

Hochtemperaturspeicher in der Industrie

Vorstudie

Auftraggeber:

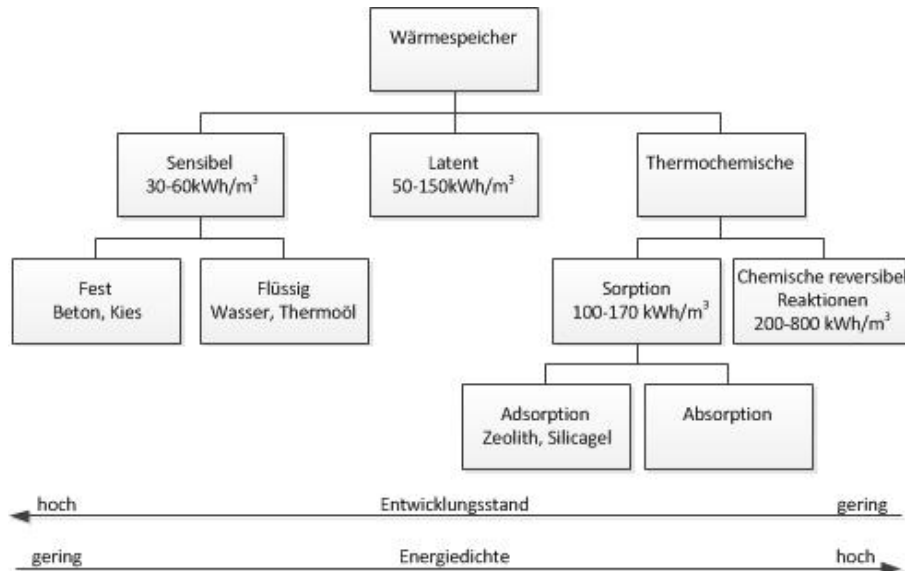


Verfasser:
Raffael Corrodi
Stefan Bertsch
Interstaatliche Hochschule für Technik NTB
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Schweiz
Tel.: +41 81 755 31 49
raffael.corrodi@ntb.ch
www.ntb.ch/ies

Institut für Energiesysteme
Interstaatliche Hochschule für Technik
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Schweiz
Tel.: +41 81 755 34 69; FAX: +41 81 756 54 34
E-Mail: ies@ntb.ch; www.ntb.ch

Zusammenfassung

Die Speichertechnologien für Wärmespeicher können in die drei grundlegenden Systeme sensibel, latent und thermochemisch unterteilt werden, alle Technologien können für den Einsatz zwischen 100°C bis 400°C eingesetzt werden.



Sensibel: Bis 150°C kann Wasser als Speichermedium eingesetzt werden z.B. als Ruths-Dampfspeicher (Gefällespeicher) wie er in der Industrie anzutreffen ist. Für höhere Temperaturen eignen sich Feststoffspeicher wie z.B. Beton. Für grosse Leistung und hohe Temperaturen, wie bei solarthermischen Kraftwerken, werden flüssige Salze verwendet.

Latent: Geeignete Materialien mit der Schmelztemperatur zwischen 100°C und 400°C sind Zuckeralkohole, Nitrate und Hydroxide. Die Forschung beschäftigt sich zurzeit mit dem Speicheraufbau. Im festen Zustand ist die Wärmeleitfähigkeit von latenten Speichern begrenzt, welches die Leistung mindert. Durch Einbauten für die Wärmeübertragung oder Verkapslungen kann die Leistung gesteigert werden. Erste Testanlagen für latente Wärmespeicher für Temperaturen >100°C wurden aufgebaut.

Thermochemisch: Bei den thermochemischen Speichern ist die Adsorption am verbreitetsten. Als Pilotanlage wurde eine Verbrennungsanlage mit einem mobilen Sorptionsspeicher von 3.7MWh ausgerüstet. Sorptionsspeicher können bis zu 300°C eingesetzt werden. Sorptionsspeicher weisen keine Selbstentladung auf.

Chemisch reversible Reaktionen können ebenfalls für die Wärmespeicherung verwendet werden. Sie eignen sich vorwiegend für hohe Temperatur bis zu über 1000°C. Für einen industriellen Einsatz benötigen sie jedoch noch an Forschungsarbeit.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	2
INHALTSVERZEICHNIS.....	3
1 EINLEITUNG.....	4
2 SPEICHERARTEN.....	5
2.1 Eigenschaften	5
2.1 Speicher Technologien allgemein	5
2.2 Übersicht thermische Speicher.....	6
2.3 Sensible Wärmespeicher.....	7
2.4 Latente Wärmespeicher	8
2.5 Thermochemische Wärmespeicher.....	10
2.5.1 Adsorption	10
2.5.2 Absorption	12
2.5.3 Chemisch reversibel.....	12
3 ANWENDUNG VON SPEICHERN	13
3.1 Mögliche Einsatzgebiete von thermischen Speichern.....	14
3.2 Anwendungsbeispiele von thermischen Speichern.....	15
4 WIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNG.....	17
5 VERGLEICH DER SPEICHER	18
6 LITERATURVERZEICHNIS.....	20
7 ANHANG.....	22
7.1 Bilder von Speichersystemen	22
7.2 Beispiel: Prozesswärme bei 200°C	24

1 Einleitung

Ziel der Vorstudie ist eine Zusammenstellung der aktuellen Technologien für Prozesswärmespeicher. Hierbei werden die Kosten, die Energiedichte (Platzbedarf) und Effizienz verglichen. Betrachtet werden thermische Energiespeicher im Temperaturbereich 100°C bis 400°C. Hierbei werden besonders Kurzzeitspeicher für Prozesswärme betrachtet, welche sich für ein Lastmanagement (Peak Shaving) eignen.

Der Speicherbedarf bei thermischen Systemen steht im Gegensatz zu den elektrischen nicht im Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit. Dies liegt daran, dass sich thermische Speicher für den Wohnungsbau für BWW und Pufferspeicher für Heizungen schon lange durchgesetzt haben. In der Prozesswärme sind thermische Speicher noch nicht verbreitet. Jedoch mit der stärkeren Nutzung von erneuerbaren Energien kommen thermische Speicher mehr zur Anwendung. [1]

Thermische Kurzzeitspeicher in der Industrie bewirkt eine Entkopplung der Wärmeverbraucher von den Wärmeerzeugern. Mit thermischen Speichern können An- und Abfahrverluste von Wärmeerzeugungsanlagen reduziert werden, was zur einer Effizienzsteigerung im thermischen Prozess führt. Eine Wärmerückgewinnung kann dank der Speicher auch bei Batch- oder Impulsbetrieb ermöglicht werden. Mit thermischen Speichern kann Prozesswärme mit erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Zudem kann ein Lastmanagementsystem zur Minimierung von Wärmeverbrauchsspitzen umgesetzt werden, welches zu weniger Teillastbetrieb führt. Durch thermische Speicher können Wärme-Kraft-Kopplung Anlagen stromgeführt betrieben werden, welches den Ausbau weiter begünstigt. [2] [10]

Die Schweiz benötigt rund 12.6% der Energie für die Prozesswärme. [11] Abbildung 1 zeigt den Bedarf an Prozesswärme abhängig vom Temperatur Niveau und der Branche.

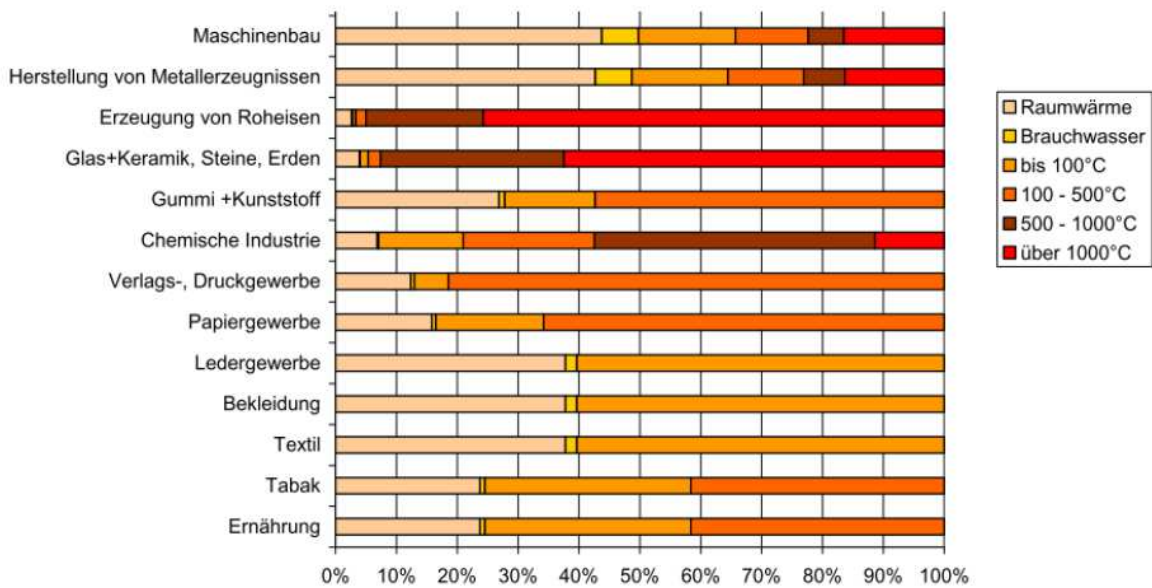


Abbildung 1: Bedarf an Prozesswärme abhängig vom Temperatur Nivea und Branche; Quelle: [12]

Ein zukünftiges Einsatzgebiet für thermische Speicher ist Power-to-Heat. Mit dem zunehmenden Ausbau von erneuerbaren Energien wird vermehrt ein Überangebot an Strom entstehen. Zur Vermeidung das erneuerbare Energien im Fall von negativen Priesen an der Strombörse abgeriegelt wird, können Power-to-Heat Anlagen eingesetzt werden. Beim Power-to-Heat Konzept werden thermische Speicher immer dann geladen, wenn ein Überangebot an Strom zur Verfügung steht. So kann dem Netz negative Regelenergie zur Verfügung gestellt werden. [23]

2 Speicherarten

2.1 Eigenschaften

Energiespeicher unabhängig von ihrer Technologie können durch die folgenden Eigenschaften beschrieben werden:

Speicherkapazität	Gibt an wie viel Energie (kWh oder kJ) mit einem Speicherzyklus gespeichert werden kann. Sie hängt hauptsächlich von dem Speichervolumen und dem Material ab.
Energiedichte	Gibt an wie viel Energie (kWh oder kJ) pro Masse (kg) oder Volumen (m ³) gespeichert werden kann. Sie hängt hauptsächlich von der Speichertechnologie ab. [13] [1]
Leistung	Die Lade- und Entladeleistung (W) des Speichers ist entscheidend für die Ladedauer und für die maximale Energiebezugsspitzen des Speichers. Die Leistung hängt neben dem grundlegenden Speichermechanismus stark von der technischen Realisierung ab. [13] [1]
Wirkungsgrad	Der Wirkungsgrad des Speichers beschreibt das Verhältnis zwischen der Ladeenergie und der maximalen wieder beziehbaren Energie. Der Wirkungsgrad hängt von den Lade- Entladeverlusten und der Speicherdauer ab. Allgemein wird für die Angabe des Wirkungsgrads eine für den Speicher typische Speicherdauer verwendet. [12] [14]
Speicherdauer	Die Speicherdauer gibt an, über welchen Zeitraum die Energie gespeichert wird. Entscheidend ist hierbei die Selbstentladung im Stillstand. [13]
Kosten	Es muss zwischen den Kosten für die Investition und den Kosten pro gespeicherte Energie unterschieden werden. Die Kosten für die Investition werden oft in CHF pro kWh Speicherkapazität angegeben. Die Kosten pro gespeicherte Energie wird ebenfalls in CHF/kWh angegeben. Die Kosten sind von den Investitionskosten, der Anzahl der Zyklen, der Speicherkapazität und den Betriebskosten abhängig. [13] [1]
Zyklusfestigkeit	Der Zeitraum zwischen Laden und Entladen wird als Speicherperiode bezeichnet. Die Summe aus der Beladungs-, Stillstands- und-Entladungszeit bilden einen Ladezyklen. [8] Die Zyklusfestigkeit gibt an, ob die Speicher mit zunehmender Anzahl von Zyklen an Speicherkapazität verlieren.
Sicherheit	Ein weiteres Merkmal ist die Sicherheit. Speicher können toxische oder stark korrosive Substanzen beinhalten oder unter Druck stehen. [8]

2.1 Speicher Technologien allgemein

In Abbildung 2 werden verschiedene Speichertechnologien miteinander verglichen. Die Zahlen sind als ungefähre Richtwerte zu verstehen, um die Technologien zu vergleichen, da sie je nach Randbedingungen stark variieren.

Speicher-Technologie	Kapazität kWh/t	Leistung MW	Wirkungsgrad	Speicher-dauer	Kosten €/kWh
Mechanisch					
Pumpspeicherwerke	1	1–500	80%	Tag – Monat	50
Druckluftspeicher	2 kWh/m ³	300	40–70%	Tag	400–800
Elektrochemisch					
Bleisäurebatterien	40		85%	Tag – Monat	200
Li-ion-Batterien	130	0,02–??	90%	Tag – Monat	1000
NaS-Batterien	110	0,05–??	85%	Tag	300
Redox-Flow-Batterien	25	0,01–10	75%	Tag – Monat	500
Thermisch					
Warm-Wasser-Speicher	10–50	0,001–10	50–90%	Tag – Jahr	0,1
Latentwärmespeicher	50–150	0,001–1	75–90%	Stunde – Woche	10–50
Thermochemische Speicher	120–250	0,01–1	100%	Stunde – Tag	8–40
„Stofflich“					
Wasserstoff	30000	0,001–1	25–50%	Tag – Jahr	1000 €/kW

Abbildung 2: Übersicht von verschiedenen Speichersystemen; Quelle [13]

Thermische Speicher gelten mit Kosten von 0.1 bis 50 Euro pro kWh als günstige Speicher. Ihre Kapazität und Leistung schwank sehr nach Technologie. Der Wirkungsgrad ist vorwiegend von der Wärmedämmung abhängig und kann auch hier stark schwanken. Thermochemische Speicher haben theoretische keine Selbstentladung welches einen Wirkungsgrad von nahezu 100% ermöglicht.

2.2 Übersicht thermische Speicher

Die Speichertechnologien können in die drei grundlegende Systeme sensibel, latent und thermochemisch unterteilt werden, wie in Abbildung 3 dargestellt. [1]

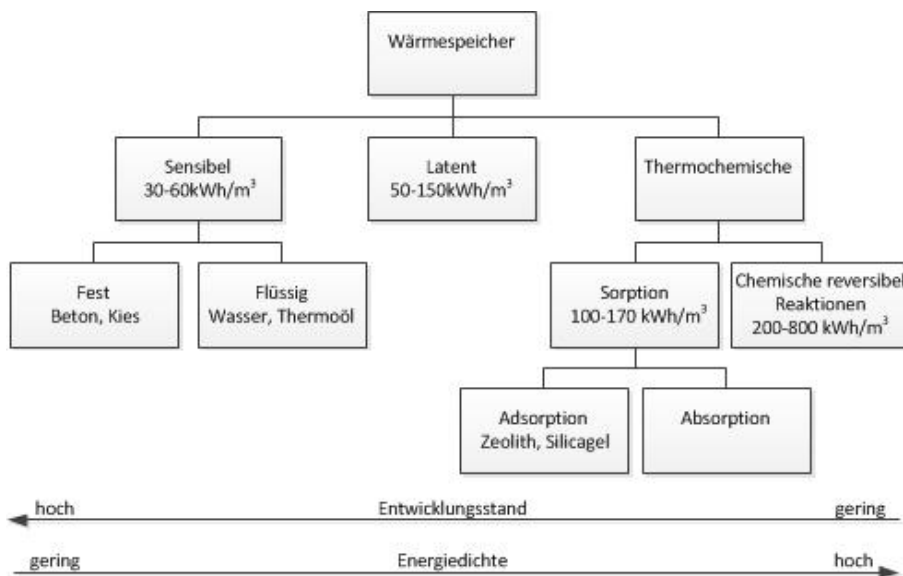


Abbildung 3: Übersicht über die verschiedenen Technologien zur Speicherung von thermischer Energie

Sensible Wärmespeicher Sind Speicher bei denen ein Energiebezug auch immer eine fühlbare Temperaturänderung mit sich bringt. Als Speicher können Thermoöle,

	Wasser, Salzschmelzen oder Feststoffe wie Beton oder Granit verwendet werden. [1]
Latente Wärmespeicher	Sind Speicher welche die für den Phasenwechsel notwendige Energie speichern. Hierfür werden PCM (Phase Change Material) verwendet. Je nach Temperatur werden andere PCM benötigt. Im Bereich 100°C bis 400°C können Paraffine, Zuckeralkohole, Nitrate oder Hydroxide verwendet werden [1]
Thermochemische Wärmespeicher	Sind chemische reversible Reaktionen bei denen die Reaktionsprodukte getrennt gespeichert werden. Ausgenutzt für die Energiespeicherung wird die Reaktionsenergie. Auch Sorptions-Speicher werden oft unter dem Begriff thermochemischer Speicher aufgeführt. [1]
Sorption	Unter Sorption werden Ab- und Adsorptionsprozesse zusammengefasst. [1]
Absorption	Ja nach Druck und Temperatur kann ein flüssiger Stoff eine bestimmte Menge eines gasförmigen Stoffs aufnehmen. Wird der gasförmige Stoff aus dem flüssigen Stoff gelöst, wird dies als Absorption bezeichnet. Beim Binden des Gases in einer Flüssigkeit wird Energie frei. Verwendet wird für diesen Prozess Wasser und LiBr, NH ₃ und H ₂ SO ₄ . [6] [1]
Adsorption	Als Adsorption bezeichnet man das Anreichern von Stoffen an Oberflächen. Das Adsorptionsmittel ist jeweils das Trägermaterial (Oberfläche). Legt sich ein Stoff, meist wird Wasser verwendet, auf einer Oberfläche fest so wird Energie frei. Durch Änderung des Drucks oder der Temperatur kann der Stoff wieder ausgetrieben werden, welches als Desorption bezeichnet wird. Verwendete Adsorptionsmittel sind Aluminiumoxide, Silicatgele, Zeolithe und Metallhydride. [3] [5]
Chemisch reversibel	Jede reversible chemische Reaktion ist prinzipiell als thermischer Energiespeicher einsetzbar. Das entscheidende Kriterium ist die Gleichgewichtstemperatur.[1]

2.3 Sensible Wärmespeicher

Im Vergleich mit latentem oder chemischem Speicher ist die Energiedichte der sensiblen Speicher geringer. Der Vorteil von flüssigen sensiblen Speichern ist die hohe Leistung, welche vorwiegend von der Pumpenleistung abhängt. Zudem kann als Wärmeträger gerade auch das Speichermedium verwendet werden. Sensible Wärmespeicher haben zurzeit die geringsten Investitionskosten. In Tabelle 1 sind verschiedene Speichermedien zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht sensibler Speichermedien; Quelle [1]

Medium	Temperaturbereich °C	Spez. Wärmekapazität kJ/(kg K)	Volumetrische Wärmekapazität kJ/(m ³ K)	Dichte Kg/m ³	Anwendung
Wasser	0 bis 100	4.19	4175	998	Brauchwarmwasser, Heizungen
Sand Kies Gestein	0 bis 800	0.71	1278-1420	1800-2000	Erdreich-Wärmespeicher
Beton	0 bis 500	0.88	1672-2017	1900-2300	Thermisch aktive Bauteile
Thermoöle	bis 400	1.6-2.1	1360-1620	850-900	Solaranlagen mit Parabolrinnen-

					kollektor
Salz- schmelzen	150-450	1.3	1970-1725	2561-2243	Solarturmkraftwerke

Für sensiblen Wärmespeicher wird oft Wasser verwendet, da es eine sehr hohe Wärmekapazität (4.19kJ/(kg K)) aufweist. Bei Hochtemperaturanwendung kann Wasser aufgrund der Verdampfung und dem damit verbundenen Druck nicht grenzenlos verwendet werden. Für grosse Speicher werden meist Salze verwendet, da sie eine höhere Wärmekapazität als Öle aufweisen und ihre Maximaltemperatur etwas höher liegt. Öle werden für kleinere Kurzzeitspeicher verwendet. Natrium wird selten verwendet, da es mit Wasser zu stark exotherme Reaktion führt, welche zusätzliche Sicherheitsmassnahmen erfordert. [1]

Sensible Speicher haben keine konstante Temperatur. Die Temperatur des Speichers hängt direkt mit dem Ladestatus zusammen. Beim Entladen des Speichers verringert sich die Speichertemperatur, dies hat zur Folge, dass die Temperatur innerhalb des Speichers unterschiedlich ist. Gleichen sich die Temperaturen innerhalb des Speichers aus, so entsteht ein Exergieverlust. [8]

Sensible Speicher gehören zum Stand der Technik. Die Forschung konzentriert sich bei sensiblen Speicher auf die Speicherschichtung, sowie auf das Langzeitverhalten bei erdverlegten Speichern.

Visitenkarten sensible Speicher:

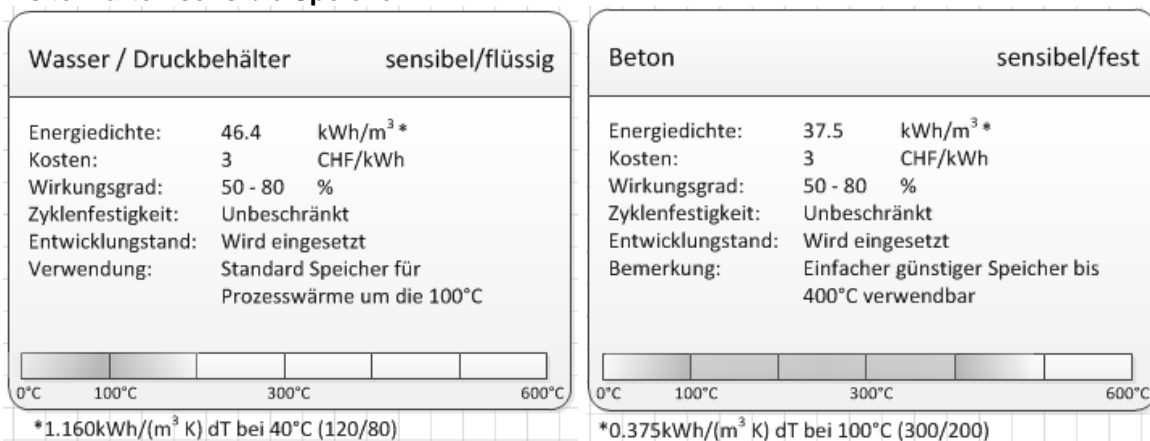


Abbildung 4: Visitenkarten von Druckwasser und Betonspeicher; Die Kosten von 3 CHF/kWh beziehen sich auf die Investition und sind richtwerte für sensible Speicher, Der Wirkungsgrad wird von der Dämstärke und der Speicherdauer beeinflusst.; Datenquelle [1]

2.4 Latente Wärmespeicher

Latente Wärmespeicher haben eine höhere Energiedichte als sensible Speicher. Sie benötigen für dieselbe Speicherkapazität 2-10 mal weniger Platz. [1]

Bei den latenten Wärmespeichern wird meist der Aggregatsübergang fest zu flüssig verwendet. Der Aggregatsübergang flüssig zu gasförmig, welcher eine grössere Phasenübergangsenthalpie aufweist, wird nicht verwendet, da hier das Volumen ebenfalls viel stärker zunimmt. [1]

In Abbildung 5 sind verschiedene Materialien für latente Speicher abhängig von der Temperatur und der Schmelzenthalpie dargestellt.

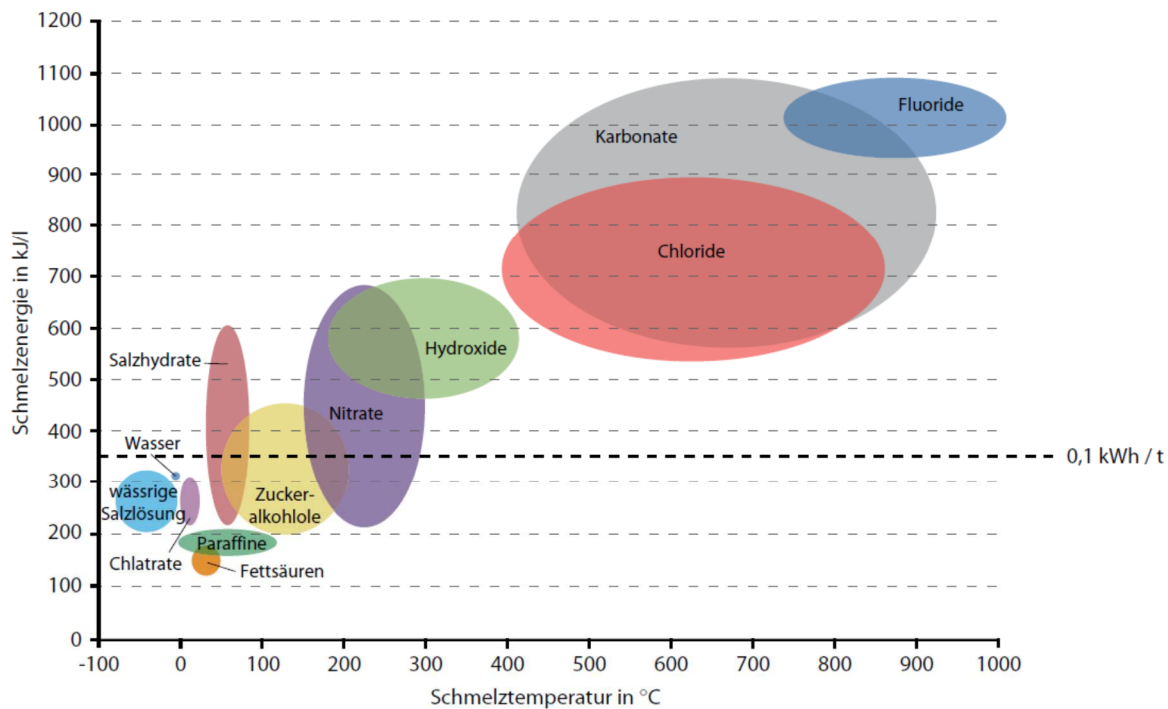


Abbildung 5: Materialklassen von latenten Speichermaterialien in Abhängigkeit der Schmelztemperatur [°C] und der Schmelzenergie [kJ/l]; Quelle [1]

R. Sizmann hat 1989 in seinen theoretischen Überlegungen festgehalten, dass mit zunehmender Schmelztemperatur die Schmelzenthalpie steigt. Nach Sizmann kann kein PCM gefunden werden, welches eine viel höhere Schmelzenthalpie aufweist als die bekannten. Der Zusammenhang zwischen Schmelzenthalpie und Schmelztemperatur wird folgend gebildet. [8]

$$E_{V,latent,is} \approx (0.8 \dots 1.2) * T_{is} \text{ MJ/m}^3$$

Die Wahl des Materials hängt im Wesentlichen von der Temperatur ab. Im Bereich 100°C bis 400°C liegen die Schmelztemperaturen von anorganischen Salzen, vor allem von Nitrat- und Chloridsalzen, Zuckeralkohole und Hydroxide. Die Schmelzenergie liegt zwischen 200-700 kJ/l (100 bis 500 kJ/kg). [1]

Nicht alle PCM sind ausreichend zyklenfest. Um eine geeignete Zyklusfestigkeit zu erreichen, müssen diverse PCM umgewälzt werden [7]. Zudem kann die Unterkühlung der Flüssigkeit problematisch sein. Bei mobiler Anwendung wird die Unterkühlung bewusst genutzt. Als bekanntes Beispiel können hier die Handwärmer gezählt werden. Im industriellen Einsatz kann die Kristallisierung, bei unterkühlten Flüssigkeiten, durch Ultraschall ausgelöst werden. Die Nutzung der Unterkühlung ist jedoch im Hochtemperaturbereich nicht interessant. [8] [7]

Latente Speicher haben immer dieselbe Temperatur. Die Ladetemperatur muss immer höher als die Entladetemperatur sein, sie können jedoch nahe beieinander liegen. Durch die konstante Temperatur werden die latenten Speicher oft auch als thermische Trägheit (passives System) eingesetzt, um eine konstante Temperatur zu halten. Gerade dank der konstanten Temperatur eignen sie sich für die Dampferzeugung, da beim Verdampfungsprozess die Temperatur ebenfalls konstant bleibt. Erste Versuche mit mehreren PCM in Serie, welche verschiedenen Schmelztemperaturen haben, wurden durchgeführt. [7]

Problematisch bei PCM Speicher ist die tiefe Wärmeleitfähigkeit im festen Zustand. Dies führt zu einer begrenzten Leistung. Durch eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche kann die Leistung erhöht werden, welches jedoch die Energiedichte des gesamt Systems wieder verkleinert. Deshalb wird aktuelle an verschiedenen Bauformen geforscht. Eine Bauform ist, dass der PCM für den Phasenwechsel über ein mit dem Wärmeträger durchflossene Schnecke gefördert wird. Vielversprechend sind Aufbauten wobei der PCM auf einer thermisch gut leitenden Matrix oder in Kugeln eingebunden wird. [4] Ein aktuelles Thema der Forschung sind Slurries. Hierbei handelt es sich um eine Mischung, bestehend aus 20-40% (in Ausnahmen auch 60%) PCM und einem Wärmeträgerflüssigkeit. Die Mischung wird auch als PCS bezeichnet. Die Mischung bleibt pumpfähig und kann so gleichzeitig als Speichermaterial und als Wärmeträger verwendet werden. [8]

Der Entwicklungsstand für latente Wärmespeicher beschränkt sich auf erste Prototypen welche im realen Umfeld getestet wurden. Für Temperaturen <100°C, vorwiegend für die Raumklimatisierung, sind erst Produkte verfügbar. Für Temperaturen >100°C befindet sich der Entwicklungsstand noch beim Prototypenbau. [1]

Visitenkarte von latenten Speichern

Zuckeralkohol (Erythritol)	latent	Salz (Kaliumnitrat)	latent
Energiedichte: 120 kWh/m ³		Energiedichte: 140 kWh/m ³	
Kosten: 31 CHF/kWh		Kosten: 31 CHF/kWh	
Wirkungsgrad: 80 %		Wirkungsgrad: 80 %	
Zyklusfestigkeit: nach 1'000 bei 90%		Entwicklungsstand: Prototypen	
Entwicklungsstand: Prototypen		Bemerkung: - Stark korrosive Substanz	
Bemerkung: - unbedenklich Substanz		- komplexer Aufbau für die Wärmeübertragung	
- gut Wasserlöslich		- Volumenänderung von 3%	
- komplexer Aufbau			

Abbildung 6: Visitenkarten von Erythritol und Kaliumnitrat; Die Kosten von 31 CHF/kWh beziehen sich auf die Investition und sind richtwerte für latente Speicher; Datenquelle [1]

2.5 Thermochemische Wärmespeicher

2.5.1 Adsorption

Adsorptionsspeicher haben eine hohe Energiedichte und geringe Verluste. Bei der Adsorption für die Energiespeicherung wird ein Adsorbens (Feststoff) mit Wasser beladen. Die beiden am häufigsten verwendeten Materialien sind in Tabelle 2 aufgeführt. Ein Adsorbens zeichnet sich durch seine grosse Oberfläche aus.

Tabelle 2: Übersicht von Adsorptionsmaterialien: Quelle [1] S.568

Adsorbens	Max. Beladung kg H ₂ O/kg Adsorbens	Adsorptionseenthalpie kWh/kg H ₂ O	Energiedichte kWh/kg Adsorbens
Zeolith 13X	0.32	0.964	0.308
Silicagel-Trockenperlen	0.37	0.758	0.280

Für die Anwendungen <100°C eignen sich Silicagel, für Temperaturen 100°C bis 300°C wird häufig Zeolithe verwendet und für höhere Temperaturen 280°C bis 500°C können Metallhydride eingesetzt werden. [19]

Die Adsorptionseenthalpie ist von der Beladung mit Wasser und dem Material abhängig. Mit zunehmender Beladung sinkt die Adsorptionseenthalpie. Das heisst, dass mit einer stärkeren Trocknung, meist aufgrund einer höheren Ladetemperatur, eine höhere Adsorptionseenthalpie erreicht wird. [20]

Unterscheidet wird zwischen zwei Bauarten:

Offene Systeme:

Beim offenen System wird für die Speicherladung trockene Luft durch das Adsorbens geblasen, welches das Adsorbens austrocknet. Bei der Speicherentladung wird feuchte Luft durch das Adsorbens geblasen, die Feuchte setzt sich im Adsorbens ab wodurch sich die Luft erwärmt und zusätzlich getrocknet wird. Das Prinzip ist in Abbildung 8 rechts dargestellt. Das System ist nicht an eine bestimmte Temperatur gebunden. Abbildung 7 zeigt die Entladetemperatur ($T_{\text{zeo_out}}$) eines Speichers in Abhängigkeit der Temperatur der Zuluft (T_{low}). Die Desorption wurde bei einer Temperatur von 150°C durchgeführt. [8] S. 42

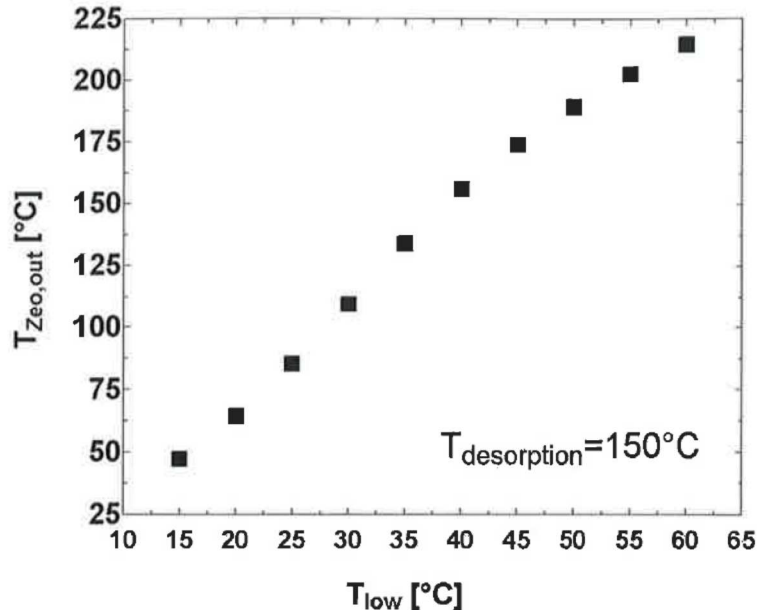


Abbildung 7: Entladetemperatur in Abhängigkeiten von der Zuluft Temperatur; Quelle [8]

Die Austrittstemperatur bei der Speicherentladung kann über der Ladetemperatur liegen. Das offene System wird mit Luft als Wärmeträger betrieben, somit eignet es sich als Speicher vorwiegend für Trocknungsprozesse oder wenn als Prozesswärme direkt Luft benötigt wird.

Geschlossen Systeme:

Das geschlossene System muss Gasdicht sein, da es bei einem Druck von wenigen mbar betrieben wird. Im Adsorbens integrierte Rohrwärmetauscher nehmen die entstehende Wärme bei der Entladung (Adsorption) auf und geben diese auch bei der Ladung (Desorption) wieder an das Zeolith ab. Über ein Ventil mit dem Adsorbens verbundenen Wassertank versorgt das Adsorbens bei der Entladung mit Wasser, über einen Kondensator fließt das Wasser bei der Ladung wieder zurück in den Wassertank. Es wird aufgrund des geringen Wasserdampfdruck keine Pumpe benötigt. Das Wasser, welches im Wassertank verdampft, entzieht dem Wassertank die Verdampfungsenthalpie. Um ein Einfrieren des Wassertanks zu vermeiden, muss er in einzelnen Systemen leicht geheizt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 8 links dargestellt.

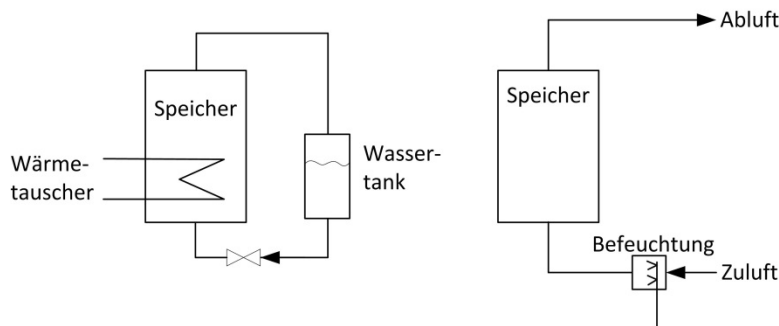


Abbildung 8: Prinzipschema Sorptionsspeicher; links: geschlossenes System; rechts: offenes System

Nur wenige Konzepte zur Systemintegration für die Verwendung von Sorptionsspeicher sind vorhanden. Der Entwicklungsstand für Temperaturen $>100^{\circ}\text{C}$ befindet sich bei ersten Pilotanlagen. Gezeigt hat sich, dass die theoretische Energiedichte von $177\text{kWh}/\text{m}^3$ unter realen Bedingungen nicht erreicht wird. Unter realen Bedingungen wurden Energiedichten von 120 bis $130\text{kWh}/\text{m}^3$ nachgewiesen. [20]

Visitenkarte eines Zeolith Speichers

Zeolith 13X		adsorption
Energiedichte:	170 (130) kWh/m^3	
Kosten:	53 CHF/kWh	
Wirkungsgrad:	90 %	
Zyklusfestigkeit:	nach 1'000 bei 90%	
Entwicklungsstand:	Pilotanlagen	
Bemerkung:	Verwendung für: Trocknungsprozesse, Mobilespeicher, Prozesswärme	

0°C 100°C 300°C 600°C

Abbildung 9: Visitenkarten von Zeolith 13X; Die Kosten von 53 CHF/kWh beziehen sich auf die Investition und sind Richtwerte für chemische Speicher; Datenquelle [1]

2.5.2 Absorption

Die Absorption verfügt im Allgemeinen über eine geringere Energiedichte als die Adsorption. Deshalb ist die Absorption als Energiespeicher für hohe Temperaturen nicht von Bedeutung. [1] Eingesetzt werden Absorptionsspeicher zur Kältespeicherung. [8]

2.5.3 Chemisch reversibel

Chemisch reversible Reaktionen haben eine 10 bis 20 fache höhere Energiedichte als sensible Speicher und eignen sich für Energiespeicherung bei hohen Temperaturen. Es können Temperaturen bis zu 1500°C (Reaktion von Bariumcarbonat zu Bariumoxid und Kohlendioxid) erreicht werden. [1] [15]

Bei den chemisch reversiblen Wärmespeichern wird die Energie in der Reaktionsenergie gespeichert. Die Reaktionsprodukte können getrennt voneinander gelagert werden. Ihre Wärme können sie bei der Lagerung nicht abgeben, somit treten keine thermischen Verluste während des Stillstands auf. In Tabelle 3 sind Beispiel von chemisch reversiblen Reaktionen aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht über chemisch reversible Reaktionen; Quelle: [1]

Reaktion	Gleichung	Gleichgewichtstemperatur (1bar) $^{\circ}\text{C}$	Energiespeicherdichte kWh/kg
Salz Hydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O}$	122	0.463

	$CaCl_2 * 2H_2O \leftrightarrow CaCl_4 * H_2O + H_2O$	174	0.091
Hydroxide	$Mg(OH)_2 \leftrightarrow MgO + H_2O$	268	0.327
	$Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + H_2O$	521	0.373
Metall Hydride	$MgH_2 \leftrightarrow Mg + H_2$	293	0.344
Dampfreformierung	$CH_2 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	687	1.672

Die theoretische höchste Energiedichte von 1.672 kWh/kg wird bei der Dampfreformierung von Methan und Wasser erreicht. Die Entladung des Speichers (exotherme Reaktion) erfolgt bei einer Temperatur unter der Gleichgewichtstemperatur. Das Laden (endotherme Reaktion) über der Gleichgewichtstemperatur.[1]

Die Bauformen von chemisch reversiblen Speichern sind etwas komplexer, da gleichzeitig Energie übertragen und ein stofflicher Austausch realisiert werden muss. [8] Eine technische Umsetzung von chemisch reversibler Reaktion für die Energiespeicherung bedarf noch an Forschung und Entwicklungsarbeit. [1]

Visitenkarte einem Magnesiumhydroxid Speicher

Hydroxide	reversible Reaktion
Energiedichte:	850 kWh/m ³
Kosten:	53 CHF/kWh
Wirkungsgrad:	>90 %
Entwicklungsstand:	Versuchsaufbauten
Bemerkung:	Verwendung von reversiblen chemischen Reaktionen für Hochtemperaturspeicher Komplexer Speicheraufbau




Abbildung 10: Visitenkarten von einem Magnesiumhydroxid Speicher; Die Kosten von 53 CHF/kWh beziehen sich auf die Investition und sind Richtwerte für chemische Speicher; Datenquelle [1]

3 Anwendung von Speichern

Die BFE Studie zum Thema Energiespeicher in der Schweiz [11] hat zusammengefasst welche thermischen Speicher in Zukunft eingesetzt werden. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Übersicht über Anwendungen von Wärmespeichern und eingesetzte/einsetzbare Speichertechnologien; Quelle [11]

Anwendung	Speichertechnologie
Beheizung von Gebäuden (Einzeln und in Blocks)	Sensible Speicher (Kleine und mittlere Wassertanks, unterirdische Wassertanks)
Fernwärmesysteme	Sensible Speicher
Warmwasser	Sensible Speicher (kleine Wassertanks)
Saison Speicher	Sensible Speicher (Grosstanks, Schächte, Bohrlöcher, Aquiferspeicher)
Prozesswärme	Sorption
Hochtemperaturspeicher in Industrie und Forschung	Latente Speicher und chemische Reaktionen
Industrielle Abwärme	Sensible, latente und thermochemische Speicher

Die Studie geht davon aus, dass in der Prozesswärme vermehrt Sorptionsspeicher eingesetzt werden. Für Speicher auf hohen Temperaturen werden latente oder chemische Reaktionen verwendet. Für industrielle Abwärme wird je nach Temperatur und sonstigen Randbedingungen sämtliche Speichertypen verwendet.

Aktuell sind Dampf oder Druckwasserspeicher als Pufferspeicher bis ca. 150°C geeignet. Sensible Feststoffspeicher wie z.B. Betonspeicher eignen sich wenn tiefe Investitionskosten gefragt sind und der Platzverbrauch sowie der Wirkungsgrad zweitrangig sind. Latente und Sorptionspeicher können für die Speicherung bei Temperaturen über 100°C eingesetzt werden. Latente Speicher eignen sich besonders wenn der Wärmeträger, bei der Speicherentladung, ebenfalls seinen Aggregatzustand ändert. Die latenten Speicher für Temperaturen über 100°C sind jedoch noch nicht marktreif. Offene Sorptionspeicher eignen sich wenn Luft als Wärmeträger verwendet wird.

3.1 Mögliche Einsatzgebiete von thermischen Speichern

Dampfspeicher [9] [21]

In der Industrie werden thermische Speicher häufig als Pufferspeicher bei nicht kontinuierlichem Dampfbedarf eingesetzt.

Für die Speicherung von Dampf wird häufig der Ruths-Dampfspeicher (Gefällespeicher) verwendet. Der Speicher war sehr verbreitet, als für die Dampferzeugung noch vorwiegend Kohle verwendet wurde. Die Nachfrage von Ruths-Dampfspeicher hat in den letzten Jahren stark abgenommen. Beim Speicher wird ein Siedewassertank mit Dampf beladen. Der Dampf kondensiert im Wasser und erhöht die Temperatur und den Speicherdruck. Wird dem Wärmespeicher Dampf entzogen entsteht Wasserdampf aufgrund des Druckabfalls. Speicher bis 300m³ (ø5 Länge 20m) werden in der Industrie eingesetzt. Der Aufbau ist in Abbildung 11 links dargestellt. Die Energiedichte des Speichers ist vom Druckgefälle abhängig. Bei einem Druckgefälle von 20bar auf 10bar können 139kJ/kg (38.5kWh/m³) gespeichert werden.

Ein weiterer Speicher ist der Gleichdruckspeicher. Für die Speicherladung wird Siedewasser aus dem Kessel in den Speicher geleitet. Bei erhöhtem Dampfbedarf wird dem Kessel Wasser aus dem Speicher, welches fast bei der Siedetemperatur ist, anstelle von Frischwasser zugeführt. Der Aufbau ist in Abbildung 11 rechts dargestellt.

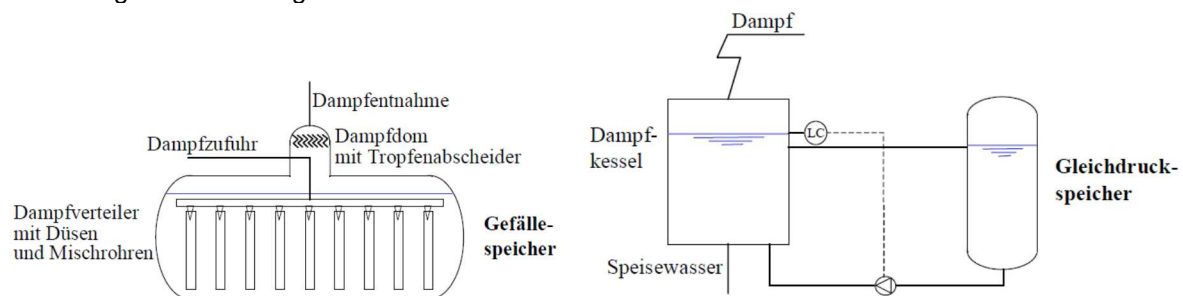


Abbildung 11: Schema von Dampfspeicher; links: Ruths-Dampfspeicher (Gefällespeicher); rechts Gleichdruckspeicher; Quelle [21]

Regeneratoren [7]

In der Industrie verbreitet eingesetzte sensible Wärmespeicher sind Regeneratoren. Regeneratoren sind diskontinuierliche arbeitende Wärmeübertrager. Eingesetzt werden sie bei hohen Temperaturen (>500°C) wo ein metallischer Wärmetauscher an die Grenzen stösst. Verwendung finden sie in der Schwerindustrie und als Luftherhitzer/Luftvorwärmer. Das Speichermaterial ist meist keramisch. Durch Umschalten der Strömung wird für die Entladung Luft durch die Keramikelemente geblasen. Anstelle des Umschaltens der Ströme existieren auch Rotierende Speichermassen (z.B. Ljungström-Regeneratoren), welche sich für die Abwärmenutzung eignen.

Wärme-Kraft-Kopplung

Mit dem Ausbau von erneuerbaren Energien wird der Bereich Strom und Wärme miteinander verbunden, dies wird mit WKK (Wärme-Kraft-Kopplung) erreicht. Das „Stromspeicherproblem“ kann teilweise mit thermischen Speichern gelöst werden. Ein WKK kann Strom- oder Wärmegeführt betrieben werden. Bei einem Wärmegeführten WKK wird die Leistung nach dem Wärmebedarf geregelt, der Strom

ist das „Nebenprodukt“. Dies führt dazu, dass auch dann Strom erzeugt wird, wenn er im Überfluss vorhanden ist. Bei einer Stromgeführten WKK wird die Leistung nach dem Strombedarf geregelt. Eine minimale Wärmebereitstellung muss jedoch jederzeit sichergestellt werden. In Zukunft wird eine Entkopplung der Strom und der Wärmeproduktion bei WKK wichtig. Dies kann mit einem thermischem Speicher für das Fernwärmenetz erreicht werden. Hierbei werden mehrheitlich sensible Speicher eingesetzt. [1]

Power-to-Heat

Bei Power-to-Heat Anlagen wird ein Wärmespeicher immer dann geheizt, wenn Strom im Überfluss zur Verfügung steht. Mit dem Power-to-Heat Konzept wird negative Regelenergie zur Verfügung gestellt und es kann der Deckungsgrad der erneuerbaren Energien gesteigert werden.

Voraussetzung für die Power-to-Heat für Prozesswärme ist:

- möglichst ganzjähriger Dampfbezug
- Max Druck von 30bar und 230°C
- Im Stromanschluss existieren noch ungenützte Reserven in Höhe der Kesselleistung [1]

Für den Speicher ist eine rasche Leistungszuschaltung die Voraussetzung. Verwendet werden deshalb vorwiegend sensible Wasserdruckspeicher mit Elektrodenkessel welche in 30s auf Vollast gefahren werden können. Solche Speicher mit integriertem Kessel sind mit der Leistung von 5 bis 90MW auf dem Markt erhältlich. (z.B. von VAPEC[17] oder PARAT [18]). Ein 90MW Kessel hat die Abmessung von $\varnothing 3.5\text{m}$ und Höhe von 6.4m.

Power-to-Heat steht in Konkurrenz zu Power-to-Gas. Die Studie von Arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik 2013 [16] hat sich mit dem Thema Power-to-Heat oder Power-to-Gas befasst. Für den Systemvergleich wurde die Bereitstellung von Raumwärme verwendet. Das Ergebnis ist, dass Power-to-heat auf Grund der geringeren Investitionskosten wirtschaftlicher ist.

Integration von Solarthermie

Für die Integration von Solarthermie zur Erzeugung von Prozesswärme sind thermische Speicher notwendig. Mit dem Speicher kann die Wärmeproduktion welche von der Einstrahlung abhängt ist, dem Wärmeverbrauch angepasst werden. Sehr geeignet ist hierbei die Dampferzeugung über einen Parabolrinnenkollektor. Mit den Kollektor können die Speicher bei hohen Temperaturen geladen werden, für die Dampferzeugung kann der Speicher auf einem tieferen Temperaturniveau entladen werden.

Peak shaving und Wärmerückgewinnung

Durch thermische Speicher kann ein unregelmässiger Wärmebezug gepuffert werden. Dadurch wird die Spitzenleistung des Kessels reduziert, welches die Investition beim Kessel senkt. Durch den Speicher wird der Kessel mit einer konstanten Leistung betrieben, wodurch der Teillastbetrieb und die Starthäufigkeit reduziert werden. Zudem ermöglichen Speicher eine Wärmerückgewinnung bei einem diskontinuierlichen Wärmebezug.

3.2 Anwendungsbeispiele von thermischen Speichern

Sensible superisoliert Speicher [8]

Das ZAE Bayern mit der Hummelsberger GmbH haben 2012 eine Pilotanlage für einen vakuumisolierten Speicher mit 6.5m^3 Volumen in Betrieb genommen. Der Speicher wurde als Druckspeicher bis 6bar getestet und eignet sich für Prozesswärme. Mit der Vakuumisolierung wurde ein 4 bis 6 fache bessere Dämmung erreicht und eine Halbwertszeit von 260 Tagen. Die Vakuumisolierung ist nicht feuchteempfindlich wie andere Dämmstoffe, so eignet sich der Speicher auch für eine Aufstellung im Freien.

Daten:	
Speichergrosse:	16 m ³
Leistung	100kW/m ³
Halbwertszeit:	260 Tage bei 16m ³ 20cm Dämmstärke

Zyklen: 0.0026K/(d K)
 Unbegrenzt

Adsorptionsspeicher für Mobile Anwendung [8] [2]

In der Abfallverbrennungslage in Hamm (Nordrhein-Westfalen) wurde eine Pilotanlage zur Abwärmenutzung aufgebaut. Bei der Pilotanlage handelt es sich um einen mobilen Sorptionsspeicher. Mit dem mobilen Speicher wurde die Energie von der Verbrennungsanlage in eine 7 km entfernten Firma transportiert. Die Energie wird für einen Trocknungsprozess eingesetzt. Die Hilfsenergie für die Be- und Entladung sowie der Transport belaufen sich auf 10% der gespeicherten Energie. Mit der Anlage wurde ein Energiepreis von 0.05 Euro pro kWh erreicht.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb muss der Speicher mindestens zu 60% ausgelastet sein. Mit zunehmendem Transportweg nehmen die Kosten linear zu. Also mit einem Weg von 20km steigen die Kosten von 0.05Euro/kWh auf 0.07Euro/kWh. Der Transport von Industrieabwärme in Container oder vergleichbaren Systemen ist vorwiegend von Transportaufwand abhängig. Das heisst, dass hier vorwiegend leichte Energiespeicher für einen wirtschaftlichen Betrieb entscheidend sind. Deshalb sind für mobile Anwendung Sorptionsspeicher gut geeignet.

Daten:

Typ: Adsorptions Zeolite 13X / Wasser, offenes System
 Ladetemperatur: 135-250°C
 Entladung: Zuluft 55°C 65% r.F. ; Luft aus dem Speicher 150-210°C
 Masse: Zeolite 14t; Zeolit+Behälter 24t
 Energiedichte: 200-308kWh/t (bei 135°C bzw. 250°C Ladetemperatur)
 Kapazität: 2.4-3.7 MWh pro Container
 Leistung: 207-780kW
 Wirkungsgrad 90%
 Zyklen: 300-1000 pro Jahr
 Container Abmessung: 8.35m lang, 2.49m breit und 2.85m hoch

Adsorptionsspeicher in Geschirrspüler [8] S.119

In modernen Geschirrspülern wird ein Adsorptionsspeicher eingesetzt. Mit der Integration des thermischen Speichers konnte der Energieverbrauch gegenüber einem konventionellen Geschirrspüler um 23% reduziert werden. Entwickelt wurde die Speicherintegration in Geschirrspülern vom ZAE Bayern und der Bosch-Siemens – Haushaltsgeräte.

Für das Heizen wird die Luft im Geschirrspüler auf 285°C erwärmt und durch den Speicher geblasen. Hierbei wird der Speicher geladen. Aus dem Speicher tritt 50°C Luft mit einer sehr hohen Luftfeuchtigkeit aus, welche in den Spülraum gelangt. Im Spülraum kondensiert das Wasser aus der Luft und erhitzt so den Spülraum und das Spülwasser auf 40°C. Am Ende des Spülprozess muss das Geschirrtrocknet werden, hierfür wird der Speicher entladen. Die 35°C feuchte Luft im Spülraum wird durch den Speicher geblasen, hierbei wird die Luft getrocknet und auf 170°C aufgeheizt. Mit der Trockenen warmen Luft kann das Geschirrtrocknet werden.

Sehr effizient wird der Prozess dadurch, dass die feuchte Luft, welche beim Laden des Speichers (Desorption) austritt, für das Heizen des Spülwassers verwendet wird.

Daten:

Typ: Adsorptions Zeolite/Wasser Typ13X als offenes System
 Masse: 1 kg Zeolite
 Kapazität 180-200 kWh/m³ (laden bei 280-300°C)
 Leistung: Laden 2kW, Entladung 1kW
 Speicherzeit: 45min
 Zyklen: ca. 200 pro Jahr

Thermischer Speicher zur Integration von Solarthermie für die Prozesswärme

Erste Firmen haben eine Solaranlage für die Erzeugung der Prozesswärme aufgebaut. Die Systeme sind jeweils mit thermischem Speicher ausgerüstet. Beispiele sind:

- Zehnder in Gränichen
5'000l Wasserspeicher bei 110°C, Als zusätzliche Wärmespeicher dienen die Tauchbecken in der Lackiererei. Solarer Ertrag von mindestens 156.7 MWh/a.
- Emmi in Saignelegier
Wasserspeicher mit 15m³ bei 110°C und 6.7bar, Solarer Ertrag von 260MWh/a.

Für solare Kraftwerke werden ebenfalls thermische Speicher eingesetzt.

Das solarthermische Kraftwerk Andasol in Spanien verwendet flüssiges Nitratesalz. Hierfür wird ein Zweispeicher System eingesetzt. Die Speicherkapazität ist im GWh Bereich und hat ein Volumen von 14'000 m³. Die Speichertemperatur im warmen Tank ist bei 380°C, der kalte Tank bei 280°C.

Beim solarthermischen Kraftwerk Ait-Baha in Maroco wird für die Wärmespeicherung eine Kieselsteinschüttung verwendet. Die Speichertemperatur liegt zwischen 270-570°C.

Anwendungen in WKK

Die Abfallverbrennungsanlage in Buchs SG setzt thermische Speicher für das Fernwärmenetz ein. Mit den Speichern kann das Kraftwerk stromgeführt betrieben werden. In drei Etappen wurden die Speicher gebaut. Bei jeder Etappe wurden vier Wasserspeicher von je 200m³ dazu gebaut. Die Speicher haben eine Temperatur zwischen 150°C und 60°C. Sie sind im Freien aufgestellt. Alle 12 Speicher zusammen haben eine Gesamtenergie von 240MWh.

Betonspeicher [22]

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat mit der Ed. Züblin AG einen Betonspeicher für den Testbetrieb aufgebaut. Hierbei wurden Wärmetauscher-Rohre einbetoniert. Getestet wurden zusätzlich verschiedene Betonmischungen. Der Speicher hat eine Kapazität von 400kWh und eine Abmessung von 9x 1.3x1.7m (19.9m³) ohne Isolation. Die Speichertemperatur ist bei 390°C. Die Leistung liegt bei 100kW.

Betonspeicher werden ebenfalls für thermische aktive Bauelemente verwendet. Hierbei sind die Speichertemperaturen jedoch <100°C.

Latent Wärmespeicher [22]

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat ebenfalls einen latenten Testspeicher für Temperaturen zwischen 200 und 240°C aufgebaut. Für die Wärmeübertragung wurde das PCM in eine Lamellenstruktur integriert. Als Speicher material wurde Nitrat-Salz verwendet. Der Speicher wiegt 2000kg und hat eine Abmessung von 5x0.6x0.5m (1.5m³). Die Speicherkapazität ist 200kWh bei einer Leistung von 100kW.

4 Wirtschaftliche Betrachtung

Die Kosten eines thermischen Speichers sind vom Speicher material, Lade-Entladevorrichtung sowie dem Betriebskosten abhängig. Je nach System dominieren andere Kostenanteile.

Sensible Speicher sind vergleichsweise sehr günstig. Sie bestehen lediglich aus dem Speicher material, einem Tank, eine meist sehr einfache Lade- Entladevorrichtung und der Isolation. Die Isolation ist bei den sensiblen Speicher ein massgebender Kostenpunkt und entscheidend für den erreichbaren Wirkungsgrad. Latente oder chemische Speicher sind dagegen deutlich komplexere Systeme. Die Einbauten für die Wärmeübertragung sind meistens höher Kostenfaktoren als das Speicher material. [8]

Die genauen Kosten variieren sehr stark je nach Anwendung. Dabei spielen die Anzahl Speicherzyklen eine wichtige Rolle. Dieser Zusammenhang wird in Tabelle 5 dargestellt. Die Tabelle zeigt wie hoch die Investitionskosten für einen wirtschaftlichen Betrieb maximal sein dürfen in Abhängigkeit der Zyklen.

Tabelle 5: Maximale Investitionskosten in Abhängigkeit der Speicherzyklen; Quelle [8]

Speicher	Zyklen pro Jahr	Spez. Investitionskosten Euro/kWh
Saisonale Speicherung	1	0.18
Wochenspeicher	50	9
Tagesspeicher	300	54
Kurzzeitspeicher (3 Zyklen pro Tag)	900	160
Pufferspeicher (10 Zyklen pro Tag)	3'000	540

Die Werte basieren auf einer Speicherkapazität von 100kWh. Es wird angenommen, dass der Wärmepreis bei 0.05 Euro/kWh und die Amortisationszeit bei 5 Jahren liegen. Die Kapitalkosten und Betriebskosten sind mitberücksichtigt. [8]

Ersichtlich wird, dass für saisonale Speicher (1 Zyklus pro Jahr), nur sensible Speicher infrage kommen, da hier die Investitionskosten tief sind. Für Speicher mit 300 oder mehr Zyklen (Tagesspeicher) können auch latente oder thermochemische Speicher eingesetzt werden.

5 Vergleich der Speicher

In Abbildung 12 werden Wärmespeicher verschiedener Technologien im Bereich 100°C bis 400°C mit Bezug zu der speicherbaren Energie ab 100°C verglichen.

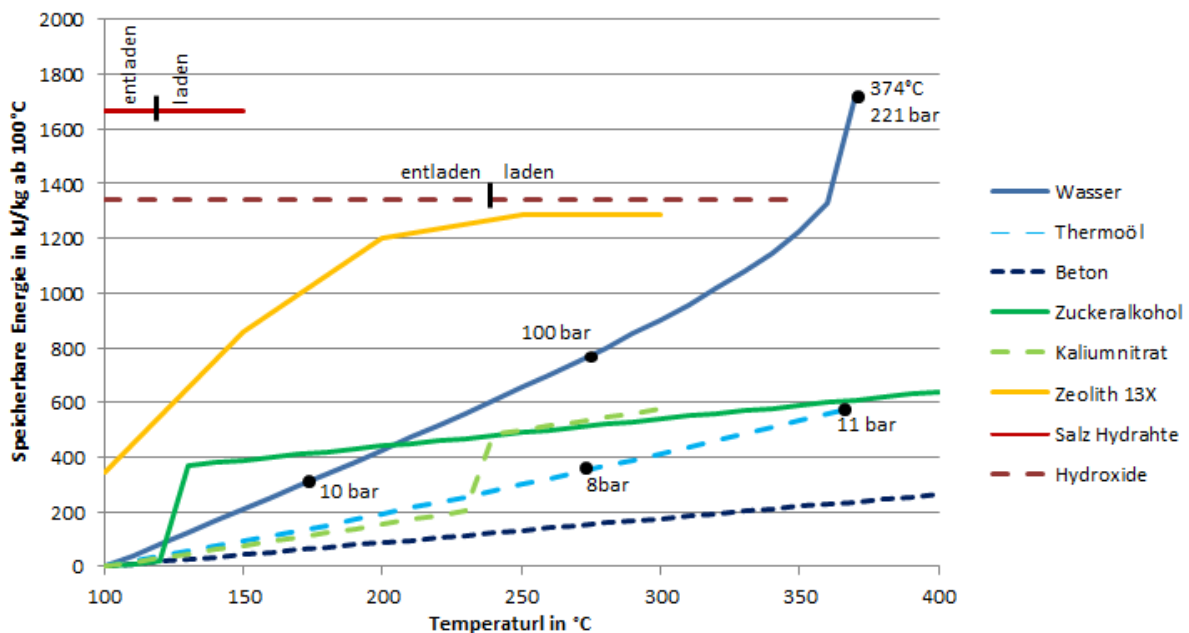


Abbildung 12: Vergleich der speicherbaren Energie in kJ/kg ab 100°C bis 400°C von verschiedenen thermischen Speichern. Blau sind die sensiblen Speicher, grün die latenten Speicher, rot die chemisch reversiblen Reaktion, und gelb die Sorptionspeicher. Sowohl bei den latenten und chemisch reversiblen Reaktion sind Stoffe für den gesamten Temperaturbereich vorhanden.; Zeolith 13X als geschlossenes System bei 12.3mbar, die Temperatur bezieht sich auf die Desorptionstemperatur; Datenquelle [1][20]

Für die sensiblen Speicher ist immer ein Temperaturunterschied notwendig, je höher der Temperaturunterschied ist je höher ist auch die speicherbare Energie. Feste sensible Speicher haben den Vorteil, dass sie keine Druckbehälter benötigen. Latente Speicher verhalten sich vor und nach dem Phasenübergang gleich wie sensible Speicher. Beim Phasenübergang wird die Schmelzenthalpie frei, welche für die Speicherung genutzt werden kann. Dank der konstanten Temperatur können sie auch bei kleinen Temperaturunterschieden zwischen Vor- und Rücklauf verwendet werden. Die speicherbare

Energie bei chemisch reversiblen Reaktionen ist nicht temperaturabhängig. Unter der Gleichgewichtstemperatur (schwarzer Strich) wird der Speicher entladen, oberhalb der Gleichgewichtstemperatur wird der Speicher geladen. Bei der Sorption ist die speicherbare Energie von der Beladung abhängig. Mit zunehmender Temperatur kann der Zeolith stärker getrocknet werden und die Energiedichte steigt.

In Abbildung 13 wird die spezifische und volumetrische Energiedichte von verschiedenen Speichertypen verglichen. Zum Vergleich wurden die Energiespeicherkapazität (Heizwert) von Heizöl hinzugezogen. Die Speicherkapazität ist bei allen Speichern 100kWh. Die Werte beziehen sich auf das Speichermedium ohne den Behälter.

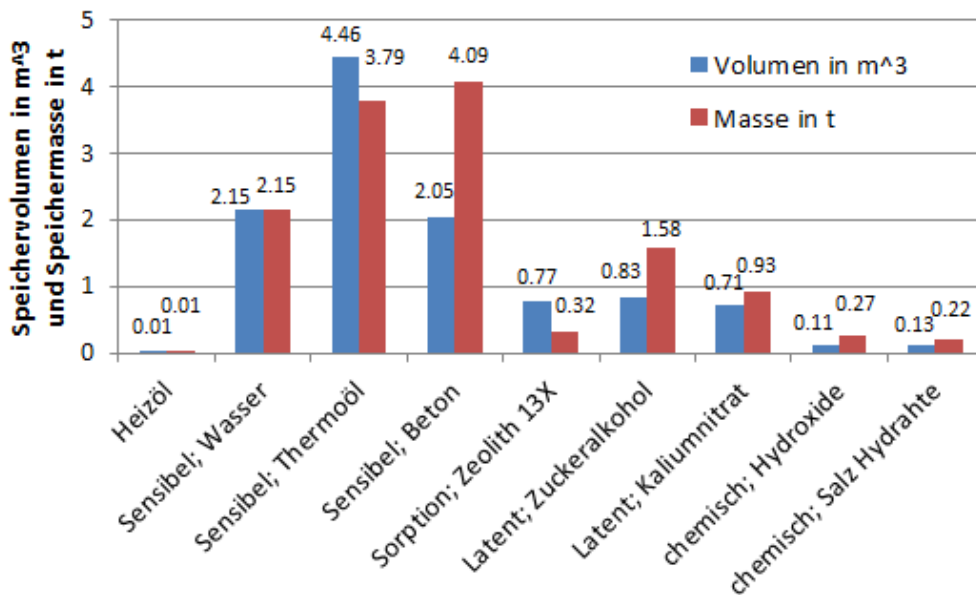


Abbildung 13: Masse und Volumen verschiedenen Speichertypen für eine Speicherung von 100kWh. Betrachtet wird das Speichermedium ohne Behälter.¹ Datenquelle [1]

Die sensiblen Speicher haben das grössten Volumen und die grösste Masse. Wobei Wasser als Speichermedium am besten abschneidet. Wasser ist jedoch aufgrund des hohen Dampfdrucks bei höheren Temperaturen nicht mehr einsetzbar. Die latenten Speicher sind rund dreimal kleiner als die sensiblen Speicher. Sie benötigen aber mehr Einbauten. Die chemisch reversiblen Speicher sind ein Vielfaches kleiner und leichter als die sensiblen Speicher. Sie benötigen jedoch noch an Forschungsarbeit für eine Umsetzung in industriellen Prozesse. Sorptionsspeicher eignen sich auf Grund des geringen Gewichts für mobile Anwendungen. Für Prozesswärme, wobei Temperaturen >150°C für die Ladung zur Verfügung stehen, eignet sich Zeolith 13X. Zudem ist der Entwicklungsstand bereits weiter als bei den chemisch reversiblen Reaktionen.

Es gibt keinen universal einsetzbareren Speicher. Je nach Randbedingungen muss der passende Speicher eingesetzt werden. Entscheidende Kriterien sind hierbei: Zyklen pro Jahr, Speicherkapazität, Platzbedarf, Bezugsleistung, Beladungs- sowie Entladungstemperatur.

¹ Für Wasser wurde ein dT von 40K verwendet, für Thermoöl (Therminol VP-1) 50K und für Beton 100K.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Energiespeicher; Bedarf Technologien Integration
Michael Sterner und Ingo Stadler
Springer; Heidelberg 2014
ISBN 978-3-642-37379
- [2] Verlustfreie Speicher mit thermochemischen Materialien
Bernhard Zettl
ASIC- Austria Solar Innovation Center
Wels 2012
- [3] Wikipedia Adsorption
Stand Juni 2015
<http://de.wikipedia.org/wiki/Adsorption>
- [4] Zellulare Metalle und Verbundwerkstoffe zur Optimierung des Be- und Entladeverhaltens
thermischer Energiesysteme
J. Meinert
Fraunhofer- Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
Dresden 2009
[http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Dokumente%20ETM/
Thermische_Speicherung.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Dokumente%20ETM/Thermische_Speicherung.pdf)
- [5] Offene Adsorptionsspeicher mit Zeolith
Andreas Hauer
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung ZAE,
Gleisdorf Solar 2000
http://www.zae-bayern.de/fileadmin/web_data/import-redaxo/zeo_absorp.pdf
- [6] Wikipedia Absorption
Stand Juni 2015
[http://de.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(Chemie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Absorption_(Chemie))
- [7] Forschung Verbund Sonnenenergie
Bernhard Milow, Gerd Stadermann
FSV Workshop 2001
[http://www.fv-sonnenenergie.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2001-
2/ws2001-2.pdf#page=36](http://www.fv-sonnenenergie.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2001-2/ws2001-2.pdf#page=36)
- [8] BINE-Fachbuch Wärmespeicher, 5. Vollständig überarbeitete Auflage
A. Hauer, S. Hiebler, M. Reuss
Fraunhofer IRB Verlag; 2012
ISBN: 978-3-8167-83664-4
- [9] <http://www.westfalia-waermetech.de/ingenieurwesen/wissen/ruths-dampfspeicher.html>
Stand Juni 2015
- [10] Thermische Energiespeicher-Neuste Entwicklung und Anwendungen
Doerte Laing, Dr. Rainer Tamme, Dr. Antje Wörner, Dr. Werner Platzler
Dr. Peter Schossig, Dr. Andreas Hauser
FVEE Thema 2012
http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2012-2/th2012_07_05.pdf
- [11] Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 2013
Bundesamt für Energie BFE; 2014

-
- [12] Studie Speicher für die Energiewende
P. Rundel; B. Meyer, M Meiller et al.
Fraunhofer- Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Sulzbach-Rosenberg 2013
http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/studie_speicher_energiewende.pdf
- [13] Energiespeicher- Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbaren Energien
Dr. Andreas Hasuer, Dr. Michael Specht, Dr. Michael Sterner
- [14] Energiespeicher in der Schweiz- Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050
Bundesamt für Energie BFE; Schlussbericht Dezember 2013
- [15] Speicherung für Hochtemperaturwärme
Dr. Rainer Tamme, Dr. Thomas Nunez, Dr. Joachim Götsche; FVS LZE 2005
http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2005/th2005_06_02.pdf
- [16] Discussion Paper Nr. 9 „Power-to-heat“ oder „Power-to-gas“
Dr. Helmut-M. Groscurth und Dr. Sven Boden
Arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik; Hamburg 2013
http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius_DP_9_-_Power-to-heat.pdf
- [17] <http://www.vapex.ch/elektrokessel/elektrokessel/>
Stand Juni 2015
- [18] <http://www.parat.no/ieh/>
Stand Juni 2015
- [19] Energiespeicher; Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung
Bernd Diekman, Eberhard Rosenthal
Springer; Wiesbaden 2013
ISBN 978-3-658-00501-6
- [20] Zeolithspeicher: Zeolithspeicher in der thermischen Solartechnik: Machbarkeit und Potential
Paul Gantenbein, Ueli Frei
Institut für Solartechnik SPF Hochschule Rapperswil
BFE Schlussbericht März 2000
www.bfe.admin.ch/forschungssolarwaerme/02213
- [21] Gefälle-Dampfspeicher
Prof. Dr. –Ing. habil. Bernd Jössnitz; Oktober 2012
<http://berndglueck.de/Waermespeicher>
- [22] Speichertechnik nicht nur für Solarenergie
Doerte Laing, Rainer Tamme
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik
4. Solartagung Rheinland-Pfalz „Klimaschutz durch Sonnenenergie“ 2008
- [23] Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien; Agora Energiewende; Fraunhofer IWES
http://www.stiftung-umweltenergierecht.de/fileadmin/pdf_aushaenge/wiss._Veroeff/PtH_Agora_kurz_2014-06-23.pdf

7 Anhang

7.1 Bilder von Speichersystemen



Betonspeicher ohne Isolation
Vier Module von je 80kWh
Quelle [22]



Betonspeicher Testanlage
400 kWh, gemäss Kapitel 4.3
Quelle [22]



Nitrat-Salz Speicher
Andasol in Spanien mit 14'000m³ Speicher,
gemäss Kapitel 4.3
Quelle [22]



Latent Wärmespeicher mit Lamellen
100kWh, gemäss Kapitel 4.3
Quelle [22]



Sorptionsspeicher mit Dampfkanal in der Mitte und Spiralwärmetauscher im Silikat; geschlossenes System
Quelle: Modulare Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte; W.Wagner, D.Jähni, 2006



Gefälledampfspeicher der Firma BBS
Quelle: http://www.bay-boiler.com/de/produkte/anlagen_und_apparate/dampfspeicher.php, Stand Juni 2015



Mobiler Sorptionsspeicher für eine Verbrennungsanlage.
3.7 MWh Speicherkapazität,
gemäss Kapitel 4.3
Quelle: [8]



Power-to-Heat Kessel von Pirat
Quelle: <http://www.parat.no/ieh/>
Stand Juni 2015

7.2 Beispiel: Prozesswärme bei 200°C

Mithilfe einer einfachen Berechnung soll aufgezeigt werden, dass die Wahl des korrekten Speichers von diversen Randbedingungen abhängig ist.

Auslegedaten

Wärmebezug bei 200°C
Speicherkapazität von 500kWh
Speicherzeit von 24h
Als Wärmeträger wird Thermoöl verwendet

Wasserspeicher

Bei der Verwendung eines Wasserdruckspeichers kann die Wärme z.B. mit einem Plattenwärmetauscher übertragen werden. Hier kann mit einem Temperaturunterschied von 5K zwischen dem Speicher und dem Thermoöl gerechnet werden. Für die Speicherentladung ist eine Pumpe erforderlich. Anstelle des Plattenwärmetauschers kann auch ein Register im Speicher eingebaut werden. Mit einem dT von 5°C ist die minimale Speichertemperatur bei 205°C. Der Dampfdruck bei 205°C ist bei 17bar. Die Speichertemperatur kann höher als die minimale Speichertemperatur von 205°C sein. Je höher die Temperatur, desto kleiner wird das Speichervolumen, jedoch steigen auch die Verluste und der Druck.

Die Kapazität des Speichers errechnet sich folgend:

$$Q = cp * M * dT$$

Q= Kapazität [kJ], cp= Spezifische Wärmekapazität [kJ/kg-K], dT = Temperaturunterschied [K]

Das dT ist für die Speicherkapazität massgebend. Wird davon ausgegangen, dass der Speicher bis auf die Rücklaufemperatur entladen werden kann, ist das nutzbare dT des Speicher 155°C, wäre die Rücklaufemperatur bei 150°C so ist das dT 55°C und die Speicherkapazität gerade mal 37%.

Thermoöl

Als Wärmespeicher kann Thermoöl verwendet werden. Mit dem Thermoöl ist kein zusätzlicher Wärmetauscher notwendig. Therminol VP-1 kann bis zu 400°C eingesetzt werden. Das Thermoöl hat eine etwa halb so grosse Wärmekapazität wie Wasser, dadurch wird das Speichervolumen ebenfalls grösser.

Betonspeicher

Beim Betonspeicher werden Wärmetauscher Rohre einbetoniert. Durch die Rohre kann das Thermoöl zirkulieren. Je nach hydraulischer Verschaltung müssen separate Rohre für die Ladung und Entladung verwendet werden. Beton hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 2.1 W/(m K), deshalb wird mit einem Temperaturabstand von 20°C zwischen dem Thermoöl und dem Beton ausgegangen. Somit muss der Betonspeicher auf mindestens 220°C aufgeheizt werden. Analog zum Wasserspeicher gilt, je höher die Temperatur, desto kleiner die Speichermasse. Der Zusammenhang ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Leistung des Speichers ist abhängig von der Speichertemperatur. Das heisst, wenn ein konstanter Durchfluss durch den Speicher gefordert wird, nimmt die Leistung mit zunehmender Entladung ab. Analog zum Wasserspeicher gilt wiederum, je tiefer der Speicher entladen werden kann, desto grösser ist die Kapazität. Da jedoch beim Entladen immer eine Temperatur von 200°C notwendig ist kann der Speicher nicht komplett auf die Rücklaufemperatur entladen werden. Für den Vergleich wurde angenommen, dass die Entladetemperatur der Durchschnitt aus der Entlade- und Rücklaufemperatur ist. Für die Einbauten wurde das Speichervolumen mit dem Faktor 1.2 Multipliziert.

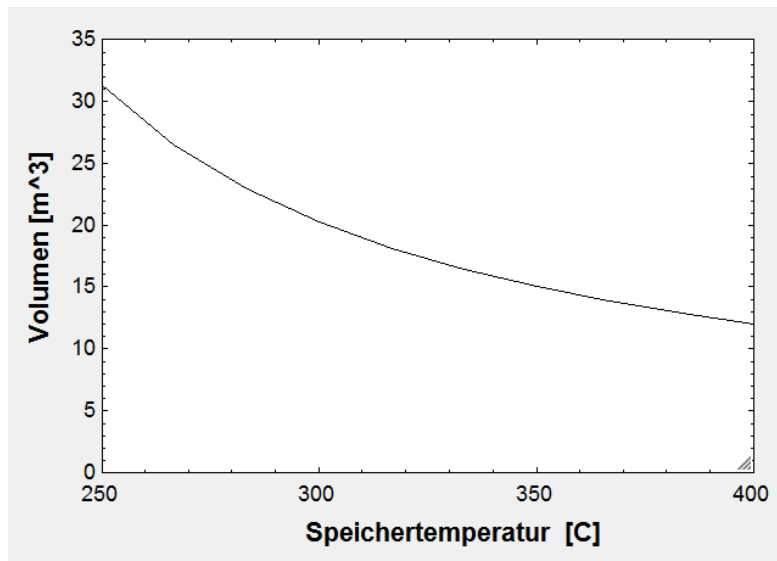


Abbildung 14: Speichervolumen in Abhängigkeit des Speichertemperatur von einem Betonspeicher; Rücklaufemperatur bei 150°C, Speicherkapazität von 500kWh

Latente Wärmespeicher

Für die Verwendung eines latenten Wärmespeichers muss ebenfalls mit einer tiefen Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden. Da jedoch die Temperatur des Speichers konstant bleibt, ist der mittlere Temperaturabstand genügend gross, solange die Rücklaufemperatur weit unter dem Schmelzpunkt liegt. Das heisst, es kann ein PCM mit einer Schmelztemperatur nahe bei der Vorlaufemperatur verwendet werden. Da die Speichertemperatur bei der Entladung konstant bleibt, ist bei den latenten Speichern die Rücklaufemperatur nicht so entscheidend wie bei den sensiblen. Für die Berechnung wurde berücksichtigt, dass sich ein latenter Wärmespeicher nach dem Aggregatsübergang wie ein sensibler Speicher verhält. Für die Einbauten für die Wärmeübertragung wurde das Volumen mit dem Faktor 1.3 multipliziert.

Sorption

Je trockener der Zeolith ist, desto höher ist die Energiedichte. Bei Sorptionsspeicher ist für die Speicherkapazität nicht die Rücklaufemperatur sondern die maximale mögliche Ladetemperatur massgebend. Mit zunehmender Beladung nimmt die Wärmeentzugsleistung ab. Für die Einbauten für die Wärmeübertragung wurde das Volumen mit dem Faktor 1.1 multipliziert.

Dämmung:

Für den Wirkungsgrad der Speicher wurden die Wärmeverluste berechnet. Hierfür wurde mit einer Wärmedämmung von 10cm Mineralwolle ($0.04\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) gerechnet.

Ergebnisse

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse bei einer Rücklaufemperatur von 150°C dargestellt.

Tabelle 6: Speicher bei 150°C Rücklauf, Wärmebezug bei 200°C und Kapazität von 500kWh

	Volumen m ³	Masse kg	Ladetemperatur °C	Speichertemperatur °C
Wasser (23bar)	6.3	6263	225	220
Thermoöl (5bar)	16.4	17408	210	210
Beton	12.0	20971	420	400
Latent	4.7	6812	230	220
Sorption	3.2	2044	300	-

Der Sorptionsspeicher hat mit 3.2m^3 das kleinste Volumen. Er muss hierfür bei 300°C getrocknet werden. Für den Betonspeicher ist eine Ladetemperatur von 400°C notwendig und ein 3.75 mal grösseres Volumen. Das Volumen des Wasserspeichers ist 1.3 mal grösser als das des latenten Speicher. Der Druck für den Wasserspeicher ist bei 23 bar. Die Werte des latenten Speichers variieren stark je nach PCM.

Das Speichervolumen ist bei den sensiblen Speichern stark von der Entladetemperatur abhängig. Die Entladetemperatur wird von der Rücklauftemperatur bestimmt. In Abbildung 15 ist das Speichervolumen in Abhängigkeit zur Rücklauftemperatur dargestellt.

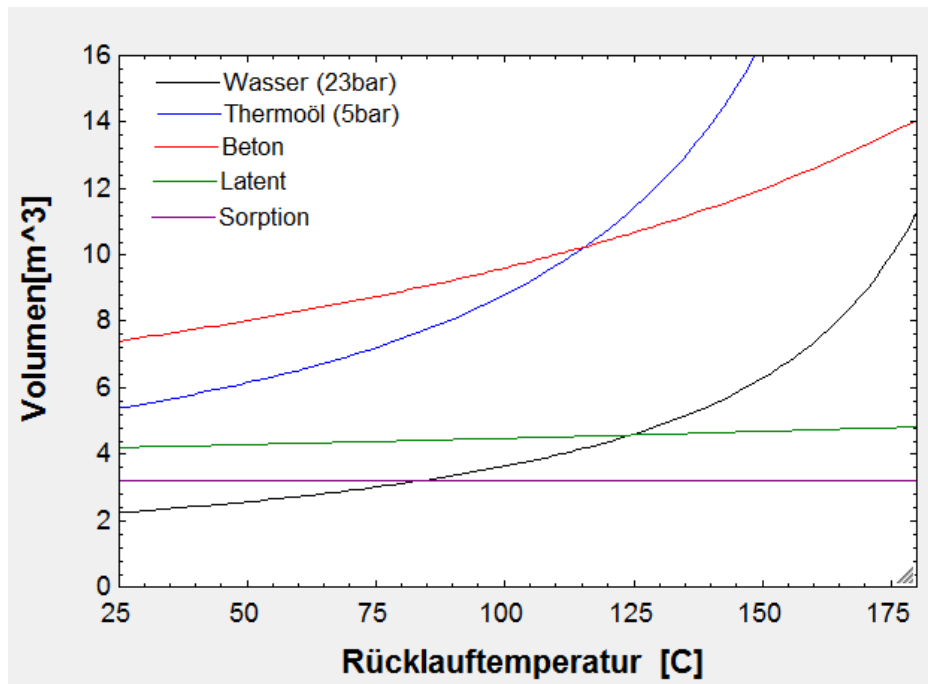


Abbildung 15: Speichervolumen von verschiedenen Speichertechnologien in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur. Alle Speicher haben eine Kapazität von 500kWh . Die Entladetemperatur ist bei 200°C .

Die flüssigen sensiblen Speicher sind stark von der Rücklauftemperatur abhängig, da sie nahezu bis auf die Rücklauftemperatur entladen werden können. Der Betonspeicher reagiert etwas geringer auf die Rücklauftemperatur, da er eine höhere Speichertemperatur hat und nicht komplett bis auf die Rücklauftemperatur entladen werden kann. Für den latenten Speicher ist die Rücklauftemperatur erst von Bedeutung, wenn der Speicher im festen Zustand ist, sodass er sich wie ein sensibler Speicher verhält.