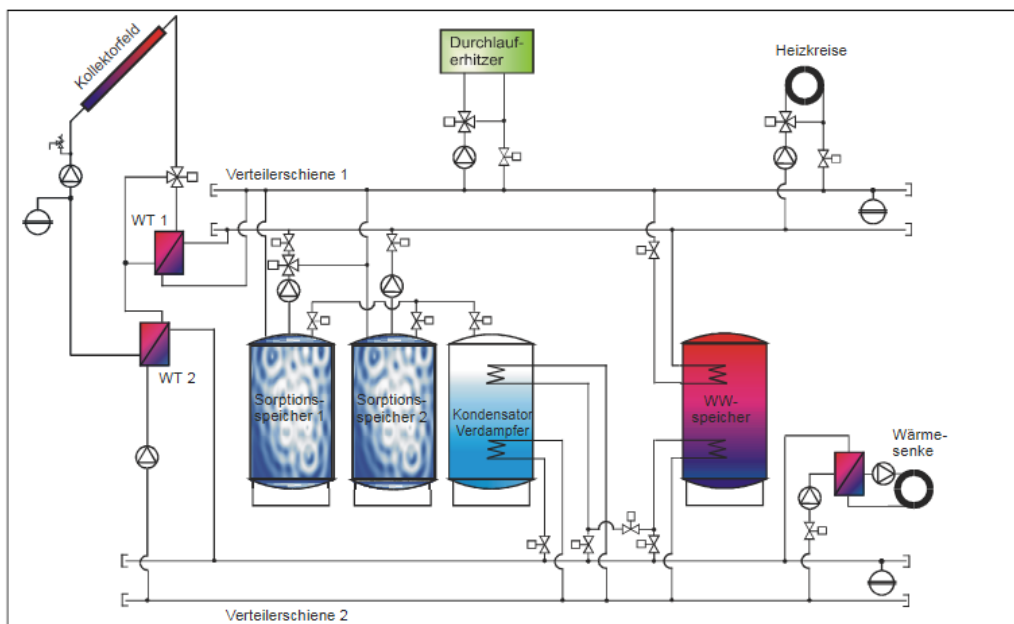


Vorstudie

Saisonale Energiespeicher



Sorptionspeicheranlage mit Solarthermie in Gleisdorf (Bild: AEE INTEC)

Von:
Thomas Bucher

Auftraggeber:
Fördervereins Institut Energiesysteme
9471 Buchs

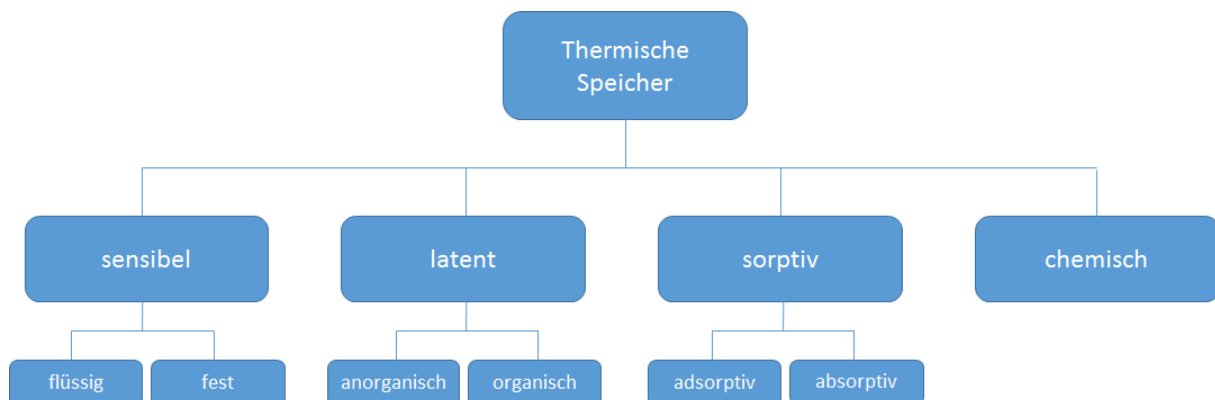
1 Einleitung

Ziel der Vorstudie ist es abzuklären, welche saisonalen möglichst verlustfreien, thermischen Energiespeichertechnologien heute für eine Anwendung im Ein- und Mehrfamilienhaus existieren. Dabei werden die verschiedenen Technologien bezüglich Kosten, Platzbedarf und Effizienz verglichen. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der thermochemischen Energiespeicherung (Adsorption).

Um die verschiedenen Technologien miteinander vergleichen zu können, wird für das Einfamilienhaus mit einem Energiespeicher von 2000kWh gerechnet. Dieser Betrag entspricht der Menge, die ein Niedrigenergiehaus nicht durch die eigene solarthermische Anlage decken kann. Für das Mehrfamilienhaus (8 Familien) wird von einem zusätzlichen Energiebedarf von 8500 kWh ausgegangen.

2 Konzepte zur saisonalen thermischen Energiespeicherung

Es gibt heute mehrere Konzepte mit unterschiedlichem Entwicklungsstand in der thermischen Energiespeicherung. Im Folgenden werden diese genauer vorgestellt, sowie deren Vor- und Nachteile und Entwicklungspotential beschrieben. Auf die rein chemischen Energiespeicher wird in diesem Rahmen nicht eingegangen.



2.1 Sensible Wärmespeicher

Der sensible Wärmespeicher zeichnet sich dadurch aus, dass eine Energiezu- oder Abfuhr immer auch eine Temperaturänderung bedeutet. Sensible Jahreszeitspeicher implizieren daher, dass die Speichertemperatur tief gehalten werden muss oder aber die Wärmedämmung entsprechend aufwändig ist.

Einfamilienhaus [12]

1982 wurde in der Schweiz das erste Einfamilienhaus energieautark mit einem sensiblen Jahreszeitspeicher versorgt. Das "Jenni- Gebäude" in Oberburen (BE) hat 3 Speicher wobei der Hauptspeicher allein 85'000 Liter Wasser fasst. Heutige Jahresspeicher für Einfamilienhäuser liegen zwischen 20'000 bis 32'000 Litern.

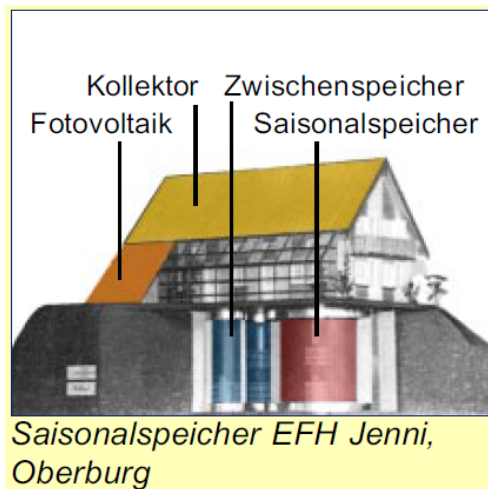


Abbildung 1: Erstes Energieautarkes Einfamilienhaus [12]

Berechnung des Energiespeicherpreises für ein Einfamilienhaus [14]:

Für ein Einfamilienhaus bietet Jenni.ch einen Packetpreis für einen Saisonspeicher von 109'400 CHF (ohne MWST) an. Im Preis inbegriffen sind ein 31'900 Liter Tank, 78m² thermische Kollektoren sowie sämtliche hydraulische Komponenten und die Steuerung. Geht man davon aus dass der Tank in 20 Jahren abgeschrieben wird, mit einer Kapitalverzinsung von 3% und Unterhaltskosten von 1% der Investitionskosten zu rechnen ist, dann ergibt sich total ein Betrag von gut 156'000 CHF. Da in den 20 Jahren 40'000 kWh Energie gespeichert wurde, ergibt dies Energiekosten von 4 CHF/kWh. Dieser Betrag ist etwas unter dem des Berichtes [1] in welchem von gut 4 CHF/kWh ausgegangen wurde (März 2000).

Mehrfamilienhaus [13]:

In der Schweiz ist 2005 /2006 ebenfalls in Oberburen (BE) das schweizweit erste 100% mit Sonnenergie beheizte Mehrfamilienhaus gebaut worden (siehe Abbildung 2). Der sensible Wärmespeicher umfasst 205'000 Liter Wasser und versorgt 8 Familien im Winter mit der im Sommer gespeicherten Wärme. Wie erste Erfahrungsberichte [13] nach einigen Wintern zeigten, ist die Speichertemperatur nie unter 40°C gefallen. Der Speicher war somit deutlich überdimensioniert. Im Jahre 2013 wurde dann ein weiteres 8 Familienhaus mit einem redimensionierten Speicher von 105'000 Litern gebaut. Die Planer gingen von einem nutzbaren Temperaturhub von 70K aus, was einer Energiemenge von 8500 kWh entspricht.

Berechnung des Energiespeicherpreises für ein Mehrfamilienhaus (8 Familien) [13]:

Zu den Kosten für das Speichervolumen von 105000 Litern kommen noch die 180m² Kollektorfläche dazu. Da für diese Speichergrosse keine Preise gefunden wurde, ist mit einem linearen Preisanstieg gerechnet worden (2.8 CHF/L). Dies führt zu einem Preis von 315'000 CHF ohne MWST. Mit denselben Zinssätze und Abschreibungen wie beim Einfamilienhaus ergeben sich daraus Energiekosten von 2.60 CHF/kWh. Jenni selbst, gibt einen Preise von 0.1 CHF/kWh für Speichergrossen von mehreren 100m³ an [9].Diese Preise sind wohl etwas optimistisch angeben.



Die neuen Solarhäuser (rechts) weisen einen deutlich kleineren Solarspeicher und weniger Kollektorfläche auf. Damit steht mehr Wohnraum zur Verfügung – die Wirtschaftlichkeit kann optimiert werden. (Bild: Jenni AG)

Abbildung 2: Erste und zweite Generation der Jenni Mehrfamilienhäuser [13]

Jahreszeitspeicher für Wohnquartiere [8]:

In Deutschland hat diese Art der saisonalen Energiespeicher ebenfalls einige Entwicklungsschritte hinter sich und kann, je nach Grösse und verwendeter Technologie, mittlerweile auch wirtschaftlich betrieben werden. Seit 1995 werden im Rahmen des F+E Programmes Solarthermie2000plus des BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) rund ein dutzend Pilotanlagen betrieben und umfassend dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Forschungsberichte bilden eine gute Grundlage zur Bewertung dieser Technologie.

Der Forschungsbericht "Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung" [8] bezieht sich auf einen Untersuchungszeitraum von 2007 bis 2011 und analysiert die folgenden vier sensiblen Wärmespeichertypen: Erdbecken-, Erdsonden-, Behälter- und Aquiferwärmespeicher. Neben dem technischen und wirtschaftlichen Aspekt wurde auch die Ökobilanz der Anlagen ausgewertet. Abbildung 3 gibt eine Übersicht der Kosten in Abhängigkeit der Speichergrosse und des verwendeten Speichertyps. In Abbildung 4 und 5 sind die Baukosten nochmals weiter aufgeschlüsselt dargestellt. Generell sind bei allen Speichertypen grössere Speicher günstiger und bei gleicher Speichergrosse die Baukosten der Erdsonden- und Aquiferspeicher geringer als die der Erdbecken- und Behälterspeicher. Wird das Solarsystem in die Kostenrechnung mit einbezogen, und auf €/kWh umgelegt, ist mit 19 Eurocents der Erdsondenspeicher der günstigste (aber auch der grösste der vorliegenden Speicher). Die drei anderen Speichertypen liegen alle zwischen 0.24 €/kWh und 0.26 €/kWh. Saisonale Sensible Wärmespeicher mit mehreren hundert MWh/a Speicherkapazität liegen heute also kostenmässig zwischen 25-30 Rp./kWh.

Ein wichtiger Vorteil der Behälterspeicher ist, dass grosse Leistungen entnommen und gespeichert werden können. Die Erdsonden und Aquiferspeicher dagegen sind auf die Wärmeleitung des Bodens angewiesen und daher in ihrer Leistungsabgabe und Leistungsaufnahme beschränkter. Bei den Aquifer Speichern ist zudem aufgrund der fehlenden Isolation ein Betrieb über 50°C nicht sinnvoll, wäh-

rend die Behälter bis auf 95°C erhitzt werden können [7]. Die Speicherverluste betragen bei den Behältern rund 16.5%, Aquifer 18%, Erdsonden sowie Erdbecken 12%. Die Betriebskosten werden bei allen Speichersystemen mit rund 1% der Baukosten und die Lebensdauer mit 30-50 Jahren angegeben [7].

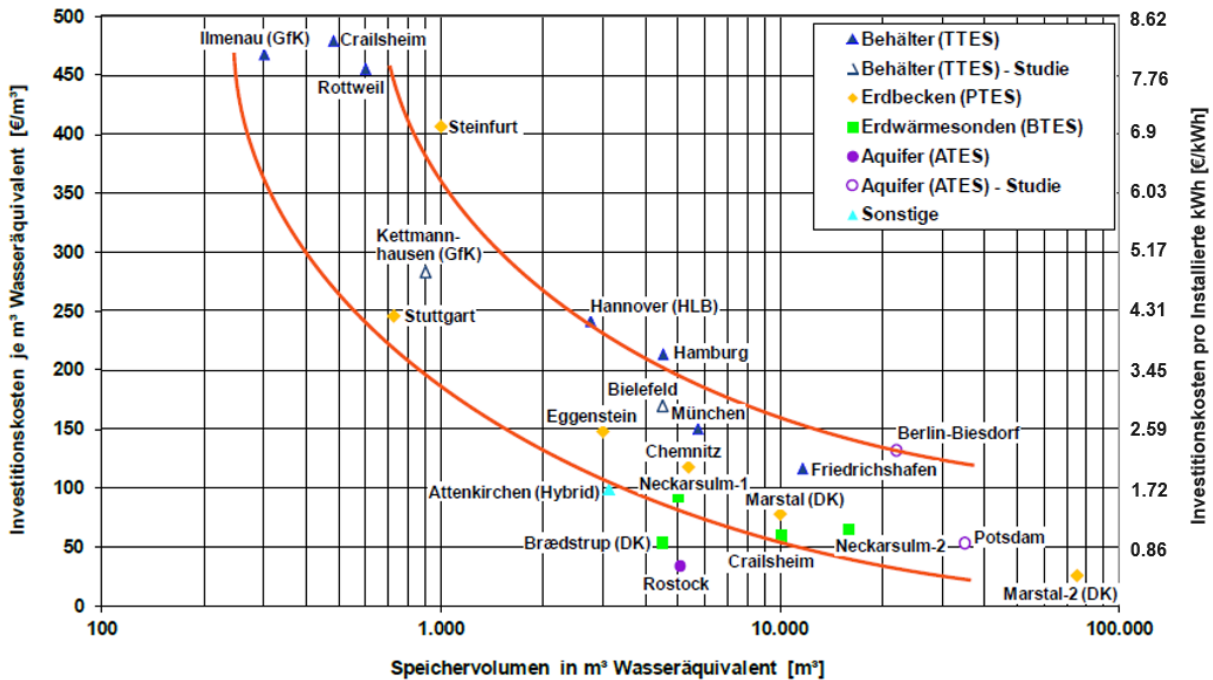


Abbildung 3: Investitionskosten in Funktion des Speichervolumens für verschiedene Speichertypen [8]

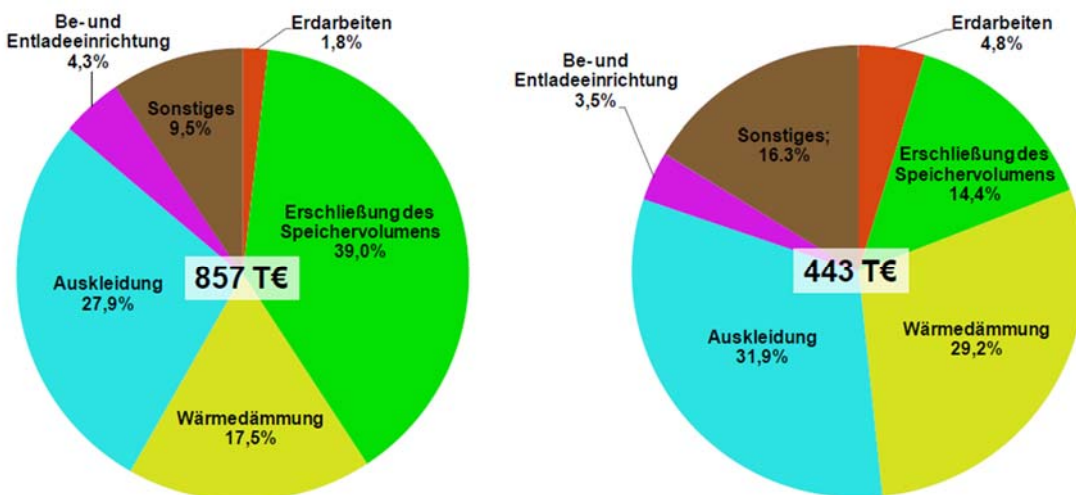


Abbildung 4: Aufteilung der Investitionskosten je Speichertyp in ihre Kostenanteile anhand konkreter Pilotanlagen. Links Behälter- und rechts der Erdbeckenspeicher [8]

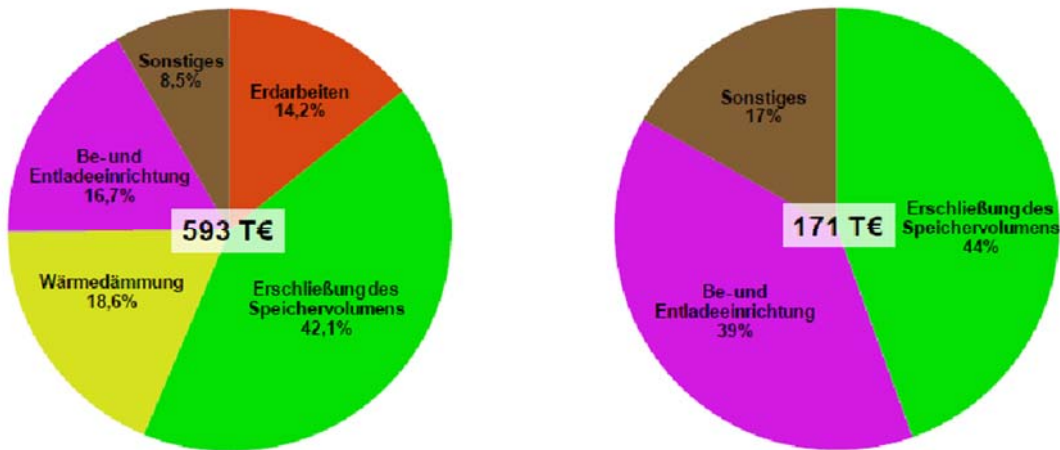


Abbildung 5: Aufteilung der Investitionskosten je Speichertyp in ihre Kostenanteile anhand konkreter Pilotanlagen. Links Erdsonden- und rechts der Aquiferspeicher [8]

Die Zukunft der saisonalen sensiblen Wärmespeicher liegt unter anderem in einer Zweckerweiterung wie beispielsweise der Pufferung von Spitzenlasten in Fernwärmesystemen. Damit können Lastspitzen im Winter, die bisher mit fossil befeuerten Spitzenlastkesseln gedeckt wurden, ersetzt werden. Diese Multifunktionalität ermöglicht eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und ist eine der Massnahmen, um die bis ins Jahr 2020 angestrebte Marktbereitschaft dieser Technologie zu erreichen [8].

2.2 Latente Wärmespeicher (PCM)

Latente Wärme entspricht der Wärme, die zum Schmelzen aufgewendet werden muss und beim Erstarren frei wird. Diese Eigenschaft ermöglicht somit bei gleichbleibender Temperatur Energie in Material zu speichern. PCMs können heute für fast jede beliebige Schmelztemperatur zwischen 20°C und 100°C produziert werden und bieten daher ein grosses Feld an Anwendungsmöglichkeiten.

PCM Langzeitwärmespeicher

Das erste PCM Gebäude wurde 1949 in der Nähe von Boston gebaut und hatte ein Speicher von 21 Tonnen Glaubersalz, um die von Solarkollektoren produzierte Wärme aufzunehmen. Der Versuch musste im 3. Jahr abgebrochen werden, der PCM war defekt [6]. Und bis heute ist die Langzeitstabilität der Salzhydrate eine der grössten Herausforderungen.

In Abbildung 6 sind Materialien in Bezug zu ihrer Schmelzenthalpie und Schmelztemperatur aufgetragen. Im Bereich von 1°C bis 100°C ist die Auswahl auf Salzhydrate und Paraffine beschränkt.

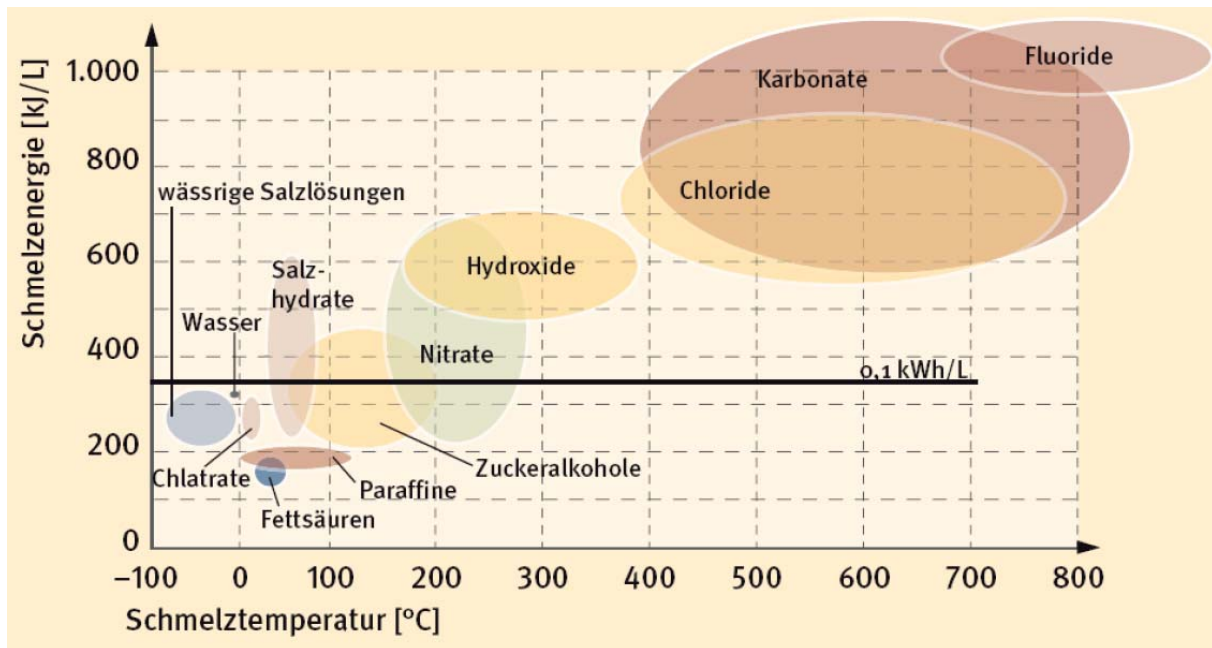


Abbildung 6: PCM's in Funktion der Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie [11]

Die wässrigen Lösungen (eutektische Salzlösungen) sind weit verbreitet und werden schon lange, allerdings zur Kältespeicherung, eingesetzt.

Die Paraffine sind technisch gut handhabbar, zyklenstabil, chemisch wenig reaktiv und nicht toxisch. Sie sind allerdings mit einer Schmelzenthalpie von 200 kJ/kg und einer Dichte von 0.7 bis 0.9 kg/L relativ volumenintensiv und aufgrund der Brennbarkeit in der Gebäudetechnik beschränkt einsetzbar. Salzhydrate dagegen haben eine Dichte von 1.4 bis 1.6 kg/L bei einer Schmelzenthalpie von ebenfalls 200 kJ/kg. Die doppelte Energiedichte macht diese Gruppe interessant, technisch allerdings bereiten sie aufgrund ihrer chemisch inhomogenen Zusammensetzung Probleme. Die Salzhydrate schmelzen nicht kongruent. D.h. beim Schmelzen bilden sich verschiedene Phasen die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte räumlich trennen. Es gibt Möglichkeiten, wie das Zufügen von Wasser, um die Zyklusstabilität zu erhöhen. Allerdings entsteht dadurch ein zusätzlicher Aufwand (Pumpen etc.), welcher dieses Verfahren recht umständlich macht. Weiter gab es Bestrebungen mit einer Mikroverkapselung die dichtegetriebene Entmischung zu unterbinden und so die Zyklusstabilität zu erhöhen. Dies gelang bisher jedoch auch nur mit mässigem Erfolg. Ein anderer Ansatz bestand darin das PCM in eine Matrix aus Mineralischen oder Polymer- Schäumen einzupacken (Makroverkapselung) [10].

Hohe Preise, geschlossenporige Matrixstrukturen und geringe Festigkeiten sowie weitere Nachteile verhinderten bis jetzt aber den Durchbruch dieses Lösungsansatzes. Der technischen Unwegsamkeit gegenüber steht ein attraktiver Preis des Grundmaterials von 2.5 bis 3.5 CHF/L PCM (mikroverkapselt 12 CHF/kg), welcher diese Technologie weiterhin gute Zukunftschancen bietet.

Anwendungen für kurzzeitige Speicherungen werden beispielsweise von Sunamp vertrieben. Das PCM ersetzt dabei einen Boiler und kann die Tiefpreise des elektrischen Stromes im Tagesverlauf oder aber auch PV Strom für das Aufladen nutzen (www.sunamp.co.uk). Eine taugliche Anwendung zur jahreszeitlichen Speicherung mit PCM's (ausserhalb von Eisspeichern) gibt es bisher jedoch nicht

[5].

2.3 Thermochemische bzw. sorptive Wärmespeicher

Eine beinahe verlustfreie Speicherung von thermischer Energie über lange Zeiträume ist mittels Sorption möglich. Die dabei verwendeten Materialien wie Zeolithe und Silikagel (SO_2) besitzen eine genau definierte Porenstruktur und eine im Verhältnis zu ihrem Volumen sehr grosse Oberfläche. Aufgrund der Porengrösse eignen sie sich, um selektiv Moleküle einer bestimmten Grösse aus der Luft herauszufiltern (Molekularsieb) oder aber auch um diese bewusst zu lagern. Da das Gerüst der Zeolithe polar ist, nimmt es bevorzugt ebenfalls polare Moleküle auf wie beispielsweise Wasser. Die Wassermoleküle werden regelrecht aufgesogen und durch die Van der Waals Kräfte im Zeolithegerüst festgehalten. Dieser Prozess ist endotherm und durch das Aufheizen des Zeolithes auch wieder reversibel. Zeolithe kommen in der Natur vor, werden aber auch für die Industrie, vielfach mit spezifischen Eigenschaften, hergestellt. Um als Jahreszeiteinspeicher geeignet zu sein, sind eine hohe Energiedichte und damit eine grosse Wasseraufnahmefähigkeit gefragt. Besonders geeignet sind laut mehreren Quellen [1], [3] die Zeolithe 3A, 4A und 13X. Die Lebensdauer des Adsorbens (Zeolith) ist nach bisherigen Kenntnisstand "unbeschränkt". Allerdings nimmt die Speicherkapazität nach 1000 Zyklen zwischen 5-15% ab, danach bleibt die Kapazität erhalten [1].

Funktionsweise des Sorptionsspeichers [2]:

Adsorptionsspeicher werden in offene und geschlossene Systeme eingeteilt. Bei offenen Systemen wird bei der Adsorption der Adsorbens (Zeolith) unter atmosphärischem Druck mit feuchter Luft durchströmt. Dabei steigt die Lufttemperatur und der Wasserdampfdruck sinkt. Bei der Desorption wird die Luft mit einer externen Wärmequelle aufgeheizt und löst dabei das Adsorbat (Wasser) im Adsorbens. Die Luft transportiert den dabei freigewordenen Wasserdampf aus der Schüttung. Das geschlossene System wird bei Wasserdampfdrücken von einigen mbar betrieben und muss daher gasdicht sein. Rohrwärmetauscher in der Zeolithschüttung nehmen die entstehende Wärme bei der Adsorption auf und geben diese auch bei der Desorption wieder an das Zeolith ab. Ein über ein Ventil mit der Zeolithschüttung verbundener Wassertank versorgt das Zeolith mit Wasser und dieses fliesst über einen Kondensator bei der Desorption auch wieder in den Wassertank zurück.

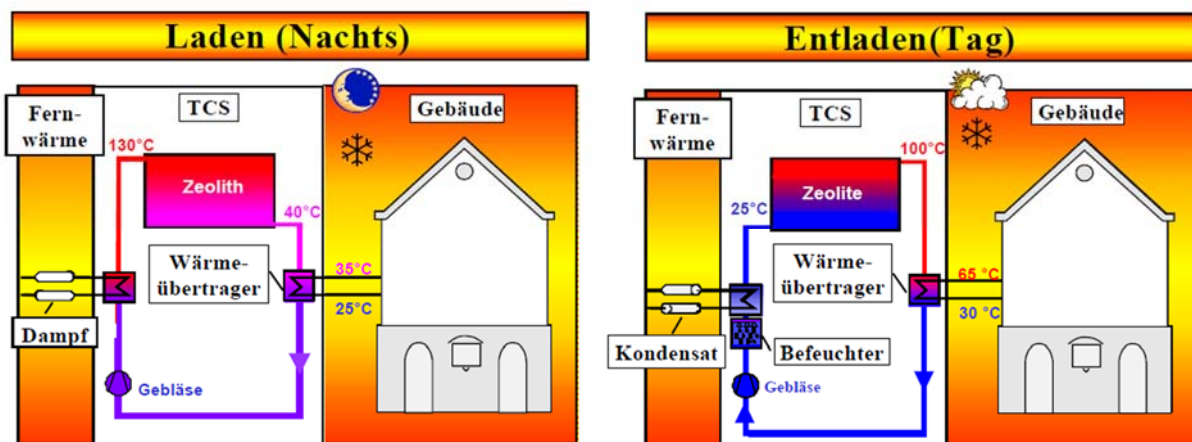


Abbildung 7: Darstellung des Lade und Entladevorganges eines offenen Zeolithespeichers in Kombination mit einem Fernwärmenetz (realisierte Anlage in München) [2]

Einer der ersten Zeolithspeicher wurde 1997 in München im Keller einer Graphikschule in Betrieb genommen und von ZAE (Zentrum für Angewandte Energieforschung) Bayern wissenschaftlich begleitet. Der offene Sorptionsspeicher ist mit 7 Tonnen Zeolith 13X in der Lage, während 14 h mit einer Leistung von 95kW zu heizen (Energiespeicherung von 1300 bis 1400 kWh). Die Vorlauftemperatur ins

Gebäude ist dabei auf 65°C eingestellt. Die maximale Heizleistung liegt bei 130kW bei einem Luftvolumenstrom von 6000 m³/h. Der Speicher ist an ein Fernwärmenetz angeschlossen und wird während Spitzenlastenzeiten eingesetzt. Die Beladung erfolgt ebenfalls aus dem Fernwärmenetz bei 130°C (Abbildung 7). Die Anlage läuft nun schon etliche Jahre und es hat sich gezeigt, dass das System als solches funktioniert. Von der theoretisch erreichbaren Energiedichte von 177 kWh/m³ konnten Werte zwischen 120 bis 130 kWh/m³ nachgewiesen werden.

Neben dem Zeolith kommen auch Silikagel als Sorptionmaterialien in Fragen. Die deutlich tieferen Desorptionstemperaturen machen diese für Kombinationen mit solarthermischen Anlagen interessant. So hat das ISE (Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme) zusammen mit der UFE Solar GmbH und der AEE INTEC (Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIEN) in Gleisdorf (DE) einen Teststand aufgebaut und betrieben, dessen Energiespeicher von 20 m² Kollektorfläche geladen wird [16]. Zwei Tanks mit je 1.25 m³ wurden mit je 1.1m³ Silikagel CaCl₂ (SYLOBEAD B127) gefüllt (siehe Abbildung 8). Bei der Entladung erfolgte die Regelung über den Dampfdruck so, dass die Vorlauftemperatur zwischen 32°C und 42°C zu liegen kam. Mit Desorptionstemperaturen im Speicher von 80°C bis 90°C (Kollektorvorlauftemperatur von 95°C bis 105°C) konnte die Beladung des Silikagels unter 10 Gewichtsprozenten gebracht und so Energiedichten zwischen 115-120 kWh/m³ (theoretisch: 140-150 kWh/m³) erreicht werden. Auch die FH Rapperswil hatte 2002 im Auftrag des BFE in eine kleine Versuchsanlage mit 35 Liter Silikagel 720 (ZEOCHEM AG Uetikon) betrieben [17]. Ihre Schlussfolgerung aus dem Versuch im geschlossenen System war, dass die tatsächliche Speicherdichte bei Betrachtung des Gesamtsystems nur bei 6- 20 kWh/m³ liegt. Der Grund dafür ist, dass das für die Sorption benötigte Wasser aus dem Verdampfer (Abbildung 8) stammt. Aus dem Verdampfer gelangt das Wasser in Form von feuchter Luft in den Sorptionsspeicher. Es wird keine Pumpe benötigt, da der geringe Wasserdampfdruck die Verdampfung anregt. Allerdings wird dabei dem verbleibenden Wasser im Verdampfer die Verdampfungsenthalpie entzogen und dieser kühlt dadurch ab. Damit nun der Verdampfer nicht zu sehr abkühlt, muss dieser etwas beheizt werden. Berücksichtigt man nun in der Energiebilanz auch diese aufzuwendende Verdampfungsenthalpie, dann fällt die Energiespeicherdichte auf die beschriebenen Werte zusammen.

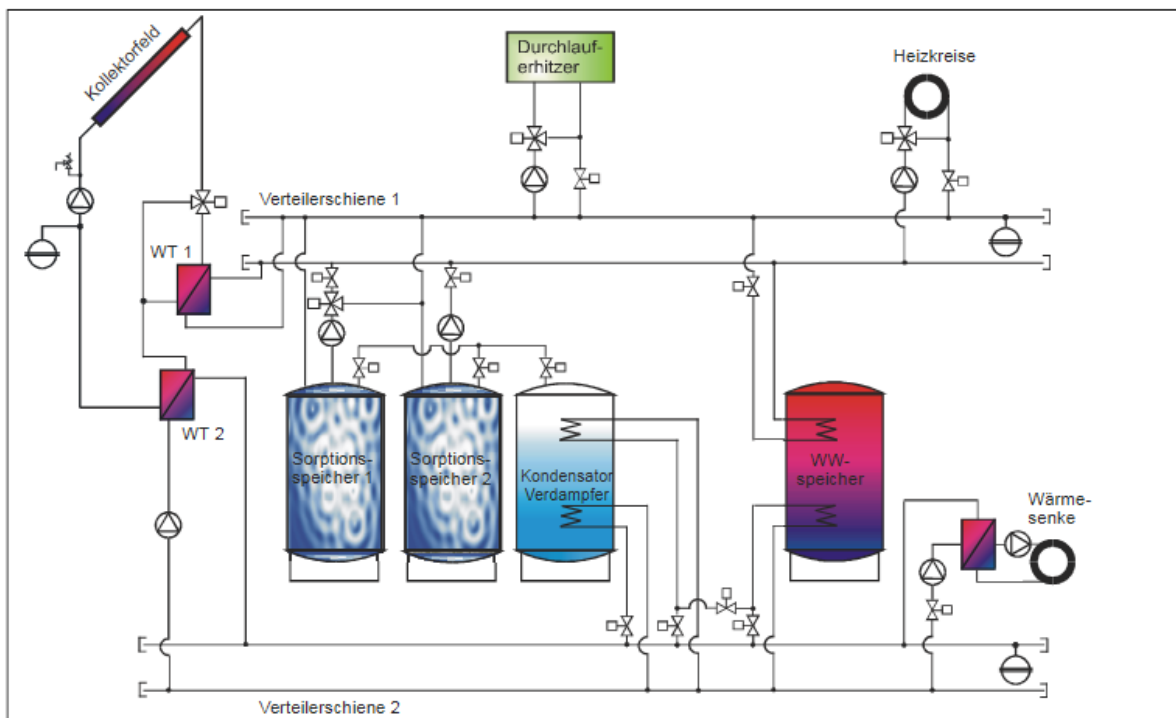


Abbildung 8: Schema der geschlossenen Sorptionsspeicheranlage mit Solarthermie in Gleisdorf [16]

Energiedichte [1]:

Die Energiespeicherdichte von Sorptionspeichern ist, neben materialabhängigen Grösse wie der Wasseraufnahmefähigkeit pro kg auch abhängig von der Höhe der Nutztemperatur. Wie in Abbildung 9 dargestellt, sinkt der nutzbare Temperaturhub und die Energiespeicherdichte nimmt ab, wenn Wärme auf einem höheren Niveau benötigt wird. Zudem ist ersichtlich, dass bis zu einer Desorptionstemperatur von 200°C das Trocknen des Zeoliths die Energiedichte deutlich erhöht, ein weiteres Aufheizen danach jedoch nur noch wenig zusätzliche Energiedichte generiert.

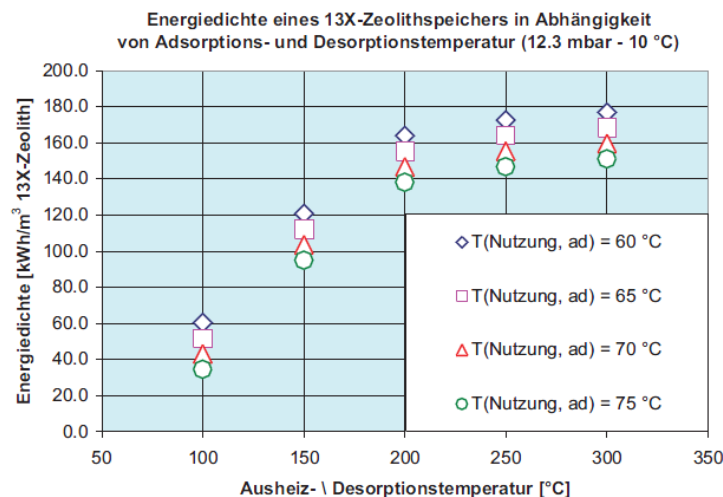


Abbildung 9: Energiedichte in Abhängigkeit der Desorptionstemperatur bei 12.3mbar [1]

Energiepreise Zeolithspeicher [2]:

Wieviel ein Zeolithspeicher kostet und wie lange die Amortisationszeit dauert hängt in erster Linie von dessen Verwendung ab. Der Zeolithspeicher im Münchner Keller beispielsweise, soll sich laut den Planern nach 8 Jahren amortisiert haben. Allerdings werden damit 150 Zyklen im Jahr gefahren und dies ist eines der ausschlaggebendsten Kostenpunkte. Für einen Jahreszeitenspeicher mit nur einem Zyklus pro Jahr sind die System- und Materialkosten um ein vielfaches relevanter. Wie sich der Preis pro kWh mit dem Zeolithpreis und der Anzahl Zyklen pro Jahr verhält ist in Abbildung 10 veranschaulicht. Als Referenzgrösse wurde ein Wasserspeicher mit einer Kapazität von 2000 kWh herangezogen, dessen Preis pro kWh laut [1] bei guten 5 CHF/kWh liegt (März 2000). Mit mehreren Zyklen pro Jahr sinkt dann die Preissensibilität deutlich.

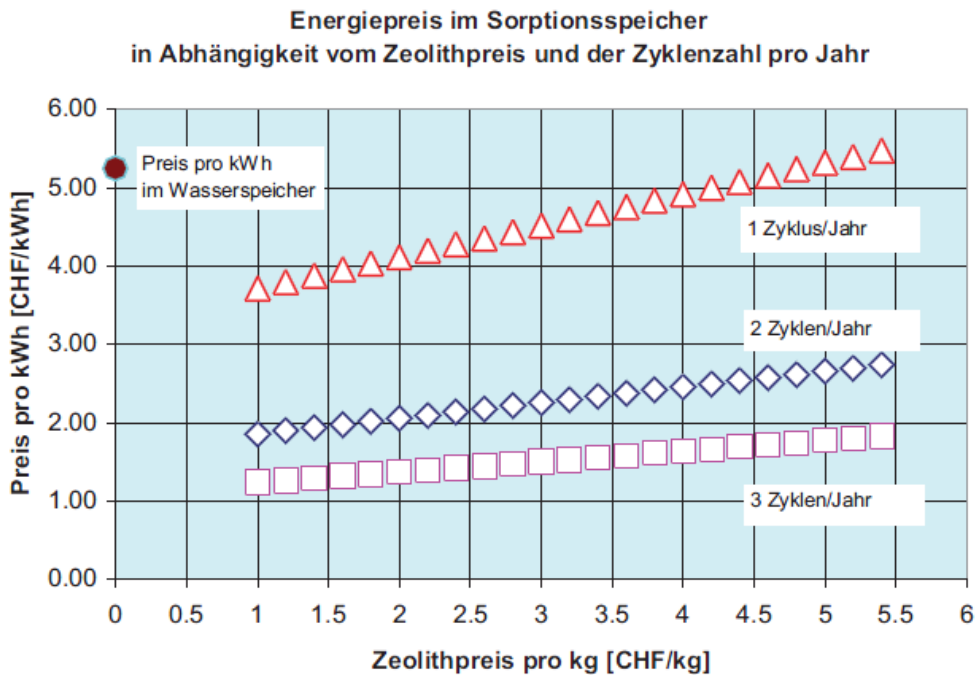


Abbildung 10: im Vergleich zu einen Wasserspeicher mit 2000kWh Kapazität [1]

Kosten Einfamilienhaus:

Unter der Annahme, dass die benötigten Desorptionstemperaturen mit Kollektoren genügend oft erreicht und die benötigten Energien über den Sommer auch in den Speicher eingebracht werden können, ist die folgende Kostenkalkulation gemacht worden.

Als Grundlage für diese Berechnung dienen die Angaben aus der Kostenkalkulation für den sensiblen Wärmespeicher und der realisierte Zeolithespeicher aus München. Da die Energie zur besseren Vergleichbarkeit auch von der Solarthermie kommen soll, kann von der Kostenberechnung des sensiblen Speichers der Wassertank durch einen Tank voll Zeolithe ersetzt werden. Im Dokument [15] sind die Kostenstellen aufgeschlüsselt und für Zeolithe werden Investitionskosten von 7500 €/kWh, für den Behälter 20'000 €/kWh ausgewiesen. Für die 2000 kWh ergeben sich so 15'000 €+ 40'000 €, also 55'000 € bzw. 66'000 CHF für diese beiden Komponenten. Mit den auf der Jenni Homepage angegebenen Kosten für den Jahreszeiten-Wassertank von 44'500 CHF werden die Investitionskosten für den Zeolithespeicher rund 22'000 CHF höher (Ohne MWST) als beim sensiblen Speicher. Auf das Endprodukt ergibt dies Energiekosten von 4.7CHF/kWh.

Kosten Mehrfamilienhaus:

Wird mit denselben kWh Preisen wie beim Einfamilienhaus gerechnet, ergibt dies für das Zeolithe bzw. den Behälter Kosten von 76'500 CHF bzw. 204'000 CHF. Nimmt man wieder an, dass die Systemkosten (Verrohrung, Steuerung etc.) denen des sensiblen Wärmespeichers entsprechen, so ergibt dies Energiekosten von rund 4 CHF/kWh.

Anbieter von Sorptionsheizungssystemen:

Es sind heute bereits Heizsysteme mit Zeolith als Adsorbens auf dem Markt. So hat Valliant, eine Heiz- Lüftungs und Klimatechnikfirma mit Sitz in Deutschland, eine Zeolith-Gas-Wärmepumpe (ze-

oTHERM) im Portfolio. Die Desorption erfolgt über den Gasbrenner und ermöglicht so in einem geschlossenen System eine hohe Entladung des Speichers. Eine Kollektortemperatur von 3°C reicht dabei aus, um die Energie für die Verdampfungsenthalpie bereitzustellen und so die Adsorption am Laufen zu halten. (www.vaillant.de)

3 Speicherung elektrischer Energie

Um elektrische Energie auf Abruf bereitzuhalten, existieren je nach den Bedürfnissen verschieden grosse Speicher und auch verschiedene Systeme. Einen aktuellen Überblick über den Stand der Technik und einige weitere, für die Auswahl saisonaler Speicher wichtige Parameter, sind in der Abbildung 11 zusammengefasst [4].

Legende zur Abbildung 11 und Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

- PHS: Pumped Hydroelectric Storage
- CAES: Compressed air energy storage
- Lead acid: Lead acid batteries
- NiCd : Nickel cadmium batteries
- NaS :Sodium sulphur
- ZEBRA : Sodium nickel chloride
- Li-io: Lithium ion batteries
- VRB: Vanadium redox battery
- ZnBr: Zinc bromine battery
- PSB: Polysulphide bromide battery
- SMES: Superconducting magnetic energy storage
- AI-TES : Aquiferous low temperature TES (Thermal Energy Storage)
- CES : Cryogenic Energy Storage
- HT-TES : high temperature Thermal Energy Storage

Bewertung der Speichersysteme :

Für die Charakteristiken der verschiedenen Systeme wurde ein Limit oder Bereich festgelegt, welche für das Ein- und Mehrfamilienhaus sinnvoll sind. Die folgende Tabelle bewertet die Systeme nach der Anzahl erfüllter Punkte.

Tab 1: Bewertung verschiedener elektrischer Energiespeichertechnologien

	Power rating	Self discharge per day	Suitable Storage duration	Capital cost [\$/kWh]	Energy density [Wh/L]	Influence on environment	
System	10 -15 kW	Very small max 0.2%	Hours-month	Maximal 10	Minimal 50	at least Small	Total
Lead acid	x	x			x		3
NiCd	x	x			x		3
NaS					x		1
ZEBRA	x				x		2
Li-io	x	x			x		3
Fuel cells	x	x	x		x		4
Metal-Air	x	x	x	x	x	x	6
VRB			x				1
ZnBr			x		x		2
PSB			x				1

Systems	Power rating and discharge time		Storage duration		Capital cost		
	Power rating	Discharge time	Self discharge per day	Suitable storage duration	\$/kW	\$/kWh	€/kWh-Per cycle
PHS	100-5000 MW	1-24 h+	Very small	Hours-months	600-2000	5-100	0.1-1.4
CAES	5-300 MW	1-24 h+	Small	Hours-months	400-800	2-50	2-4
Lead-acid	0-20 MW	Seconds-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	300-600	200-400	20-100
NiCd	0-40 MW	Seconds-hours	0.2-0.6%	Minutes-days	500-1500	800-1500	20-100
NaS	50 kW-8 MW	Seconds-hours	~20%	Seconds-hours	1000-3000	300-500	8-20
ZEBRA	0-300 kW	Seconds-hours	~15%	Seconds-hours	150-300	100-200	5-10
Li-ion	0-100 kW	Minutes-hours	0.1-0.3%	Minutes-days	1200-4000	600-2500	15-100
Fuel cells	0-50 MW	Seconds-24 h+	Almost zero	Hours-months	10,000+		6000-20,000
Metal-Air	0-10 kW	Seconds-24 h+	Very small	Hours-months	100-250	10-60	
VRB	30 kW-3 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	600-1500	150-1000	5-80
ZnBr	50 kW-2 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
PSB	1-15 MW	Seconds-10 h	Small	Hours-months	700-2500	150-1000	5-80
Solar fuel	0-10 MW	1-24 h+	Almost zero	Hours-months	-	-	-
SMES	100 kW-10 MW	Milliseconds-8 s	10-15%	Minutes-hours	200-300	1000-10,000	
Flywheel	0-250 kW	Milliseconds-15 min	100%	Seconds-minutes	250-350	1000-5000	3-25
Capacitor	0-50 kW	Milliseconds-60 min	40%	Seconds-hours	200-400	500-1000	
Super-capacitor	0-300 kW	Milliseconds-60 min	20-40%	Seconds-hours	100-300	300-2000	2-20
AL-TES	0-5 MW	1-8 h	0.5%	Minutes-days		20-50	
CES	100 kW-300 MW	1-8 h	0.5-1.0%	Minutes-days	200-300	3-30	2-4
HT-TES	0-60 MW	1-24 h+	0.05-1.0%	Minutes-months		30-60	

Systems	Energy and power density				Life time and cycle life		Influence on environment	
	Wh/kg	W/kg	Wh/L	W/L	Life time (years)	Cycle life (cycles)	Influence	Description
PHS	0.5-1.5		0.5-1.5		40-60		Negative	Destruction of trees and green land for building the reservoirs
CAES	30-60		3-6	0.5-2.0	20-40		Negative	Emissions from combustion of natural gas
Lead-acid	30-50	75-300	50-80	10-400	5-15	500-1000	Negative	Toxic remains
NiCd	50-75	150-300	60-150		10-20	2000-2500		
NaS	150-240	150-230	150-250		10-15	2500		
ZEBRA	100-120	150-200	150-180	220-300	10-14	2500+		
Li-ion	75-200	150-315	200-500		5-15	1000-10,000+		
Fuel cell	800-10,000	500+	500-3000	500+	5-15	1000+	Negative	Remains and/or combustion of fossil fuel
Metal-Air	150-3000		500-10,000			100-300	Small	Little amount of remains
VRB	10-30		16-33		5-10	12,000+	Negative	Toxic remains
ZnBr	30-50		30-60		5-10	2000+		
PSB	-	-	-	-	10-15			
Solar fuel	800-100,000		500-10,000		-	-	Benign	Usage and storage of solar energy
SMES	0.5-5	500-2000	0.2-2.5	1000-4000	20+	100,000+	Negative	Strong magnetic fields
Flywheel	10-30	400-1500	20-80	1000-2000	~15	20,000+	Almost none	
Capacitor	0.05-5	~100,000	2-10 capacitor	100,000+ 2.5-15	~5 500-5000	50,000+	Small	Little amount of remains 100,000+
Super-						10-30		
20+		100,000+	Small	Little amount of remains				
AL-TES	80-120		80-120		10-20		Small	
CES	150-250	10-30	120-200		20-40		Positive	Removing contaminates during air liquefaction (Charge)
HT-TES	80-200		120-500		5-15		Small	

Abbildung 11: Vergleich Speichersysteme [4]

Die Metall-Luft Batterie ist nach dieser Bewertung für die saisonale Speicherung elektrischer Energie am geeignetsten, gefolgt von der Brennstoffzelle und den drei gleichplatzierten Blei-, Nickel-Cadmium- und Lithium-Ionen –Batterie. Diese Auswertung berücksichtigt allerdings nur das Potential, die technische Reife und die Wirkungsgrade sind dabei noch nicht berücksichtigt. Die Abbildung 12 zeigt den Entwicklungsstand der Technologien und da sind die Metall-Luft wie auch die Brennstoffzelle noch weit davon entfernt eine breite Anwendung zu finden. Auch bei den Wirkungsgraden wie in Abbildung 13 veranschaulicht, weisen diese beiden Technologien bescheidene Werte aus. Von den 3 Drittplatzierten sind die Blei- und die NiCd- die beiden, deren Entwicklungsstand die Marktreife erreicht hat. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades der Bleibatterie ist diese nach wie vor am ehesten für eine saisonale Speicherung von elektrischer Energie verwendbar.

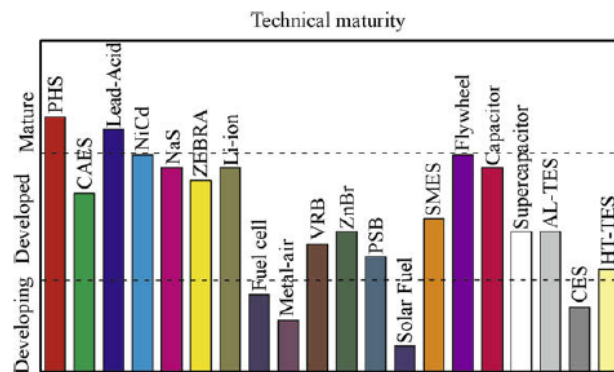


Abbildung 12: Technische Reife der Speichertechnologien [4]

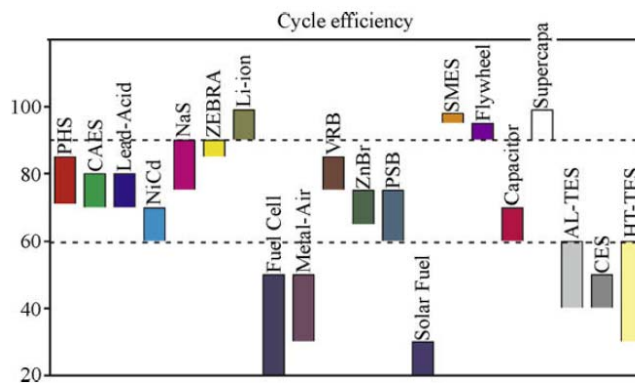


Abbildung 13: Wirkungsgrade der Speichertechnologien (Speicherverluste nicht inbegriffen) [4]

Kosten Bleibatterie:

Nimmt man die Zahlen aus der Abbildung 11 kann so kommt man auf einen Betrag von 13.3 bis 80 \$/kWh (12 – 72 CHF/kWh).

4 Vergleich der Technologien

Der Vergleich der thermischen Energiespeicher führt zum Schluss, dass der sensible Speicher heute die günstigste und auch zuverlässigste Technologie zur saisonalen Speicherung von Wärme ist (siehe Tab 2). Der latente Speicher hat ein grosses Potential, sowohl von der Energiedichte als auch preislich. Um die Energieverluste bei langer Lagerung zu minimieren, kann der PCM zudem unterkühlt werden. Im Gegensatz zu der Sorption liefert das PCM auch über lange Zeit Wärme bei konstanter Temperatur. Technisch ist es allerdings noch nicht gelungen, die Zyklrierbarkeit mit einem vernünftigen Aufwand zu beherrschen und damit grössere Versuchsanlagen zu betreiben. Da das PCM eine geringe Wärmeleitung aufweist, sind auch die abrufbaren Leistungen gering bzw. es müssen aufwändig wärmeleitende Materialien eingebaut werden.

Einige wenig Sorptionsspeicher wurden als Versuchsanlagen bereits gebaut, jedoch nicht als vollwertige saisonale Speicher. Mit Zeolith wie auch mit Silikagelen konnte gezeigt werden, dass diese Technologie im Prinzip funktioniert. Die Sorptions- wie Desorptionstemperaturen liegen bei Zeolithen deutlich höher als bei Silikagel und machen vor allem letztere für die Kombination mit solarthermischen Anlagen interessant. Eine Möglichkeit bestehe auch darin, Zeolith mit industrieller Abwärme zu trocknen und dann an die "Endverbraucher" zu verteilen.

Das Technologiescreening für die saisonale Speicherung von elektrischer Energie hat die altbekannte Bleibatterie neu entdeckt. In der Kombination der Beschaffungskosten, Wirkungsgrade und die Zuverlässigkeit können andere Batterietypen "noch" nicht mithalten. Das grösste Potential, um die Anforderungen der saisonalen Speicherung elektrischer Energie zu erfüllen, geht von der Metall-Luft Batterie aus. Die Entwicklung befindet sich allerdings noch in den Kinderschuhen und eine breite Anwendung ist in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.

Speichertechnologie	Energiedichte praktisch [kWh/m ³]	Energiedichte theoretisch [kWh/m ³]	Kosten in CHF pro kWh	Speicher- verluste	Entwicklungs- stand
Sensibel	60 - 80	60 - 80	2.6 - 4	gering	Auf dem Markt erhältlich
Latent	-	200 - 285	-	gering	In Entwicklung
Sorption	115 - 130	177	4 - 4.7	keine	Pilotanlagen in Betrieb
Blei Batterie	50 - 80	-	12 - 72	0.1%- 0.3%/Tag	Marktreife

Tab 2: Vergleich saisonaler Energiespeicher nach ausgewählten Charakteristiken

5 Literaturverzeichnis

- [1]: Zeolithspeicher: Zeolithspeicher in der thermischen Solartechnik: Machbarkeit und Potential
Paul Gantenbein, Ueli Frei
Institut für Solartechnik SPF Hochschule Rapperswil
Schlussbericht März 2000
www.bfe.admin.ch/forschungsolarwaerme/02213
- [2]: Offene Adsorptionsspeicher mit Zeolith
Andreas Hauer
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
Gleisdorf Solar 2000
http://www.zae-bayern.de/fileadmin/web_data/import-redaxo/zeo_absorp.pdf
- [3]: Materialwissenschaftliche Untersuchung an zeolithischen Adsorbentien für den Einsatz in offenen Sorptionssystemen zur Wärmespeicherung
Johann Georg Christoph Storch
Dissertation 2010
<https://mediatum.ub.tum.de/doc/820976/820976.pdf>
- [4]: Progress in electrical energy storage system: A critical review
Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong
ScienceDirect April 2008
www.sciencedirect.com
- [5]: Wärmespeicherung mit PCMs: Grundlagen und Markterfordernisse
Wolfgang Voigt
Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie
http://gizef.de/sites/default/files/files/Wolfgang_Voigt.pdf
- [6]: Wärmespeicherung mit Phasenwechsel- und Sorptionsmaterialien – Arbeiten am ISE
Dr.-Ing. Peter Schossig
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Innovationsforum „Thermische Energiespeicher“ Mai 2010
http://gizef.de/sites/default/files/files/Peter_Schossig.pdf
- [7]: Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heisswasser – Wärmespeicher
T. Schmidt, M. Brenner, W. Heidmann, H. Müller-Steinhagen
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Universität Stuttgart Februar 2003
http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen_03-01.pdf
- [8]: Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung
Dirk Mangold, Oliver Miedaner
Steinbeis Forschungsinstitut für solare zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Forschungsbericht 2012
http://www.solites.de/download/literatur/Solites_Technisch-wirtschaftliche%20Analyse%20und%20Weiterentwicklung%20der%20solaren%20Langzeit-W%C3%A4rmespeicherung_Forschungsbericht_FKZ%200329607N_2012.pdf
- [9]: Die Energiewende ist eine Speicherfrage

-
- Josef Jenni
Jenni Energietechnik AG
Stellungnahme Juni 2014
http://www.jenni.ch/pdf/Energiewende_Speicherfrage.pdf
- [10]: Latentwärmespeicherung: „Neue Materialien und Materialkonzepte“
Harald Mehling
ZAE Bayern, Abteilung „Energieumwandlung und –speicherung“
Workshop 2001
http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2001-2/ws2001-2_05.pdf
- [11]: Latentwärmespeicher – Niedertemperatur Überblick über die Materialklassen und Potentialabschätzung
Dr. Ing. Peter Schossing
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Expertenworkshop Thermische Speicher Juni 2010
http://www.enob.info/fileadmin/media/Veranstaltungen/Dateien/3_Latentspeicher.pdf
- [12]: Saisonale Speichersysteme
http://www.empa-ren.ch/ren/Projekte_P+D/Solargebaeude%20Juni%2003/Text/ST/T-SSP.pdf
- [13]: Solares Wohnen überzeugt“
Jürg Wellstein
HK-Gebeäudetechnik 12/12
http://www.jenni.ch/pdf/News_HK-Geb%C3%A4udetechnik.pdf
- [14]: Preislistet Solarpakete und Energiezentralen
Jenni Energieitechnik AG
http://www.jenni.ch/pdf/Prospekt_Solaranlagen.pdf
- [15]: Thermochemischer Speicher mit Zeolith zum Heizen und Kühlen
Andreas Hauer
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2002_undfrueher/DPG2002_Buch/DPG2002_07Hauer.pdf
- [16]: Sorptionsspeicher – Langzeitspeicherung von Wärme mit hohen Energiedichten
Dipl. Ing. Gottfried Purkarthofer
AEE INTEC Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien
<http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien14.pdf>
- [17]: Sorptionsspeicher: Aufnahme und Inbetriebnahme der Laboranlage
Paul Gantenbein, Stefan Brunold, Ueli Frei
Institut für Solartechnik SPF der Hochschule Rapperswil HSR
Jahresbericht Dezember 2002
www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/stream-file.php%3Ffile%3D000000006613.pdf%26name%3D000000200016+%&cd=6&hl=de&ct=clnk&gl=ch