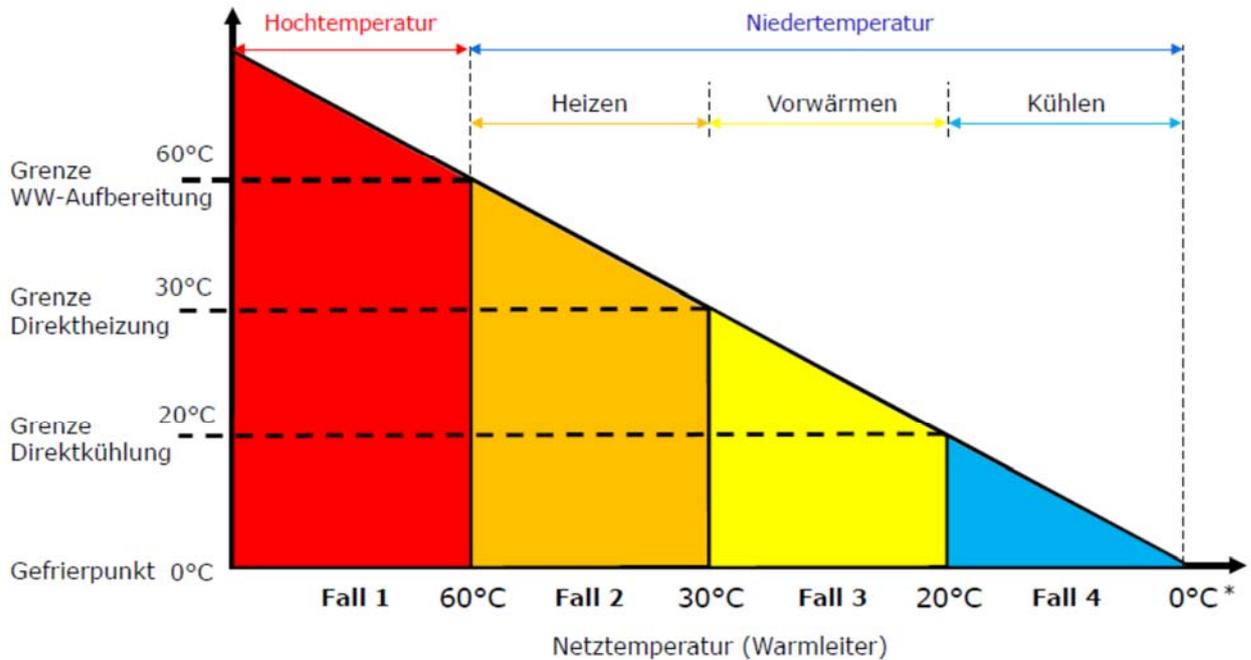


Abbildung 15: Typisierung Thermischer Netze (Hangartner, et al., 2017)

Der Einsatzbereich der verschiedenen Speichertypen ist nicht für alle Temperaturbereiche möglich. Lediglich der Speicherbehälter kann konstruktiv so ausgelegt werden, dass dieser Speichertyp über den gesamten Temperaturbereich eingesetzt werden kann.

Einsatzbereiche verschiedener Speichertypen:

Behälter-Wärmespeicher	drucklos oder als Druckspeicher je nach Bauart (Stahl, Beton, Kunststoff) 5 – 150 °C (200 °C)
Erdbecken-Wärmespeicher	direkte oder indirekte Be- und Entladung je nach Innenauskleidung bis zu 90 °C
Erdsonden-Wärmespeicher	indirekte Be- und Entladung Temperaturbereich bis 90 °C
Aquifer-Wärmespeicher	Temperaturbereich > 100 °C möglich, abhängig von Geologie und Tiefe

3.2 Einbindung in Thermische Netze

Befindet sich der Speicher in unmittelbarer Nähe der Wärmequelle und ist der Speicher konstruktiv auf das thermische Netz ausgelegt (Druck, Temperatur) so wird in der Regel eine direkte Einbindung gewählt, siehe Abbildung 16.

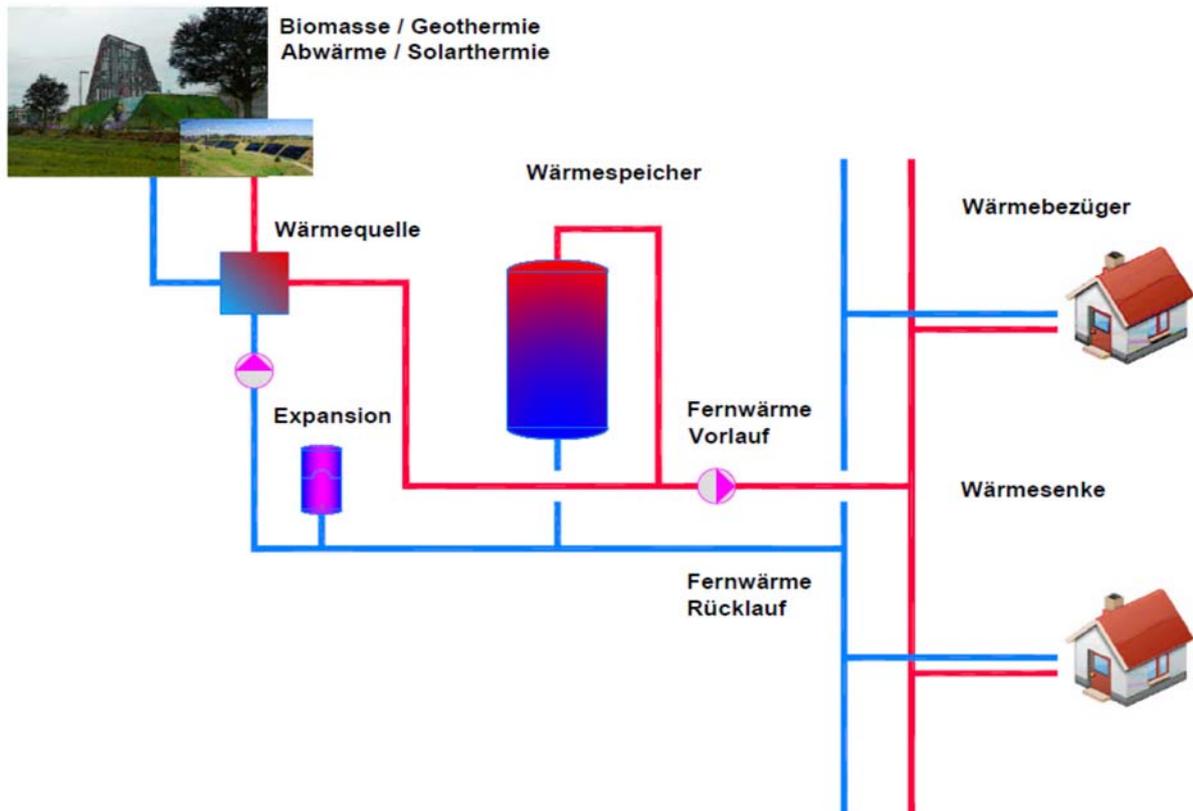


Abbildung 16: Speichereinbindung «direkt» als hydraulische Weiche

Falls der statische Druck des Wärmespeichers- bedingt durch einen hohen Netzdruck - nicht ausreicht, wird der Wärmespeicher hydraulisch vom Netz getrennt. Die Netztrennung kann über 2 Systeme realisiert werden.

1. Wärmeübertrager mit Lade / Entladepumpe, siehe Abbildung 17
2. Druckreduzierventile und Rückföhrpumpen, siehe Abbildung 18

In beiden Fällen ist die Lade- und Entladeleistung aufgrund der installierten Aggregate (Wärmeübertrager, Pumpen) limitiert.

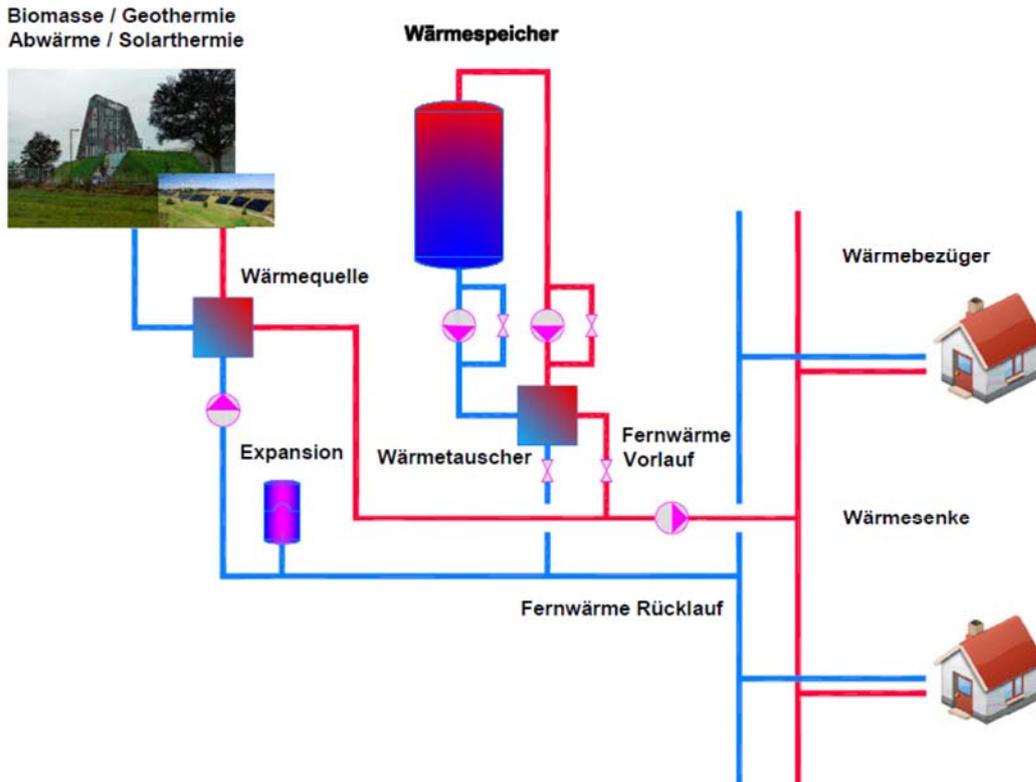


Abbildung 17: Speichereinbindung «indirekt» mit Wärmeübertrager

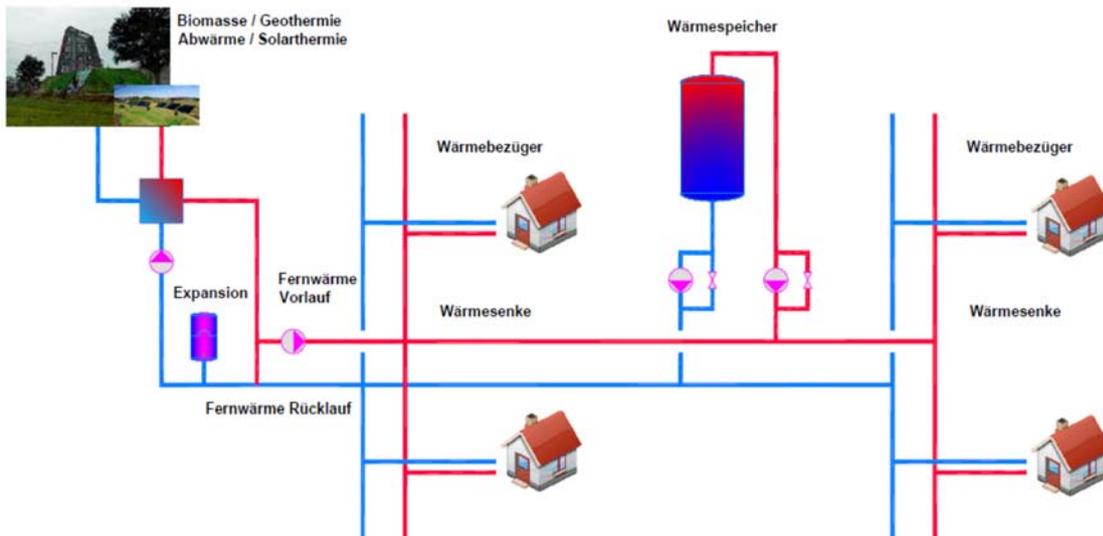


Abbildung 18: Speichereinbindung «indirekt» mit Pumpen/Ventilen

Wird der Wärmespeicher aufgrund der örtlichen Gegebenheiten im Wärmenetz zwischen verschiedenen Wärmeverbrauchern aufgestellt, ist eine „Indirekte Einbindung“ (siehe oben) zu entkoppeln.

3.3 Wärmequellen / Wärmesenken

Die Nutzung verschiedenster Wärmequellen unterschiedlicher Bauart und diverser Energieträger kann durch eine multifunktionale Nutzung eines saisonalen Wärmespeichers optimiert werden. Oft sind dies:

- Nutzung von Solarenergie in thermischen Anlagen
- Einsatz von Biomasse zur Wärme- und Stromerzeugung
- Nutzung und Optimierung von geothermischer Energie
- Nutzung von Abwärme in der Industrie
- Nutzung und Optimierung der Abwärme, die bei der Stromerzeugung in Kraftwerken und KVAs entsteht

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmespeicherung kann verbessert werden, wenn der Speicher nicht nur einer Wärmequelle zur Verfügung steht, sondern auch zur Spitzenlastpufferung, Betriebsoptimierung, Speicherung von KWK-Abwärme, sowie zur Optimierung von Biomassekesseln, der Stromproduktion usw. eingesetzt werden kann. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der Mehrfachnutzen des Speichers nicht zu Lasten der meistens regenerativen Hauptwärmequelle führt.

Je nach Wärmeerzeuger können bei der Be- und Entladung des Speichers unterschiedliche Massenströme sowie Temperaturen auftreten, die auch je nach Erzeuger konstant oder schwankend sein können. Der Speichertyp sowie die restliche Anlagentechnik müssen zwingend hierauf abgestimmt sein.

Optimierungen müssen grundsätzlich auf Systemebene stattfinden, was bedeutet, dass bei der Speicherplanung das restliche Versorgungssystem berücksichtigt werden muss. Sowohl bei der Dimensionierung (Kapazität, Leistung) als auch in der Dynamik des Systems. Zu diesem integralen Planungsansatz gehört auch eine frühzeitige Einbeziehung aller Beteiligten am Planungsprozess des gesamten Wärmeversorgungssystems, um Schnittstellen und Randbedingungen zu definieren und aufeinander abzustimmen.

Jede Wärmequelle und Wärmesenke ist eine „aktive Komponente“, die Energie in das System einbringt (Quelle) oder entnimmt (Senke). Im Gegensatz dazu sind Speicher stets passive Komponenten: Ihre Wirkungsweise beruht auf der Be- und Entladung durch Wärme, die über Leitungen und andere technische Komponenten zu- oder abgeführt wird. Die Funktionalität eines Speichers kann also nur abhängig von einer ganz bestimmten Systemkonfiguration und Anlagenregelung bewertet werden. Die systemseitig erforderlichen Wärmeleistungen zur Be- und Entladung des Speichers müssen mit den Randbedingungen der in Frage kommenden Speicherkonzepte in Einklang gebracht werden.

Beispiel: Ein Erdsonden-Wärmespeicher kann große Wärmemengen aufnehmen, jedoch nur vergleichsweise niedrige Wärmeleistungen übertragen. Anstatt die übertragbare Wärmeleistung eines Erdsonden-Wärmespeichers durch mehr oder tiefere Sonden zu erhöhen, kann die Integration eines zusätzlichen Pufferspeichers eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung sein.

Die Wärmequelle bestimmt die obere Temperatur des Speichers, die Wärmesenke, zumindest wenn keine Wärmepumpe ins System integriert ist, die untere. Diese Temperaturen definieren bei gegebener Quellentemperatur die nutzbare Wärmekapazität Q des Speichers:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}})$$

Je höher die Temperatur der Wärmequelle und je tiefer die Temperatur der Wärmesenke, desto höher ist die Wärmekapazität des Speichers, was gleichzeitig bedeutet, dass der Speicher entsprechend kleiner gebaut werden kann. Eine niedrige Rücklauftemperatur der Verbraucher ist deshalb von entscheidender Bedeutung bei der Wärmespeicherung (und auch bei der Wärmeverteilung im thermischen Netz). Außerdem besteht bei einer niedrigen Rücklauftemperatur die Möglichkeit, den Speicher auf verschiedenen Temperaturniveaus zu laden, was wiederum das Gesamtsystem sehr viel flexibler macht.

3.4 Geologie / Hydrogeologie

Die Geologie ist bei allen saisonalen Speichertypen von Bedeutung. Bei den Behälter- und Erdbecken-Wärmespeichern ist eine minimale statische Tragfähigkeit wichtig. Ausserdem sollte der Grundwasserspiegel deutlich (mindestens 2 Meter) unterhalb des Speichers liegen.

ATES stellen hohe Anforderungen an die Kenntnis der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten. Aus diesem Grund sind geeignete Geologiebüros frühzeitig in die Planung mit einzubeziehen. Der ideale Aquifer zur thermischen Energiespeicherung ist homogen und isotrop hydraulisch gut durchlässig. Idealerweise ist der Aquifer allseitig (nach oben und unten, sowie auch lateral) durch thermisch und hydraulisch möglichst gering leitende Gesteine umgeben. Zur Minimierung von Speicherverlusten durch Grundwassertransport sind geringe Grundwasserfließgeschwindigkeiten nötig.

Die möglichen Temperaturniveaus von ATES reichen von Niedertemperatur zwischen 0 und 20 °C bis zu Hochtemperaturspeichern von über 100 °C. Das Temperaturniveau zur Wärmespeicherung wird wesentlich durch die Tiefe des Aquifers bestimmt.

Bei Erdsonden-Wärmespeichern muss primär der Schutz der als Trinkwasserreserve geeigneten Grundwassergebiete gewährleistet werden. Zusätzlich sollten geologisch bedingte Bohrrisiken vermieden werden wie z.B. das Aufquellen von Anhydrit durch Wassereintritte, Tangierung von Karstgebieten sowie Erdgas- oder Arteservorkommen. Sofern keine Beeinträchtigung der Grundwasserreserven und keine geologischen Risiken zu erwarten sind, können Erdsonden-Wärmespeicher in der Regel gebaut werden. In den meisten kantonalen Geoportalen sind für die Bewilligungen von Erdwärmesonden in speziellen Karten solche Gebiete bereits aufgeführt.

3.5 Dimensionierung / Platzbedarf

Die frühzeitige Einbeziehung aller an der Planungsaufgabe beteiligten Personen ist für den Projekterfolg eines saisonalen Speichers zwingend notwendig. Meist sind die Detaildaten des

Energiebedarfs noch nicht bekannt – trotzdem sollte schon frühzeitig mit den ersten Projektschritten begonnen werden. Alle Systemkomponenten sowohl beim Neubau, als auch bei Sanierungsmaßnahmen müssen aufeinander abgestimmt sein. Auch die Regelung des Gesamtsystems inklusive Speicher hat wesentlichen Einfluss auf einen wirtschaftlichen Betrieb.

Vorhandene und geplante Systemkomponenten (Wärmeerzeuger, Wärmeverbraucher, technische Komponenten) müssen mit Prognosen und eventuellen Systemveränderungen (z.B. Hinzukommen weiterer Verbraucher, Wechsel der Wärmequelle) in Szenarien betrachtet werden.

Bei Anlagen im Bestand sind zudem andere Möglichkeiten zur Minimierung des Energiebedarfs wie Wärmedämmmaßnahmen primär zu prüfen, da die Einbindung eines saisonalen Wärmespeichers meist nur in einem energetisch sanierten System sinnvoll ist.

Neben den zahlreichen anderen Voraussetzungen ist eine gewisse Mindest-Baugröße eine wichtige Bedingung für die technisch und wirtschaftlich sinnvolle saisonale Wärmespeicherung. In der Regel ist erst bei Speichern mit einem Volumen von mehr als 1.000 m³ eine saisonale Wärmespeicherung mit moderaten Dämmstärken erreichbar.

Bei Untergrund-Wärmespeichern (Aquifer- und Erdsonden-Wärmespeicher) ist die Abhängigkeit der Wärmeverluste von der Speichergröße besonders relevant, da diese Speicher in der Regel keine technische Wärmedämmung und keine Trennung zwischen „innen“ und „außen“ haben.

Der bauliche (obertägige) Platzbedarf ist bei Aquifer-Wärmespeichern sehr gering. Hier sind lediglich die technischen Installationen (Wärmeübertrager, Pumpen etc.) und allenfalls ein Kurzzeit-Pufferspeicher zu berücksichtigen. Der eigentliche Speicher befindet sich ja im Untergrund.

Bei allen anderen saisonalen Wärmespeichern entspricht die Grundfläche des Speichers dem zusätzlichen Platzbedarf. Ein Erdsonden-Wärmespeicher kann bei einem Neubau auch unter der Bodenplatte des Gebäudes gebaut werden, wodurch kein zusätzlicher Platzbedarf und damit verbundener Grunderwerb notwendig ist. Bei Erdbecken-Wärmespeichern mit Kies-Wasser-Gemisch als Speichermedium, wird der Speicher in die Umgebung integriert und kann dann als Grünfläche, Spielplatz, etc. wieder genutzt werden.

3.6 Typische Fragen vor der Projektierung eines saisonalen Speichers

- Welche Quellen können saisonal zur Ladung des Speichers genutzt werden?
- Wie hoch ist der saisonale Überschuss oder auch die Abwärme, welche gespeichert werden kann?
- Wieviel dieser Energie könnte im Winter genutzt werden?
- Mit welcher Leistung fällt die Energie an (Speicher laden), und mit welcher Leistung wird die Energie benötigt (Speicher entladen)?
- Welche minimalen und maximalen Temperaturen können auftreten?
- Welche Temperaturen werden beim Entladen aus dem Speicher benötigt?
- Mit welcher Temperaturdifferenz kann der Speicher betrieben werden?

- Sind ev. Zusatzkomponenten wie Pufferspeicher oder Wärmepumpe technisch-wirtschaftlich sinnvoll?
- Gibt es bei den Verbrauchern Heiz- und Kühlbedarf? Fällt dieser Bedarf gleichzeitig oder saisonal getrennt an?
- Wie ist die örtliche Situation? Welche Flächen könnten für einen Speicher genutzt werden? Wo steht wieviel Platz zur Verfügung (Fläche, Tiefe)?
- Wie ist der Untergrund aufgebaut (Grundwasser, Festigkeit,...)
- Gibt es eine nutzbare Infrastruktur zum Bau eines saisonalen Speichers? Mit An- und Abfahrtswegen, Deponie für Aushub, etc...
- Wie soll / kann der Platz über dem Speicher zukünftig genutzt werden?
- Gibt es die Möglichkeit zum Bau eines Erdsonden-Wärmespeichers (Geologie, Bewilligung)?
- Gibt es geologische Untersuchungen zum Untergrund, die für den Bau eines Aquifer-Wärmespeichers (ATES) als Grundlage genutzt werden könnten? Wäre ein Aquifer-Wärmespeicher bewilligungsfähig?
- Was kostet die Abwärme oder die Überschussenergie?
- Was kostet die meist konventionelle Energie, wenn kein Wärmespeicher gebaut wird?

Durch diese Fragen, respektive der daraus folgenden Antworten, kann eine Bewertungsmatrix entwickelt werden, anhand derer entschieden werden kann, ob es sinnvoll ist, den Bau eines saisonalen Wärmespeichers weiter zu verfolgen. Diese Fragen und die zugehörigen Antworten müssen bereits in einer sehr frühen Projektphase bearbeitet werden, um den Bau eines saisonalen Wärmespeichers zu ermöglichen. Es ist jedoch nicht möglich, zu Beginn eines Projektes alle Fragen und Antworten zu bearbeiten. Es gilt hier, einen saisonalen Wärmespeicher in das Gesamtkonzept zu integrieren. Die Detailbearbeitung und die Entscheidung, ob ein Wärmespeicher gebaut wird und welcher Speichertyp der Beste ist, kann zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der Projektbearbeitung abgewickelt werden.

4 Rahmenbedingungen

Grundlage der energetischen Rahmenbedingungen bilden die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (kurz MuKE). Diese sind ein von den Schweizer Kantonen gemeinsam erarbeitetes Gesamtpaket energierechtlicher Vorschriften im Gebäudebereich. Sie basieren auf den 2014 von der Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK) getroffenen Einigung auf Mustervorschriften für den Energiebereich. Die MuKE sind Empfehlungen zur konkreten Umsetzung im kantonalen Bau- und Energierecht. Im Kern sind die MuKE energetische Bauvorschriften und damit für die Bauherren und Planer Planungsvorgaben für Neu-, Um- oder Erweiterungsbauten, deren Einhaltung für einen Hochbau oder eine Anlage Voraussetzung für die Erteilung einer Baubewilligung ist. Nach der Erstellung des Baus wird die Einhaltung der Baubewilligung und der Bauvorschriften durch die

Baubehörden überprüft. Die Vorschriften sind Mindestanforderungen, die von allen Bauten erfüllt werden müssen. Bauherren können nach wie vor selbst ehrgeizigere Konzepte umsetzen.

Die Definition betrachtet ein Gebäude mit dem dazugehörigen Grundstück. Energie, die auf dem Grundstück oder am Gebäude produziert, aus dem darunter liegenden Erdreich oder im Gebäude (Abwärme) gewonnen wird, wird nicht bilanziert. Gemessen wird nur die Energie, die als Strom oder über Wärme- oder Gasnetze sowie als Heizöl, Holz oder Kohle dem Gebäude (Grundstück) im Jahresverlauf zugeführt wird.

Erreicht wird dieses Ziel durch die Anforderungen an die Deckung des Wärmebedarfes bei Neubauten, die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien, insbesondere wenn dieser selbstproduziert wird, sowie die effizientere Nutzung der eingesetzten Energie.

Die MuKE sind Empfehlungen an die Kantone. Die Kantone sind gehalten, diese Empfehlungen in das kantonale Recht umzusetzen. Auf Verordnungsebene ist zu beachten, dass verschiedene technische Normen, die für den Vollzug der MuKE maßgebend sind, auf europäischer Ebene in Revision sind (Internet-Medien, 2017). Die Umsetzung in schweizerische SIA-Normen erfolgt verzögert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass auf Verordnungsstufe in wenigen Jahren mit einem zusätzlichen Revisionsbedarf zu rechnen ist.

4.1 Rechtliches

Grundsätzlich steht in der Schweiz jeder Eigentümerschaft eines Grundstücks das Recht zu, Erdwärme und Speicheranlagen im Erdreich zu nutzen. Die wesentliche Rechtsgrundlage findet sich im Sachenrecht – konkret im Zivilgesetzbuch in Art. 667 Abs. 1 (ZGB, 1907). Dieser definiert die Erstreckung des Eigentums an Grund und Boden als so weit ins Erdreich reichend, wie für die Ausübung des Eigentums ein schutzwürdiges Interesse besteht und die Eigentümerschaft den dafür beanspruchten Raum beherrschen kann (*BGE* 93 II 170 vom 5.5.1967). Beide Voraussetzungen gelten beim Einsatz einer Speicheranlage mit Erdbecken-Wärmespeicher, Erd-Wärmespeicher und Erdsonden-Wärmespeicher als erfüllt. Für einen Aquifer-Wärmespeicher gilt dies auch bis zu einer Tiefe von 400 Metern. Ein Vorbehalt besteht insofern, als der Ausübung von Eigentumsinteressen gemäss Art. 641 Abs. 1 ZGB Schranken gesetzt sind. Diese können privatrechtlicher oder öffentlich-rechtlicher Natur sein. Die privatrechtlichen Eigentumsbeschränkungen dienen insbesondere dem Schutz von Interessen Dritter, z.B. Nachbarn.

Eigentumsbeschränkungen im öffentlichen Interesse setzen eine genügende Rechtsgrundlage auf Bundesebene oder – basierend auf einer Kompetenzdelegation an die Kantone – einen kantonalen Rechtserlass voraus. Im Falle der saisonalen Speicherung setzt z.B. das Gewässerschutzgesetz (GSchG, 1991) solche Schranken. Es erlaubt den Kantonen, Gewässerschutzbereiche zu definieren, in denen Eigentumsbeschränkungen (beispielsweise Grenzabstände) gelten (z.B. § 35 EG GSchG-ZH, 1974). Weitere Einschränkungen können gestützt auf das Eisenbahngesetz (EBG, 1957), das Bundesgesetz über die Nationalstrassen (NSG, 1960) und das Umweltschutzgesetz (USG, 1983) erfolgen (Stichworte: Tunnelbauten, Altlasten) oder gestützt auf kantonalen

Rechtsordnungen wie die Archäologiegesetzgebung (Schutzzonen; z.B. Kanton Basel-Landschaft, ArchG, 2002) und die Baugesetzgebung (Bauverbote in Baulinienbereichen).

Einige Kantone stellen die Nutzung von Erdwärme und Aquiferen zusammen mit anderen Nutzungen des Untergrunds zudem unter die generelle Sachherrschaft der öffentlichen Hand (vgl. Swisstopo, www.geologieportal.ch) – sei dies über eine entsprechende Festlegung in der Verfassung (z.B. Art. 38 Abs. 2 in der Verfassung des Kantons Basel-Stadt, 2005), über eine Festlegung in einem Regalgesetz bzw. einem Gesetz zur Nutzung des Untergrundes (z.B. Art. 9 Bst. c im Bergregalgesetz des Kantons Schwyz, 1999 oder Art. 2 Abs. 3 GNB-AG, 2012) gestützt auf Art. 94 BV (Regalrechte der Kantone) oder über eine Festlegung im kantonalen Einführungsgesetz zum Zivilgesetzbuch gestützt auf Art. 664 ZGB (z.B. Art. 83 a EG ZGB-NW, 1988). Sowohl auf Verfassungsebene (z.B. Art. 55 Abs. 2 in der Verfassung des Kantons Aargau, 1980) als auch auf Gesetzesebene (z.B. Art. 2 Abs. 1 BRG-BE, 2003) wird dabei festgehalten, dass bestehende Privatrechte vorbehalten bleiben und dass das Regalrecht Gemeinden oder Privaten übertragen werden kann. Darauf abgestützt wird die Nutzung von untiefer Wärme (bis 400 m) für den Eigengebrauch in einigen Kantonen explizit von der öffentlichen Sachherrschaft ausgenommen (z.B. Art. 158 EG ZGB-BS, 1911) – dies im Gegensatz zur Wärmenutzung in mehr als 400 m Tiefe.

Während die Bundesverfassung und die Bundesgesetzgebung entsprechende Regeln zur Nutzung von Wasser und Wald kennen (Art. 76 und Art. 77 BV; GSchG, 1991; WAG, 1991), kommt der Begriff "Untergrund" in der Rechtsordnung des Bundes nicht einmal vor. In seiner Antwort vom 18. November 2009 auf eine Interpellation betreffend "Regelung der nachhaltigen Nutzung des Untergrundes" schreibt der Bundesrat: *"Das geltende Raumplanungsrecht, sei es auf Bundes- oder Kantonsebene, nimmt sich der Nutzung des Untergrunds nicht an; es existieren heute keine einheitlichen Kriterien bzw. keine einheitliche Praxis zur Nutzung des Untergrunds"* (Bundesrat, 2009). Die fehlende gesetzliche Grundlage zur Regelung der Nutzung des Untergrunds auf Stufe Bund führt dazu, dass die Hoheit über den Untergrund bei den Kantonen liegt. Entsprechend vielfältig stellt sich die Rechtslage in der Schweiz dar.

4.2 Bau- und Betriebsbewilligung

Wie in Kap. 4.1 erläutert, ist die Nutzung des Untergrundes bis 400 Meter Tiefe in vielen Kantonen der privaten Sachherrschaft überlassen (Abb. 2). Entsprechend wird für diese Anwendung keine Baubewilligung verlangt (z.B. Art. 4 Abs. 3 GGBNU-LU, 2013). Die Kantone berufen sich bei dieser Praxis auf Art. 23 RPG. Dieser Rechtssatz ermöglicht es den Kantonen, Ausnahmen von der Bewilligungspflicht für Bauten und Anlagen gemäß Art. 22 Abs. 1 RPG zu gewähren.

Das Ausnahmerecht wird von den Kantonen insbesondere für Maßnahmen von geringfügiger Bedeutung in Anspruch genommen (vgl. § 309 Abs. 3 PBG-ZH, 1975). Erdwärmesonden werden somit in verschiedenen Kantonen als "Bagatellmassnahme" taxiert. Die Bedingungen regeln die meisten Kantone auf Verordnungsstufe. In einzelnen Kantonen kommt für Anlagen von untergeordneter Bedeutung anstelle der Bewilligungspflicht ein einfaches Meldeverfahren zur

Anwendung (z.B. § 37 Abs. 2 KGschV-ZH, 1975). Die rechtliche Grundlage dafür findet sich in den kantonalen Energiegesetzen.

In allen Kantonen erfordern sowohl Aquifer- als auch Erdsonden-Wärmespeicher eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung. Die Rechtsgrundlagen dafür bilden – gestützt auf Art. 19 Abs. 2 GschG und Art. 32 der Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998) – die kantonalen Einführungsgesetze zum Gewässerschutzgesetz (z.B. § 8 EG GschG-ZH) oder die dazu gehörenden Gewässerschutzverordnungen. Die konkreten Bestimmungen finden sich in der Regel in den Bauverordnungen und Bauverfahrensverordnungen der Kantone. Zuweilen wird auch auf technische Normen (Regeln der Baukunde) verwiesen (z.B. § 37 Abs. 1 KGschV-ZH) oder auf die Vollzugshilfe des Bundes (BAFU, 2009). Kommen bei Bewilligungen baurechtliche Aspekte ins Spiel – z.B. Baulinien – verlangen die Kantone zusätzlich zur gewässerschutzrechtlichen Bewilligung eine Baubewilligung durch die Gemeinde. Diese wird meist im Sinne einer Verfahrenskoordination im Rahmen der gewässerschutzrechtlichen Bewilligung erteilt – es findet also kein separates Verfahren auf kommunaler Ebene statt. Die meisten Kantone verlangen einen Minimalabstand von Erdsonden von 3 m bis 5 m von der Grundstücksgrenze.

Für Behälter- und Erdbecken-Wärmespeicher ist, wie auch für die zugehörigen technischen Gebäude, bei der örtlichen Baubehörde eine Baubewilligung einzuholen. Hierzu ist vor Baubeginn beim zuständigen Bauamt der Gemeinde ein Baugesuch einzureichen. Je nach lokalen (kantonalen) Vorschriften kann auch ein „vereinfachtes Verfahren“ ausreichen.

In der Regel sind folgende Unterlagen beim Einreichen der Baubewilligung abzugeben:

- Baugesuchsformular mit allfälligen Anhängen
- Grundbuchplan mit eingezeichnetem Bauprojekt
- Umgebungsplan
- Grundriss / Bauplan
- Baubeschrieb

Die Baueingabe muss vom Bauherr, dem Grundeigentümer und dem Projektverfasser datiert und unterzeichnet werden.

Nach Abgabe der Unterlagen wird das Gesuch auf seine Vollständigkeit geprüft und ein Vorentscheid wird getroffen, in dem geprüft wird, ob es in der jeweiligen Bauzone erlaubt ist zu bauen, ob das Grundstück hinreichend erschlossen ist (Infrastruktur). Wenn alle benötigten Unterlagen vorhanden sind, wird das Gesuch für Einsprachemöglichkeiten von der Gemeinde veröffentlicht. Nach Ablauf einer mehrwöchigen Frist wird das Baugesuch im ordentlichen Verfahren, oder (bei Einsprachen) im Anzeigeverfahren verhandelt. Anschließend wird in der Regel innert zwei Monaten über das Gesuch befunden. Ist die Baubewilligung erfolgt, kann die Bauphase beginnen.

Ein möglicher Ablaufplan eines Baugesuchs als Muster:

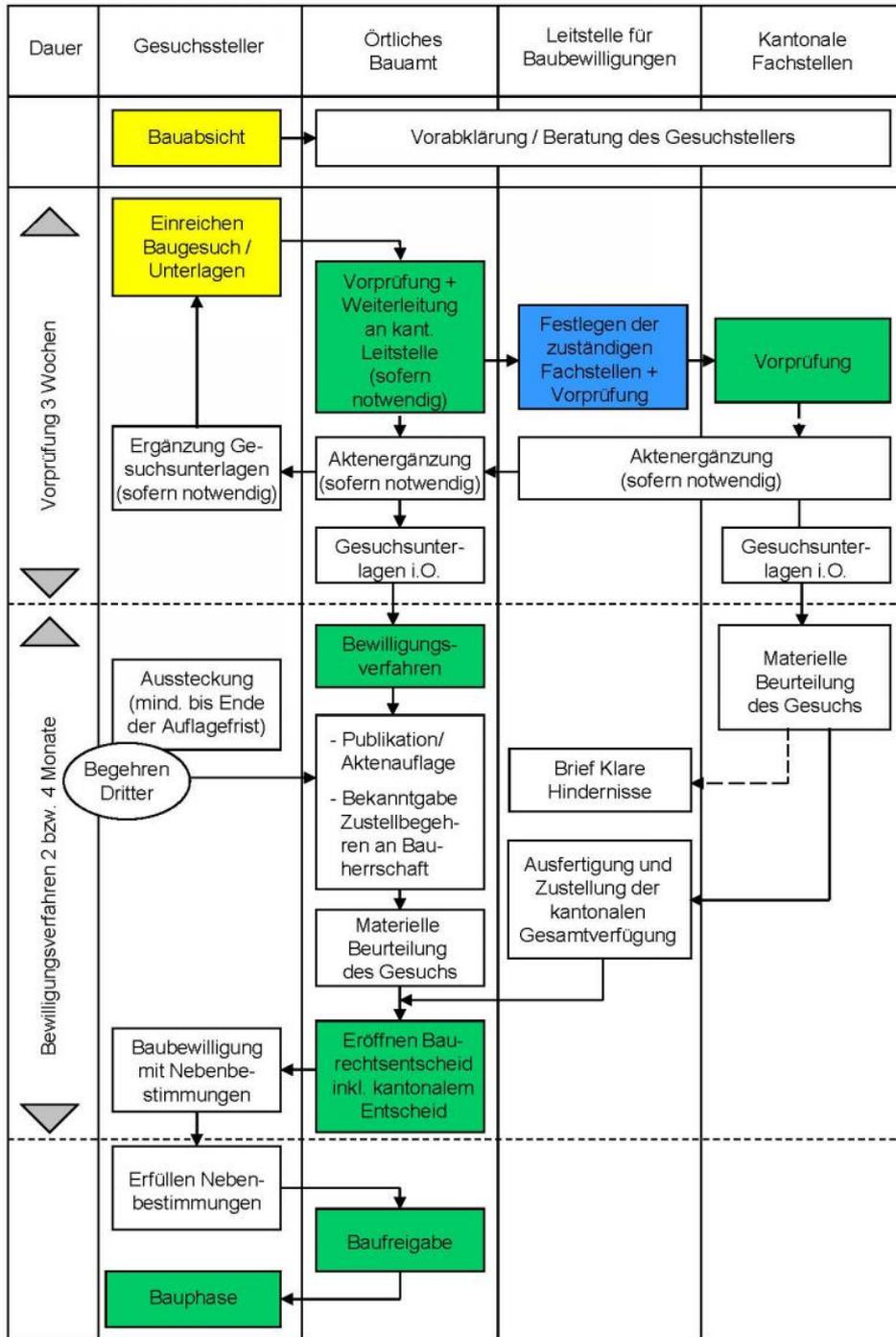


Abbildung 19: Ablaufplan Baugesuch (Muster, Kanton Zürich)

5 Kosten und Wirtschaftlichkeit

In der Schweiz bestehen mit Ausnahme von Erdsonden-Wärmespeichern keine Erfahrungen bezüglich der Investitionskosten und der Wirtschaftlichkeit von thermischen saisonalen Speichern. In den Niederlanden gibt es eine grosse Anzahl von Aquifer-Wärmespeichern, die meistens zur

Kühlung eingesetzt werden (Bakema, et al., 2016). In Dänemark sind bereits einige grosse Erdbecken -Wärmespeicher gebaut worden (Solites, 2018). In Deutschland sind die realisierten saisonalen Wärmespeicher meist im Rahmen von Pilot- oder Forschungsvorhaben entstanden (Solites, 2017). Diese haben zwar den Bau des Wärmespeichers gefördert, hierfür jedoch auch Bedingungen gestellt wie z.B. eine innovative Bauweise, eine solarthermische Beladung oder anderes. Die Baukosten der realisierten saisonalen Wärmespeicher konnten wissenschaftlich evaluiert werden und sind in Abbildung 20 dargestellt (Solites, 2017). Diese zeigt die grundlegenden Kostentendenzen und – differenzen für die einzelnen Speichertypen über der Speichergröße in m^3 Wasseräquivalent auf. Die Baukosten differieren je nach Projektandbedingungen. Es ist davon auszugehen, dass die Realisierungskosten saisonaler Wärmespeicher sinken, wenn diese Speicher mehrfach realisiert werden.

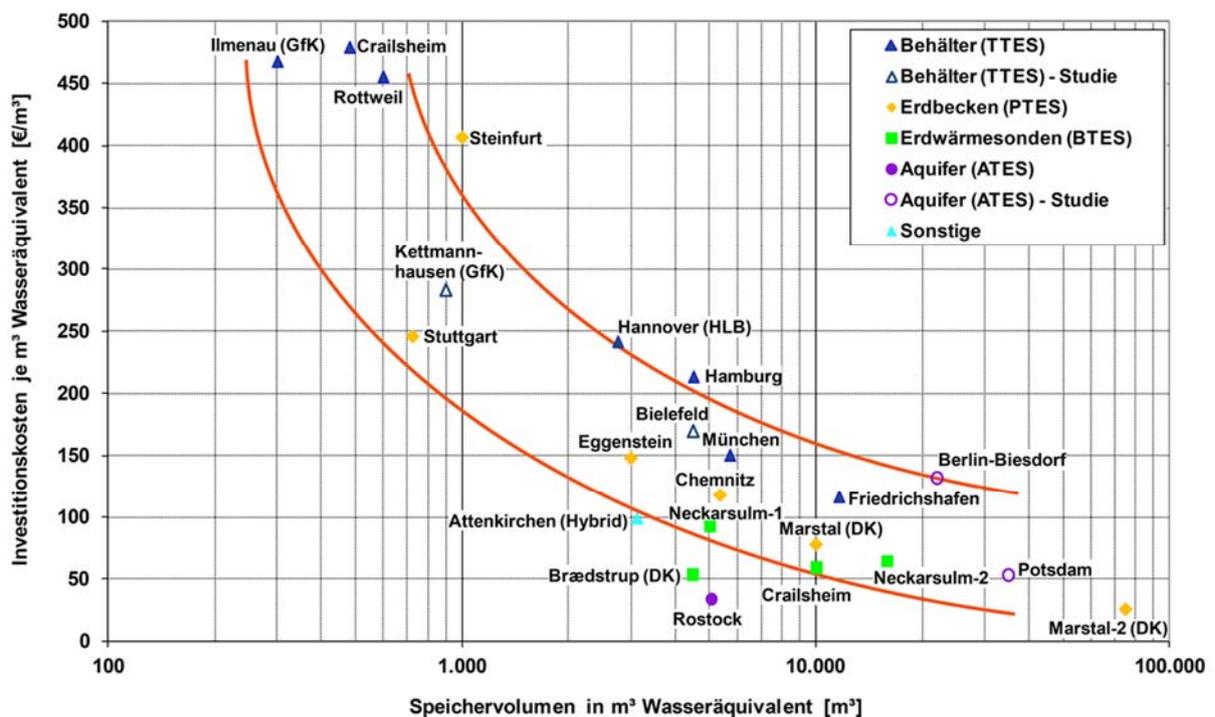


Abbildung 20: Spezifische Kosten von saisonalen Wärmespeichern (Angaben ohne Planungskosten und MWSt.), HLB: Hochleistungsbeton, GfK: glasfaserverstärkter Kunststoff (Solites, 2017)

In Dänemark wurden weitere große Erdbecken-Wärmespeicher ohne den Rahmen und die Förderung von Forschungsprojekten realisiert, diese sind in der Grafik jedoch nicht enthalten.

Die Effizienz von thermischen saisonalen Speichern liegt je nach Typ und Rahmenbedingungen (Temperaturen, Wärmedämmung, Geometrie) zwischen 50 und 90 % innerhalb eines Lade-Entladezyklusses von 6 bis 12 Monaten. Bei einem Speichervolumen von über 5 000 m^3 Wasseräquivalent können heute spezifische Wärmekosten der gespeicherten Wärme aus dem saisonalen Wärmespeicher erreicht werden:

- 8 – 20 Fr/MWh bei Heisswasser- Wärmespeichern
- 5 – 50 Fr/MWh bei Aquifer-Wärmespeichern

Beim Aquifer-Wärmespeicher ist dabei noch zu berücksichtigen, dass das Risiko der Fündigkeit einer Speicherschicht bis zum Bau und Fertigstellung der Anlage besteht. Dieser Speicher ist im «klassischen» Sinn nicht direkt planbar. Ein Aquifer-Wärmespeicherprojekt benötigt also immer auch Risikokapital, da zu Beginn eines Projektes immer auch mit dem Scheitern, also einer nicht fündigen Brunnenbohrung gerechnet werden muss.

Eine direkte Wirtschaftlichkeitsberechnung des saisonalen Wärmespeichers ist nicht möglich. Die Betrachtung beruht auf dem Vergleich von Systemen mit und ohne saisonalem Wärmespeicher und jeweils unterschiedlich hohen CO₂-Emissionen. Somit werden immer auch unterschiedliche Systeme bewertet, was zu Verzerrungen führen kann. Beispielsweise können große Wärmespeicher in Kombination mit Solarthermie und Abwärme in verschiedenen Wärmeversorgungssystemen zur Anwendung kommen. Die Gestehungskosten der Wärme stellen sich dabei je nach Gesamtkonzept sehr unterschiedlich dar. Beispielsweise kann Solarwärme im Anwendungsfall eines „Energiedorfes“ bei einer sommerlichen solaren Wärmebedarfsdeckung (Deckungsanteil 10 bis 20 %) zu Kosten von 50 bis 100 €/MWh bereitgestellt werden. Sollen höhere solare Deckungsanteile bis zu 50 % erreicht werden, ist eine saisonale Wärmespeicherung notwendig und die Kosten steigen auf bis zu 125 €/MWh, bei deutlich reduzierten CO₂-Emissionen. Mit Inanspruchnahme einer Förderung für solarthermische Kollektoren und Wärmespeicher lassen sich die Gestehungskosten jedoch auf 30 bis 75 €/MWh senken. Im Anwendungsfall eines großen städtischen Fernwärmenetzes und geringen solaren Deckungsanteilen unter 10 % lassen sich mit Förderung sogar Kosten von 30 bis 45 €/MWh erzielen. (Solites, Kostenbasis 2013)

5.1 Betrieb und Unterhalt

Der Betriebs- und Wartungsaufwand von Behälter-, Erdbecken- und Erdsonden-Wärmespeichern ist normalerweise durch die Abgeschlossenheit der Systeme sehr gering. Bei Erdsonden-Wärmespeichern ist die Erfassung des Speicherladezustandes schwierig, da in der Regel keine Temperaturmessungen innerhalb des Speichers (im Untergrund) zur Verfügung stehen. Der Ladezustand wird meist indirekt, über Temperaturmessung in einzelnen Sonden ermittelt und dann auf den Speicher hochgerechnet.

Bei Aquifer-Wärmespeichern kann je nach Wasserqualität Korrosion oder auch Scaling zu Problemen führen. Hier muss über Inhibitoren die Wasserqualität stabilisiert werden und ausserdem sollten Schwebeteile über Filteranlagen aus dem Wasser entnommen werden. Weiterhin ist die Materialqualität von Pumpen, Wärmeübertragern und Rohrleitungen besonders wichtig. Deshalb sind beim Aquifer-Wärmespeicher auch deutlich höhere Unterhaltskosten (von 1.0-1,5 % p.a. der Investitionskosten) einzukalkulieren.

Nach der Inbetriebnahme des saisonalen Wärmespeichersystems muss eine ein- bis zweijährige Meß- und Optimierungszeit für die Speicherintegration vorgesehen werden.

Wärmespeicheranlagen weisen – nicht wie Wärmeerzeugungsanlagen – eine sehr hohe Verfügbarkeit auf, die nahezu bei 100 % liegt, wenn notwendige Filteranlagen und Pumpensysteme redundant installiert sind. Ausnahme bilden hier die Aquifer-Wärmespeicher, bei denen je nach

Druckverhältnissen Tauchpumpen eingesetzt werden, die bei einer Störung aus dem Brunnen wieder ausgebaut werden müssen. Dies kann zu einem Unterbruch der Anlage führen. Bei entsprechender Materialplanung, was in diesem Fall die Lagerung einer Ersatzpumpe bedeutet, kann die Ausfallzeit jedoch sehr kurz gehalten werden.

5.2 Flexibilität

Ein Wärmespeicher ist ein "passives Element" in einer Wärmenutzungsanlage. Prinzipiell kann der Speicher auch bei sich ändernden Anlagenkonstellationen weiter betrieben werden und auch seinen Zweck erfüllen. Einschränkend wirken hier lediglich

- Betriebstemperatur
- Betriebsdruck
- Be- und Entlademöglichkeit

Wenn eine Wärmeerzeugungsanlage (BHKW, industrielle Abwärme, Solaranlage, KVA, etc...) nach Ende der Betriebszeit durch eine neue Anlage ersetzt wird, ist es meist von großem Vorteil, wenn bereits eine funktionierende Speicheranlage ins System integriert ist.

Schwierig wird es lediglich, wenn die Nutzerseite (Wärmesenke) erweitert und somit der Wärmeumsatz gesteigert wird. Dann kann der Fall eintreten, dass die Wärmekapazität nicht mehr für eine ganze Speicherperiode ausreicht. Hier muss gegebenenfalls untersucht werden, ob eine Speichererweiterung Abhilfe schaffen kann.

Bei einer Anlagenänderung (Erneuerung, Modernisierung), sowohl auf der Wärmequellenseite, als auch bei der Wärmesenke, wird die Betriebs- und Maximaltemperatur meist abgesenkt, wodurch der Wärmespeicher in der Regel weitergenutzt werden kann.

6 Chancen und Empfehlungen

Mit der Entwicklung von thermischen saisonalen Speichern ergeben sich Chancen, um Abwärme und regenerative Wärme vermehrt zu nutzen und die Wärme dann zur Verfügung zu stellen, wenn der Kunde die Wärme tatsächlich benötigt. Darüber hinaus können Kraftwerke, KVAs, Biomasse-Kraftwerke und Biomasse-Heizwerke besser ausgelastet und wirtschaftlich optimiert werden.

Das bedeutet:

1. Ein grosser Teil bisher ungenutzter (sommerlicher) Abwärme kann genutzt werden, ohne dass weitere Wärmeerzeugungsanlagen zugebaut werden müssen.
2. Ein Teil des riesigen sommerlichen «Überschusses» an Solarenergie kann im Sommer mittels Solarkollektoren in Wärme umgewandelt und dann im Winter genutzt werden.
3. Entkopplung von Elektrizitäts-Bezug und Wärmebedarf (im Winterhalbjahr) wegen grossem Anteil von Wärmepumpen-Heizungen und immer noch vorhandenen Strom-Direktheizungen.

4. Nutzung von sommerlichem «Überschuss-Strom» durch Wärmepumpen oder Direktheizungen als «Power-to-Heat»
5. Der Anteil an meist fossiler Spitzenlast-Wärme kann verringert oder sogar ganz eliminiert werden.
6. Der Betrieb von Wärmenetzen mit verschiedenen Wärmequellen kann optimiert werden bezüglich Emissionen und Wirtschaftlichkeit.

Wärmespeicher werden im Zusammenhang mit thermischen Netzen in der Regel dort benötigt, wo hohe Bebauungsdichten und somit Platzmangel vorhanden ist. Der Speicher kann dann im thermischen Netz an Stellen mit niedriger Bebauungsdichte verschoben oder bevorzugt auch unterirdisch errichtet werden.

Für thermische Netze ist die Betrachtung von Wärmespeichern bedeutend. Die Speichertechnologie kann die Unabhängigkeit von anderen, meist fossilen Energiequellen erhöhen und ausserdem die Flexibilität sowie die Nutzung von verschiedenen Wärmequellen ermöglichen. Von grosser Bedeutung ist die Verbesserung der Verfügbarkeit und der Betriebssicherheit durch eine Wärmespeicheranlage.

Die sinnvolle Nutzung saisonaler thermischer Speicher ist immer mit einer Analyse des Gesamtsystems verbunden. Das bedeutet, dass nicht nur der Speicher analysiert und optimiert wird, sondern auch die Wärmeerzeugung (Quelle) und die Wärmeabnahme (Senke, Wärmekunde). Durch Optimierung der Wärmequelle kann einerseits der regenerative Anteil erhöht und andererseits können die Wärmeverluste durch eine mögliche Temperaturabsenkung verringert werden.

Durch eine Optimierung der Wärmesenken kann besonders die Kapazität des Wärmespeichers, aber auch des gesamten Wärmeverteilnetzes vergrössert werden, bei gleichzeitiger Minimierung der Wärmeverluste und der Pumpenergie. Die Optimierung der Wärmesenken ist immer mit sehr viel Aufwand verbunden, da jeder einzelne Wärmebezüger (!) analysiert und optimiert werden muss. Diese Optimierung sollte ausserdem innerhalb von 2-5 Jahren kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden.

Seit 2010 werden in Dänemark und in Deutschland komplexe Energie-Versorgungssysteme für Strom und Wärme entwickelt, die große Wärmespeicher benötigen. Diese werden multifunktional genutzt, um z.B. als Spitzenlastpuffer die gekoppelte Wärme- und Stromproduktion eines BHKWs zu optimieren und um zusätzliche Solarwärme saisonal zu speichern. In Hamburg wurde im Oktober 2010 der erste in ein Fernwärmenetz integrierte Multifunktions-Wärmespeicher in Betrieb genommen.

Derzeit wird in Bern, unmittelbar an der KVA ein Aquifer-Wärmespeicher gebaut, mit dem sowohl sommerliche Abwärme für den Winter gespeichert wird, als auch die Stromerzeugung der KVA optimiert werden soll.

Aktuelle Forschungsvorhaben konzentrieren sich daher auf die folgenden drei Schwerpunkte:

- Erweiterung des Grundlagenwissens, das für die Realisierung von saisonalen Wärmespeichern notwendig ist.
- Realisierung von weiteren Pilotprojekten zur solaren Wärmespeicherung und die damit verbundene Verbreitung der Technologie.
- Optimierung der Anlagen auf Basis der Erfahrungen mit den Pilotprojekten mit dem Ziel, ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis unter Berücksichtigung aller wirtschaftlichen und gesamtenergetischen Gesichtspunkte zu erreichen.

7 Literatur

Bakema, Guido und Schoof, Frank. 2016. Geothermal Energy Use, Country Update for The Netherlands, European Geothermal Congress 2016, 19-24 Sept 2016. Strasbourg, France : s.n., 2016.

Hangartner, Diego, et al. 2017. *Grundlagenpapier Thermische Netze - Thesen zu Fernwärme-Versorgungen und Erläuterungen zu Thermischen Netzen.* Horw : Hochschule Luzern, 2017.

Internet-Medien, Institut für Energie-Effiziente Architektur mit. 2017. EnEV-online. [Online] 2017. [Zitat vom: 7. 10 2017.]

Mangold, D., Riegger, M. und Schmidt, T. 2009. *Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher - Wissenschaftlich-technische Programmbegleitung für Solarthermie2000plus, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben FKZ 0329607L.* Stuttgart : Solites, 2009.

Mangold, Dirk, et al. 2016. *Guideline for seasonal thermal energy storage systems in the built environment, Bericht des EU-FP7 Projekts EINSTEIN, grant agreement no. 284932.* Stuttgart : Solites, 2016.

Ochs, Fabian. 2008. *Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie, Abschlussbericht zum Vorhaben FKZ 0329607E.* Stuttgart : Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) Universität Stuttgart, 2008.

Possemiers, M., Huysmans, M. und Batelaan, O. 2014. *Influence of Aquifer Thermal Energy.* 2014.

Schmidt, Thomas und Mangold, Dirk. 2013. *Large scale solar thermal energy storage - status quo and perspectives, Solar District Heating Conference, April 9-10 2013.* Malmö, Schweden : Solites, 2013.

Solites 2017. Saisonalspeicher.de. [Online] August 2017. <http://www.saisonalspeicher.de/>.

Solites 2018. Solar District Heating - Plantdatabase. [Online] Januar 2018. <http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx>.