



Hintergrundinformation Wärme speichern

Inhalt

- Die Notwendigkeit von Speichern
- Grundprinzip der Wärmespeicherung
- Technologien zur Wärmespeicherung im Überblick
- Sensible Wärme: Warmwasserspeicher
- Sensible Wärme: Heißwasser-Wärmespeicher
- Sensible Wärme: Kies-Wasser-Wärmespeicher
- Sensible Wärme: Feststoff- und Fluid-Wärmespeicher
- Sensible Wärme: Aquifer-Wärmespeicher
- Sensible Wärme: Erdsonden-Wärmespeicher
- Latente Wärme: Phasen-Wechselmaterialien (PCM)
- Sorptionsspeicher und chemische Reaktionswärme

Agentur für Erneuerbare Energien e. V.

Reinhardtstr. 18
10117 Berlin
Tel.: 030-200535-3
Fax: 030-200535-51
kontakt@
unendlich-viel-energie.de

Die Erneuerbaren Energien kennen verschiedene Technologien zur Wärmeerzeugung: Solarkollektoren nutzen die Sonnenstrahlung um Wasser zu erwärmen, die Geothermie nutzt hierfür die Erdwärme. Wärme aus Biomasse wird entweder direkt z.B. in Heizkraftwerken erzeugt oder fällt z.B. bei Biogasanlagen als Abwärme von Blockheizkraftwerken mit Kraft-Wärme-Koppelung an. Die Bereitstellung von Raumwärme und -kälte macht rund 30 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. Der Wärmebereich birgt ein großes Einsparpotenzial und kann mittelfristig überwiegend mit Erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Die Bundesregierung hat sich den Ausbau des Anteils Erneuerbarer Energien im Wärmebereich auf 14 % bis 2020 zum Ziel gesetzt. Im Jahr 2008 deckten Erneuerbare Energien 7,4 % des gesamten deutschen Wärmebedarfs. Etwa 1,2 Million Solarthermieranlagen, 150.000 Erdwärmepumpen und 100.000 Holzpelletsheizungen sind in Deutschland 2008 installiert. In rund 170 Anlagen wird Wärme aus Tiefengeothermie produziert. Der Großteil der erneuerbaren Wärme stammt aus den ca. 9 Mio. privaten Kaminöfen und Kachelöfen, in denen Holz verbrannt wird. Hinzu kommen Holzheizungen in der Industrie sowie 1.100 Heizkraftwerke, die mit Holz befeuert werden und rund 4.100 Biogasanlagen.

Die Notwendigkeit von Speichern

So unterschiedlich die Technologien auch sind, sie haben doch eines gemeinsam: ihr Energieangebot kann zeitlich sehr stark schwanken und ist der Energienachfrage oft genau entgegengesetzt (z.B. hohe Sonneneinstrahlung im Sommer und großer Heizbedarf im Winter). Wärme aus Erneuerbaren Energien ist häufig an ihrem Entstehungsort

Schirmherr:
"deutschland hat
unendlich viel energie"
Prof. Dr. Klaus Töpfer

Unterstützer:
Bundesverband
Erneuerbare Energie

Bundesverband
Solarwirtschaft

Bundesverband
WindEnergie

Geothermische
Vereinigung

Bundesverband
Bioenergie

Fachverband Biogas

Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Bundesministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und
Verbraucherschutz



nicht direkt oder effizient nutzbar. Um das enorme Potenzial Erneuerbarer Energien im Wärmebereich in höherem Maße nutzen zu können, bedarf es daher sowohl des Netzausbaus wie auch der Schlüsseltechnologie Wärmespeicher. Denn ein wesentlicher Unterschied zur Stromversorgung besteht darin, dass für die Wärme kein (flächendeckendes) Versorgungsnetz vorhanden ist. Sie muss, wenn sie nicht unmittelbar verbraucht wird, nah ihres Entstehungsortes gespeichert oder zum Abnehmer transportiert werden, z.B. über ein Nahwärmenetz.

Die Kurzzeitspeicherung von Wärme über wenige Tage ist in Privatanlagen bereits marktüblich. Eine Wärmespeicherung über längere Zeiträume (Langzeitspeicherung bzw. saisonale Speicherung über Wochen und Monate) befindet sich noch in der Entwicklungsphase von Pilotprojekten und ist noch nicht flächendeckend etabliert. Langzeitspeicher scheiterten bislang meist an hohen spezifischen Kosten sowie den technischen Herausforderungen ihrer Umsetzung. Ihre Marktreife wird jedoch spätestens im Jahr 2020 erwartet.

Ein steigender Anteil des erzeugten Stroms wird in Deutschland zur Kühlung von Gebäuden verwendet. Hier können mit Erneuerbaren Energien betriebene Systeme und Anlagen oft in Kombination mit der Wärmeerzeugung auch konventionelle Klimaanlage ersetzen.

Grundprinzip der Wärmespeicherung

Für die Speicherung der Wärme ist stets ein bestimmtes **Speichermedium***¹ bzw. ein **Wärmeträger*** nötig, welches die Wärme über längere Zeiträume speichern kann. Im Gegensatz zu seit jeher als Energiespeicher wahrgenommenen Energieträgern wie Holz, Erdöl oder Erdgas wird mittlerweile nach Speichermedien gesucht, welche sich während des Prozesses der Wärmeübertragung stofflich nicht verbrauchen.

Wärmeenergie kann dabei auf drei unterschiedliche Weisen gespeichert werden:

- Speicherung als **sensible Wärme**: hierbei wird die Wärme einem Speichermedium zugeführt, welches entsprechend seine Temperatur „fühlbar“ verändert (meist Wasser).
- Speicherung als **latente Wärme**: hier führt die dem Speichermedium zugeführte Wärme zur Änderung seines Aggregatzustandes (meist von fest zu flüssig), ohne dass sich seine Temperatur dabei ändert (wie beim Eiswürfel im Getränk, wobei die Wärme zum Wechsel des Aggregatzustandes dem Getränk entzogen wird, welches sich dabei abkühlt).

¹ Die mit * gekennzeichneten Begriffe sind im Glossar näher erläutert.



3 / 25

- Speicherung als **chemische Energie**: als bekanntestes Beispiel werden hierbei Energieträger wie Holz, Kohle, Erdgas und Erdöl selbst stofflich verändert (verbrannt) und sind für weitere energetische Prozesse für immer verloren. In mehrfach zu durchlaufenden Kreisläufen wird hingegen thermochemisch Wärme freigesetzt, das Medium dabei jedoch nicht verbraucht.

Bei der Wärmespeicherung ergibt sich somit die Frage nach einem geeigneten Speichermedium mit günstiger **Wärmeleitfähigkeit*** sowie **Wärmekapazität***, welches mit seinen physikalischen wie wirtschaftlichen Eigenschaften dem jeweiligen Anwendungsprofil entsprechen muss.

Von entscheidender Bedeutung sind hierbei der **Temperaturbereich** sowie die erreichbare **Energiedichte*** des Mediums. Hiermit gehen ebenso das **Speichervolumen*** sowie seine **Speicherdauer** (Fähigkeit zur Kurzzeit- oder Langzeitspeicherung) einher.

Von großem Interesse bei der Wärmespeicherbewertung sind die spezifischen **Investitionskosten** einer Speichertechnologie. Diese sind jedoch aufgrund der stark divergierenden Rahmenbedingungen und Gegebenheiten vor Ort variabel und daher wie die (solaren) **Wärmekosten** pro kWh schwer pauschal anzugeben, da sie in hohem Maße von der jeweiligen Anwendung oder dem verbundenen System abhängen.

Erkenntnisse zum **Wirkungsgrad** der Speicher und ihrer **Lebensdauer** sind ebenfalls projektbezogen und ändern sich durch den technologischen Fortschritt rasch bzw. sind noch nicht ermittelt worden. Anstelle des Wirkungsgrades hat sich für solarunterstützte Gesamtsysteme der **solare Deckungsgrad** des gesamten Systems etabliert, welcher sich ebenfalls nur projektbezogen bestimmen lässt und nicht allein von der Speicherleistung abhängig ist. Diese Größen werden hier daher nicht weiter dargestellt.



Technologien zur Wärmespeicherung im Überblick

Die im Folgenden aufgeführten Technologien bieten einen Überblick ohne Anspruch auf eine vollständige Darstellung aller technologischen Möglichkeiten der Speicherung von Wärme aus Erneuerbaren Energien.

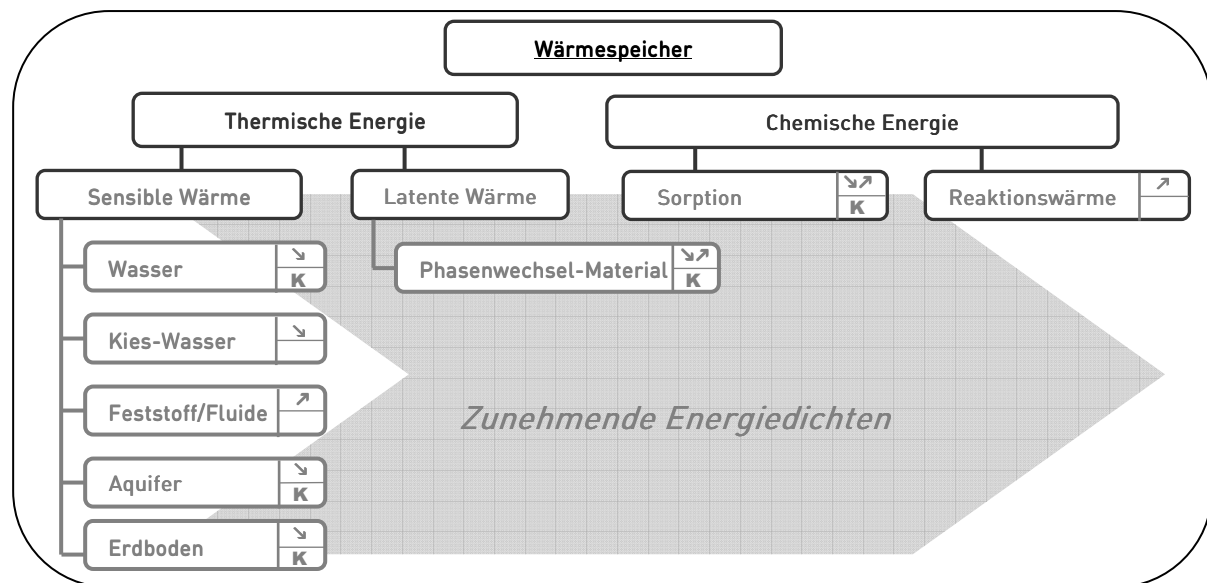


Abb. 1: Betrachtete Wärmespeicher. Quelle: eigene Darstellung.

Legende: ↘ = Niedertemperaturanwendungen (Warmwasser und Heizungsunterstützung bis 100°C); ↗ = Hochtemperaturanwendungen; K = Kältespeicherung

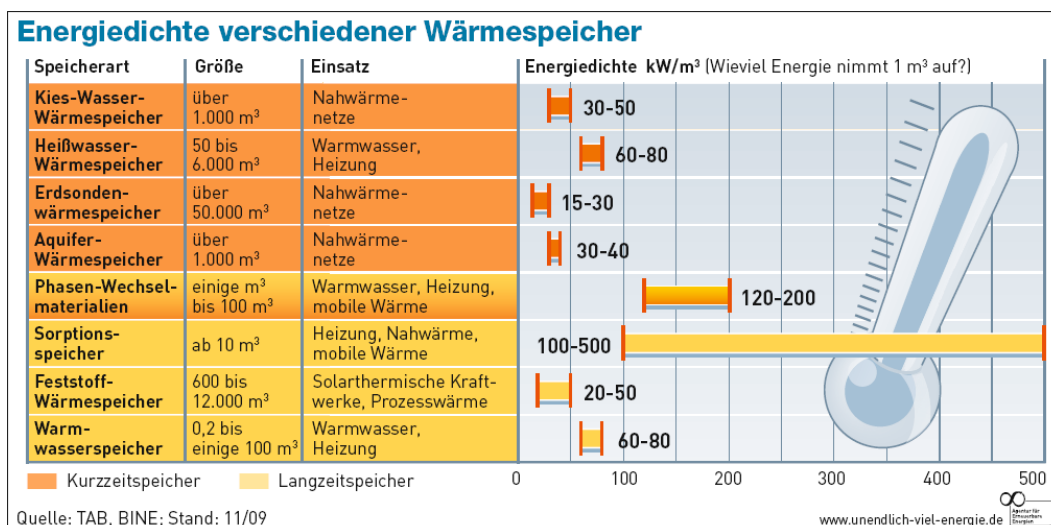


Abb. 2: Energiedichte von Wärmespeichern. Quelle: TAB, BINE, eigene Darstellung

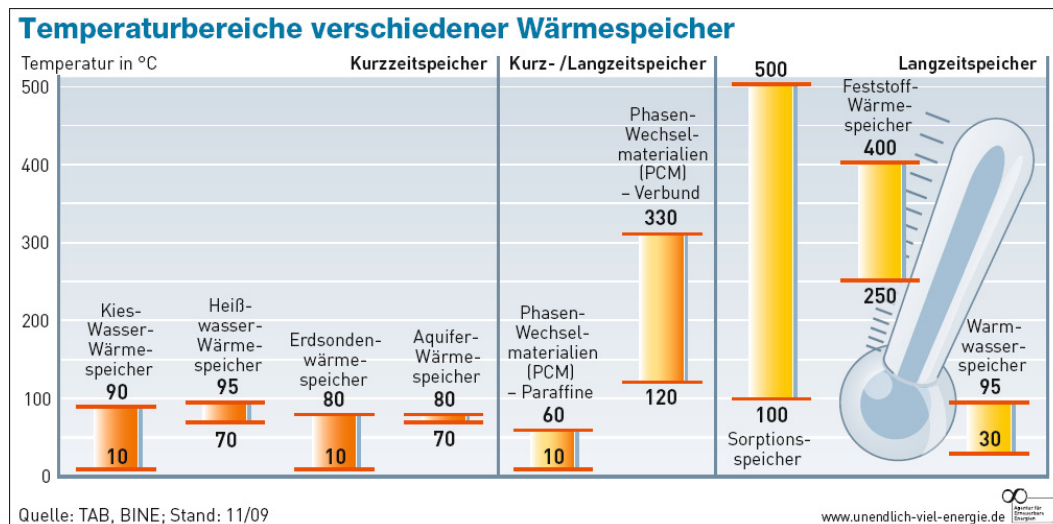


Abb. 3: Temperaturbereiche von Wärmespeichern. Quelle: TAB, BINE, eigene Darstellung

Sensible Wärme: Warmwasserspeicher

Kleine sensible Kurzzeitspeicher (sog. Pufferspeicher) sind insbesondere mit Wasser als Speichermedium auf dem Markt für Heizungsanlagen etabliert. Sie werden zur Wärmebereitstellung (Warmwasser und Heizungsunterstützung) im Gebäudebereich als Bestandteil der privaten Hausheizung eingesetzt. Als Heizquelle des Wasserspeichers können sowohl konventionelle fossile Hausheizungssysteme als auch Erneuerbare Energien dienen. Als Bestandteil von Solaranlagen haben sich Kombispeicher durchgesetzt, bei denen ein zweites Heizungssystem den Solarkreislauf unterstützen kann. Bei der Wärmeversorgung großer Mehrfamilienhäuser oder ganzer Wohnsiedlungen können großvolumige Pufferspeicher eingebunden werden, welche die Wärme ebenfalls für einige Tage zwischenspeichern. Durch den Einsatz eines Pufferspeichers wird das Betriebsverhalten der gesamten Heizungsanlage verbessert, da es effizienter ist, die Heizung aus dem erhitzten Speicher zu speisen, als den Brenner im Dauerbetrieb zu halten.

Bei den sensiblen Wärmespeichern verändert das Speichermedium (hier das Wasser) bei Wärmezufuhr seine „fühlbare Temperatur“. Während des Ladevorganges wird dem entsprechenden Speichermedium direkt oder indirekt über einen Wärmetauscher Wärme zugeführt. Das Speichermedium erhöht daraufhin seine Temperatur. Wird der Speicher wieder entladen, gibt es die gespeicherte Energie wieder ab und kühlt aus.



Bei der Wärmespeicherung müssen das richtige Speichermedium gewählt sowie Wärmeverluste vermieden werden. Dies ist zu erreichen durch z.B. eine niedrige Wärmedurchlässigkeit der Materialien, eine effektive Wärmedämmung sowie ein möglichst kleines Verhältnis der Außenfläche zum Volumen des Speichers. In der Praxis haben sich aufgrund des leichteren Transportes sowie einer thermischen Schichtung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zylindrische Formen für Pufferspeicher durchgesetzt.

Als Speichermedium ist Wasser kostengünstig und leicht verfügbar. Die gängigen Anlagen bieten zudem eine lange Lebensdauer und sind verhältnismäßig unkompliziert. Ungünstig wirken sich jedoch die relativ hohen Wärmeverluste durch den Wärmestrom zum umgebenden kälteren Ort aus. Entsprechend dicke Wärmedämmungen des Warmwasserspeichers sind notwendig. Kleinere Speicher der privaten Heizungsanlage werden daher auch nur als Kurzzeitspeicher eingesetzt. Eine effizientere Speicherung über Wochen oder Monate ist nur mit größeren Anlagen erreichbar. Die Technologie für Niedertemperatur-Speicher auf Wasserbasis ist weitgehend ausgereift. Die Wärmeversorgung durch Einzelanlagen soll zukünftig jedoch abnehmen. Bis 2050 wird eine Abnahme von 88 % Anteil der Einzelanlagen im Jahr 2008 auf nur noch 35 % prognostiziert. Die Wärmebereitstellung wird folglich hauptsächlich durch netzgebundene (Nah-)Wärmeversorgung erfolgen.

Wasserspeicher als Kältespeicher

Analog zur Wärmespeicherung haben auch die Anwendungsgebiete der Kältespeicherung unterschiedliche Temperaturanforderungen an die jeweiligen Kühlprozesse. So liegen die Kühltemperaturen für die Gebäudeklimatisierung üblicherweise zwischen 6-15°C, in anderen Bereichen oft noch höher. Die Wahl des Speicher- bzw. Systemkonzepts hängt auch bei der Kältespeicherung zum einen von den Bedingungen am Standort und zum anderen von den verschiedenen Randbedingungen auf der Bedarfsseite ab. Bei der

reinen Kältespeicherung dient nicht der Warmwasserspeicher als Vorbild, da sich im Warmwasserspeicher das Wasser entsprechend seiner Dichte schichtet. Bei Temperaturen von 5-13°C sind die Dichteunterschiede bereits zu gering für eine thermische Schichtung. Größere Behälter zur Kältespeicherung sind z.B. aus Stahlblechsegmenten hergestellt und mit einer Schicht aus Kunstkautschuk und Polystyrol verkleidet. Bei der Beladung des Speichers ist darauf zu achten, dass keine Wasserdurchmischung stattfindet,

| Warmwasserspeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 60-80 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Wasser (30-95°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 0,6 W/m K (D.h.: Bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin können innerhalb einer Sekunde 0,6 Watt Wärmeenergie durch einen Meter des Speichermediums Wasser wandern.) |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Warmwasser & Heizungsunterstützung |
| Stand der Technik | Speicher für private Kleinanlagen ausgereift; Pilotprojekte für Nahwärmanlagen |
| Speichervolumen | Private Anlagen: 0,2 – 100 m ³ Nahwärmespeicher: mehrere 100 m ³ |
| Speicherdauer | Kurzzeitspeicher |



7 / 25

d.h. das hereinströmende Wasser sollte das Wasser, das sich bereits im Speicher findet, lediglich vor sich herschieben, ohne Verwirbelungen zu verursachen.

Sensible Wärme: Heißwasser-Wärmespeicher

Zu den Wärmespeichern der saisonalen Speicherung gehören in Deutschland neben Heißwasser- auch Kies-Wasser-, Erdsonden- und Aquiferwärmespeicher sowie Mischformen aus diesen. Diese Langzeitspeicher nehmen überschüssige Wärme im Sommer auf, um sie im Winter wieder abzugeben. Sie werden vor allem genutzt, um Wärme von solarthermischen Anlagen für Nahwärmenetze zu speichern. Diese Systeme arbeiten mit einer Mindestanzahl von 200-250 Wohneinheiten bzw. ab einer Zahl von 100-120 Einfamilienhäusern.

Wenn thermische Energie über Wochen oder Monate gespeichert werden soll, muss der Wärmeverlust gering bleiben. Kleinere Wasserspeicher sind hierfür aufgrund des Verhältnisses ihres Volumens zu ihrer Oberfläche nicht geeignet. Der Heißwasser-Wärmespeicher ist der aus thermischer und konstruktiver Sicht am vielseitigsten einsetzbare Speichertyp. Allerdings bedarf es bei Speichern dieser Größenordnung stets eines gewissen Platzbedarfes, der gerade in dicht besiedelten Bereichen nicht unterschätzt werden sollte.

Diese Art von Wärmespeichern können ober- und unterirdisch sowie gebäudeintegriert aufgestellt werden. Meist werden sie z.T. unterirdisch (kälterer Teil) bzw. als Erdhügel (wärmerer Teil) angelegt. Sie können gleichzeitig als Landschaftsgestaltendes Element (z.B. als Rodelhügel) dienen. Für den Speicher selbst wird mittlerweile als Ersatz für die Auskleidung mit Edelstahlblech ein wasserdichter Spezialbeton (Stahlbeton) verwendet. Der untere kältere Teil wird z.T. ohne Dämmung in den Boden eingelassen. Die außen liegende Dämmung des oberen Teils besteht je nach Temperaturbereich aus Glas- oder Mineralfasern, Schaumglas sowie Blähglasgranulat. Ist der Dämmstoff ausreichend druckfest, kann er auch unter dem Speicher montiert werden. Das benötigte Volumen für saisonale Wärmespeicher in Kombination mit solarthermischen Anlagen muss abhängig von den jeweiligen Randbedingungen wie Wärmebedarf, solarem Deckungsanteil, Speichertyp und -geometrie, usw. bestimmt werden.



Als neues Material und ebenfalls als Ersatz für die Edelstahlauskleidung wie für die Betonkonstruktion kommen glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) in Frage. Dieser Verbundstoff scheint bis zu einem Speichervolumen von etwa 6.000 m³ geeignet zu sein.

| Heißwasser-Wärmespeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 60-80 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Wasser (70-95°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 0,6 W/m K |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Warmwasser & Heizungsunterstützung |
| Stand der Technik | Pilotprojekte |
| Speichervolumen | ab mehrere 1000 m ³ ; glasfaserverstärkte Kunststoffe: 50-6.000m ³ |
| Speicherdauer | Langzeitspeicher |

Werden Langzeitspeicher zur Unterstützung der solaren Nahwärmeversorgung eingesetzt, liegt das Ziel bei einer solaren Deckungsrate von 50-60 % am Gesamtwärmebedarf. Aus wirtschaftlichen Gründen lohnt sich eine derartige Anlage erst ab einer Größe von ca. 100 Wohneinheiten zu je rund 70 m². Die Kosten eines Langzeit-Wärmespeichers hängen vor allem von der Bauart, der Abdichtung und zudem stark vom Speichervolumen und vom Standort ab. So konnte der rund 10.000 m³ große Erdbeckenspeicher in Friedrichshafen mit rund 100 Euro/m³ realisiert werden, für den kleineren Erdbeckenspeicher in Rottweil (knapp 1.000 m³ groß) mussten hingegen 450 Euro/m³ investiert werden.

Marktchancen sehen Forscher und Entwickler vor allem für Speicher mit einem Inhalt von 100 bis 1.000 Kubikmetern, die künftig als Tages-, Wochen- oder Monatsspeicher an Bedeutung gewinnen können. Auch eine Kombination aus Lang- und Kurzzeitspeicher zu einem Hybridspeicher ist für viele Anwendungen sinnvoll. GFK-Speicher versprechen im Vergleich zu anderen Großspeichern günstigere Wärmepreise, welche bislang jedoch noch nicht realisiert werden konnten.

Trotz der fortgeschrittenen Entwicklung sind Langzeitwärmespeicher größtenteils noch immer Forschungs- und Pilotprojekte. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Langzeitwärmespeicher bleibt somit bestehen. Die meisten technischen Lösungen bedürfen weiterer Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen.

In München ist 2007 in der Wohnsiedlung „Am Ackermannbogen“ ein System zur solaren Nahwärmeversorgung in Betrieb gegangen. Der Heißwasserspeicher, welcher zukünftig 13 Wohngebäude mit 320 Wohnungen versorgen soll, fasst rund 6.000 m³ und besitzt eine Speicherkapazität von 1,15 Mio. kWh. Das System für rund eine Million Euro erreicht mit rund 2.900 m² Sonnenkollektorfläche bislang einen solaren Deckungsanteil von 47 %. Die restliche Wärmeenergie liefern die Stadtwerke als Fernwärme.

Obwohl die Investitionskosten sehr hoch erscheinen mögen, sind doch die spezifischen Kosten und die Wärmeverluste der solaren Nahwärmeversorgung erheblich geringer als



diejenigen von solarthermischen Einzelanlagen mit kleinen Warmwasserspeichern. Der Zusammenschluss von solarthermischen Anlagen in Nahwärmenetzen mit einem größeren Heißwasserspeicher zahlt sich somit aus.

Sensible Wärme: Kies-Wasser-Wärmespeicher

Bis zu einer Temperatur von 100°C wird für die Langzeitspeicherung auch Kies bzw. Erdreich oder Sand als Speichermedium verwendet. Das Speichermedium besteht hierbei aus einem Gemisch aus Kies bzw. Erdreich und Wasser. Der Kies-Anteil beträgt dabei ca. 60-70 %.

Die Kies-Wasser-Wärmespeicher bieten durch ihren Aufbau eine kostengünstige Alternative zu den relativ aufwändigen Betonkonstruktionen der Heißwasser-Wärmespeicher. Ein Vorteil ergibt sich auch dadurch, wenn am Speicherort Kies im Untergrund vorliegt und in gereinigtem Zustand als Speichermedium eingebaut werden kann.

Allerdings ist die Wärmekapazität von Kies geringer als die von Wasser, d.h. Kies erwärmt sich als Speichermedium je Einheit aufgenommene Wärmemenge auch selbst stärker als Wasser. Das führt bei Kies zu potenziell höheren Wärmeverlusten. Ein Kies-Wasser-Speicher

müsste im Verhältnis zu einem Wasserspeicher doppelt so groß sein, um dieselbe Wärmemenge speichern und wieder abgeben zu können. Soll jedoch der Bereich über dem Speicher bebaut werden, ist er die sinnvollere Alternative, da Kies im Gegensatz zu einem geschlossenen Wasserspeicher von sich aus schon sehr stabil und belastbar ist.

Für den Speicher wird meist eine pyramidenförmige Grube ausgehoben, wasserdicht mit Kunststoffolie ausgekleidet und mit dem Kies-Wasser-Gemisch gefüllt. Eine tragende Deckenkonstruktion ist nicht erforderlich. Bei Kies-Wasser-Speichern können Technologien mit direkter und indirekter Wärmeaufnahme unterschieden werden. Die Wärmeentnahme geschieht am häufigsten indirekt über eingelegte Kunststoff-Rohrschlangen. Die Wärmeentnahme kann aber auch durch direkten Wasseraustausch erfolgen: hierbei ist es wie bei den gängigen Pufferspeichern wichtig, eine Durchmischung des kälteren und des wärmeren Wassers bei der Be- oder Entladung zu verhindern.

In Eggenstein-Leopoldshafen erfolgte die Integration des Speichers bereits in der Planungsphase (2004) der energetischen Sanierung eines typischen Schul- und Sportzent-

| Kies-Wasser-Wärmespeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 30-50 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Kies-Wasser-Gemisch (max. 90°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 2,4 W/m K |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Nahwärmenetze, Warmwasser & Heizungsunterstützung für Gebäudekomplexe |
| Stand der Technik | Pilotprojekte |
| Speichervolumen | ab mehrere tausend Kubikmeter |
| Speicherdauer | Langzeitspeicher |



10 / 25

rums der 1960er Jahre. Der Speicher umfasst rund 4.500 m³ und speichert im Sommer die Überschusswärme von 1.600 m² Sonnenkollektorfläche. Das System für rund 550.000 Euro wurde in drei Monaten realisiert und wird erfolgreich durch eine Wärmepumpe unterstützt.

Kies-Wasser- bzw. Erdreich-Wärmespeicher sind gegenüber den Heißwasser-Wärmespeichern vorzuziehen, wenn statische Gründe im Vordergrund stehen (z.B. eine Straße oder Parkplatz über dem Speicher errichtet werden sollen), welche im Falle des Heißwasser-Wärmespeichers meist erheblich höheren technischen und finanziellen Aufwand bedeuten.

Sensible Wärme: Feststoff- und Fluid-Wärmespeicher

Neben Wasser und dem Erdreich können auch weitere feste sowie flüssige Speichermedien zur sensiblen Wärmespeicherung verwendet werden. Als Feststoff-Wärmespeicher wird vor allem Hochtemperatur-Beton in Betracht gezogen. Auch die Wärmespeicherung in Keramik ist möglich. Für Fluid-Speicher kommen etwa Flüssigsalze in Frage. Feststoffspeicher sind noch nicht kommerziell verfügbar, werden jedoch bereits praxisnah erprobt. Für Fluidspeicher liegen bereits umfangreiche Betriebserfahrungen im konventionellen Bereich vor. Die auch Salzschnmelzen genannten Speicher werden seit rund 60 Jahren in verschiedenen Industriezweigen für die Bereitstellung industrieller Prozesswärme eingesetzt, z. B. bei der Galvanisierung.

Feststoff- und Fluid-Wärmespeicher können die Wirtschaftlichkeit von solarthermischen Kraftwerken entscheidend verbessern. Solarthermische Kraftwerke bündeln das Sonnenlicht z.B. mittels verspiegelter Parabolrinnen auf ein Rohr, in dem ein Thermoöl als Wärmeträger zirkuliert. Der entstehende Dampf treibt eine Turbine und damit einen Generator zur Stromerzeugung an. Weltweit sind im so genannten Sonnengürtel, d.h. in Gebieten mit über 1.700 kWh Sonneneinstrahlung pro Quadratmeter und Jahr, ca. 30 solarthermische Kraftwerke mit rund 480 MW Leistung im Jahr 2008 in Betrieb. Ein starker Ausbau ist in den kommenden Jahren zu erwarten: 2009 sind solarthermische Kraftwerke mit ca. 500 MW Leistung in Bau und zusätzlich ca. 8.000 MW in Planung.



Ein Fluid-Wärmespeicher mit bis zu 375.000 kWh Wärme wird seit 2008 im kommerziellen Betrieb des solarthermischen Parabolrinnen-Kraftwerk Andasol I (50 Megawatt installierte Leistung) in Südspanien genutzt. Das Kraftwerk ist so ausgelegt, dass tagsüber

ein Wärmeüberschuss anfällt, der in zwei oberirdischen Tanks mit 28.500 Tonnen Flüssigsalz gespeichert wird. Der Wärmespeicher arbeitet mit einem Flüssigsalzgemisch aus 60 % Natriumnitrat und 40 % Kaliumnitrat als Speichermedium. Beide Stoffe sind kostengünstig in großen Mengen verfügbar. Das Salz erhitzt sich von 280°C auf bis zu 390°C und gibt die gespeicherte Wärme über einen Wärmetauscher wieder als Dampf ab, so dass die Turbine auch nach Sonnenuntergang zusätzlich 7 Stunden Strom erzeugen kann.

Hochtemperatur-Betonspeicher sind von Stahlrohrleitungen durchzogen, durch die ein spezielles Öl zirkuliert. Dieses überträgt die zuvor aufgenommene Wärme an den Beton, welcher sich auf bis zu 400°C erhitzt und diese Wärme mehrere Stunden speichern kann.

Soll der Speicher wieder entladen werden, wird erwärmtes Öl abgeleitet und kaltes Öl erneut in den Betonblock geleitet, welches sich dann wieder erwärmt. Beton gilt im Vergleich zur Speicherung in Flüssigsalzen als das preiswertere Material. Für Fluidspeicher mit Flüssigsalzen liegen die Investitionskosten bei etwa 30-40 Euro/kWh, bei Hochtemperaturbeton liegen sie bei ca. 15-20 Euro/kWh. Von den Investitionskosten entfallen etwa 40 % auf den Speicherbeton und etwa 50 % auf das Rohrsystem, das die Wärme überträgt. Bei den verwendeten Ölen sind durch ihre chemischen Eigenschaften spezielle Sicherheits- und Umweltaspekte zu beachten.

Solarthermische Kraftwerke wie z.B. Andasol I können mit der örtlichen Sonneneinstrahlung rund 6 Stunden täglich Strom erzeugen. Die Netzintegration des Kraftwerkes wird durch den integrierten Speicher vereinfacht, da Schwankungen in der Einspeisung reduziert werden. Stromproduktion und Nachfrage werden optimal aufeinander abgestimmt. Die Kosten der solarthermischen Stromproduktion können insgesamt reduziert werden. Für größere solarthermische Kraftwerke mit mehreren 100 Megawatt Leistung könnten Feststoff-Wärmespeicher modular vergrößert und ergänzt werden. Ziel von Entwicklungsmaßnahmen sind kostengünstige Feststoff-Wärmespeicher für solarthermische Kraftwerke und industrielle Prozesswärme mit spezifischen Investitionskosten von unter 20 Euro/kWh.

| Feststoff-Wärmespeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 20-50 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Hochtemperatur-Beton (120-1.000°C theoretisch; 250-400°C praktisch) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 2,1 W/m K (Normalbeton) |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Solarthermische Kraftwerke; Prozesswärme für die Industrie |
| Stand der Technik | Pilotprojekte (bis einige 100 kW) |
| Speichervolumen | 600 – 12.000 m ³ |
| Speicherdauer | Kurzzeitspeicher |



Es besteht bereits ein Prototyp eines Beton-Feststoffspeichers in Stuttgart mit einer Speicherkapazität von theoretisch 700 (bislang 400) kWh, was etwa dem 15-fachen eines normalen Heißwasserspeichers in einem Einfamilienhaus entspricht.

Sensible Wärme: Aquifer-Wärmespeicher

Wärme kann auch unterirdisch direkt im oberflächennahen Erdreich bzw. in Wasser führenden Gesteinsformationen gespeichert werden. Das Wärmespeichermedium ist dann von keinem eigens hierfür konstruierten Behälter umgeben, d.h. es gibt keine Wärmedämmung, die vor entsprechenden Wärmeverlusten schützt. Da die Wärmeverluste mit zunehmenden eingespeicherten Wärmemengen ebenfalls steigen, lässt sich Wärme in Gesteinsformationen am effizientesten auf niedrigem Temperaturniveau speichern.

Bei Aquiferen handelt es sich um natürlich vorkommende, abgeschlossene Gesteinsformationen, die in bis zu einigen hundert Metern Tiefe Grundwasser führen. Oberflächennahe Aquifere sind häufig der Trinkwasserversorgung vorbehalten, weshalb für die Wärmespeicherung eher auf Schichten in mehr als 100 Meter Tiefe zurückgegriffen wird. Die

| Aquifer-Wärmespeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 30-40 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Grundwasser, wassergesättigte Formation im Untergrund (um 75°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 0,6 W/m K (Wasser) |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Nahwärmenetze, Warmwasser & Heizungsunterstützung für Gebäudekomplexe, Klimatisierung |
| Stand der Technik | seit 20 Jahren markterprobt |
| Speichervolumen | ab mehrere tausend Kubikmeter |
| Speicherdauer | Langzeitspeicher |

Nutzung von Aquiferen zur Wärmespeicherung erfolgt seit ca. 20 Jahren. Vorreiter dieser Technologie sind Skandinavien, Belgien und die Niederlande. Wirtschaftlich tragfähig und sinnvoll ist diese Form der Wärmespeicherung erst für große Speichervolumina (ab ca. 100.000 m³). Für die Wärmespeicherung von Einfamilienhäusern kommen Aquifere als Wärmespeicher daher nicht in Frage.

Um die Wärme im Grundwasser zu speichern, wird über eine „kalte Bohrung“ Grundwasser entnommen, welches oberirdisch durch Wärme aus z.B. solarthermischen Anlagen erwärmt wird. Über eine zweite „warme Boh-

rung“, welche den gleichen Grundwasserleiter erschließt, wird das erwärmte Wasser wieder in das Aquifer injiziert.

Infolge der Wärmeeinspeisung kommt es an der warmen Bohrung zur Ausbildung einer „Wärmeblase“. Diese wird bei der Ausspeicherung (im Winter) wieder abgefördert, indem die Strömungsrichtung umgekehrt wird. Dies erfolgt über Pumpen, mit denen beide Boh-



13 / 25

lungen ausgestattet sind und das Durchströmen der Anlage in beide Richtungen erlauben.

Kalte und warme Bohrung werden im Abstand von 50-300 m errichtet, um eine gegenseitige Beeinflussung beider Bereiche zu verhindern. Durch die Nutzung des Grundwassers als Wärmespeicher kann dieses thermisch und chemisch beeinflusst werden. Daher ist für die Genehmigung eines Aquifers als Wärmespeicher eine Reihe von rechtlichen Anforderungen vorhanden, die u.a. eine umfassende Untergrunderkundung fordert.

Aquifere benötigen einige Jahre, bis sie einen wirtschaftlichen Zustand erreicht haben (einen sogenannten eingeschwungenen Zustand), was auf das Fehlen einer zusätzlichen Wärmedämmung um den Grundwasserbereich herum zurückzuführen ist. Daher sind die Wärmeverluste von Aquifer-Wärmespeichern auch besonders hoch. Ihr Volumen muss ca. 2- bis 3-mal so groß wie ein Heißwasser-Wärmespeicher sein, um dieselbe Wärmemenge speichern und wieder abgeben zu können.

Wenn der Aquiferspeicher von der Wärmespeicherung zur Wärmeentnahme wechselt, verhält er sich sehr träge. Einen schnellen Wechsel von Wärmeangebot zu Wärmenachfrage (z.B. zwischen Tag und Nacht) kann er daher nicht bedienen.

Aquiferspeicher als Kältespeicher

Für die meisten Klimatisierungszwecke reicht ein Temperaturniveau von 6-15°C aus. Aquiferspeicher können diesen Bereich problemlos abdecken. Mit dem Speichermedium Wasser ist damit allerdings auch die untere Temperaturgrenze erreicht.

Ein erfolgreiches System eines Aquiferspeichers, der sowohl zur Wärme- als auch zur Kältespeicherung genutzt wird, befindet sich direkt im Herzen Berlins unter dem Reichstag. Im Zentrum des „Energiekonzepts Spreebogen“ steht die Eigenerzeugung von Strom in zwei mit Biodiesel betriebenen Blockheizkraftwerken. Ihre Abwärme dient im Winter Heizzwecken und im Sommer dem Antrieb von Kältemaschinen. Für die Überschusswärme sind zwei separate Aquifer-Wärmespeicher mit dem Nahwärmenetz der Parlamentsgebäude verbunden. Im oberen Aquifer wird im Winter Kälte, im unteren Aquifer im Sommer Wärme eingespeichert. Mit dem „Energiekonzept Spreebogen“ können rund 90 % der jährlich erforderlichen Heizwärme von Reichstagsgebäude, Bundeskanzleramt und benachbarten Parlamentsgebäuden gedeckt werden. Zudem kann durch den Kältespeicher sowie die Wärme-Kälte-Kopplung der eingesetzten Kältemaschinen 60 % des sommerlichen Kühlbedarfs erbracht werden. Ein Blockheizkraftwerk deckt 82 % des Strombedarfes.

Aquiferspeicher amortisieren sich bereits relativ schnell innerhalb von 2-5 Jahren. Allerdings werden für sie entsprechende Voruntersuchungen des Untergrundes sowie z.T. recht komplexe und zeitaufwändige Genehmigungen benötigt. Zudem wird in Deutschland ihre Anwendung durch die recht eingegrenzte Standortauswahl limitiert.



Sensible Wärme: Erdsonden-Wärmespeicher

Die natürliche, in der Erde vorhandene Erdwärme wird in Deutschland bereits mit Erdwärmepumpen für die Wärmeerzeugung entnommen. Dazu werden Erdsonden genutzt. Die Wärmeübertragung erfolgt bei Erdsonden meist über U-förmige Rohre aus Kunststoff in Bohrlöchern, welche vertikal oder leicht geneigt in den Erdboden eingelassen werden. Mit dieser Technik kann nicht nur die natürliche Erdwärme „angezapft“ werden, sondern auch umgekehrt Wärme aus anderen Quellen direkt im trockenen oberflächennahen Erdreich eingespeichert werden. Die Erdsonden-Wärmespeicherung erschließt damit das oberflächennahe Erdreich bzw. Gesteinsschichten in Tiefen von 20 bis 100 Metern als Speichermedien.

Häufig werden z.B. Überschüsse solarthermischer Anlagen in Erdsonden-Wärmespeicher eingespeist. Werden mehrere Erdsonden zu einem so genannten Sondenfeld zusammengeschlossen, lässt sich die Wärme so auch für umfassendere Heizleistungen,

z.B. eines ganzen Wohngebietes, über Wochen und Monate im Erdreich speichern.

Erdwärmesonden sind vor allem in Untergründen mit einer hohen Wärmekapazität und Dichtheit sinnvoll, z.B. wassergesättigte Tonschichten und -gestein. Nur in diesen Untergründen gibt es kaum Grundwasserbewegungen, die Wärmeverluste verursachen würden. Es werden zwei Bohrlöcher angelegt, die ca. 20 bis 100 Meter tief sind und einen Durchmesser von ca. 0,1-0,2 Meter haben bei einem Abstand zueinander von 1,5 bis 3 Metern. In den Erdsonden zirkuliert z.B. ein Wasser-Glykol-Gemisch oder Ammoniak. Diese Flüssigkeiten nehmen die Wärme vom Erdreich auf bzw. geben sie an das Erdreich ab. Sie tolerieren auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt.

Erdsonden-Wärmespeicher weisen einen relativ hohen Fixkostenanteil bei vergleichsweise geringen Betriebskosten auf. Für eine effiziente Langzeitspeicherung sind bei Erdsondenspeichern Speichervolumina von mehr als 50.000 m³ sinnvoll.

Vergleichbar mit den Aquiferen, weisen auch Erdsondenspeicher durch die träge Wärmeleitung deutlich längere Zugriffszeiten als Heißwasser-Wärmespeicher auf. Ihr Volumen muss ca. 3- bis 5-mal so groß wie ein Heißwasser-Wärmespeicher sein, um dieselbe Wärmemenge speichern und wieder abgeben zu können. Das System kann sinnvoll durch einen Pufferspeicher ergänzt werden und ist somit flexibel erweiterbar.

Erdsondenspeicher haben sich als vielseitige Großspeicher neben Aquiferspeichern bewährt. In Crailsheim ist seit 2007 ein Erdsonden-Wärmespeicher realisiert worden, der

| Erdsonden-Wärmespeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 15-30 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Erdreich/Formation im Untergrund (max. 80°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | Boden 2,5 W/m K; Verfüllung 0,8 bis 2-2,5 W/m K (optimiert) |
| Anwendungsbe- reich/Einsatzgebiet | Nahwärmenetze |
| Stand der Technik | als Sondenfeld Pilotprojekte vorhanden |
| Speichervolumen | über 50.000m ³ |
| Speicherdauer | Langzeitspeicher |



15 / 25

von solarthermischen Anlagen gespeist und von Erdwärmepumpen unterstützt wird. Der eine Teil des Systems besteht aus 400 m² Sonnenkollektoren und einem 100 m³ Pufferspeicher, der zweite Teil aus 7.500 m² Kollektoren, einem 480 m³ Pufferspeicher und rund 100 Erdsonden mit einem Gesamtvolumen von rund 40.000 m³, mit denen 260 Wohnungen, eine Schule und eine Sporthalle versorgt werden. Ergänzt durch zwei Wärmepumpen, kann mit diesem System bislang ein solarer Deckungsanteil des Wärmebedarfs von 50 % erreicht werden.

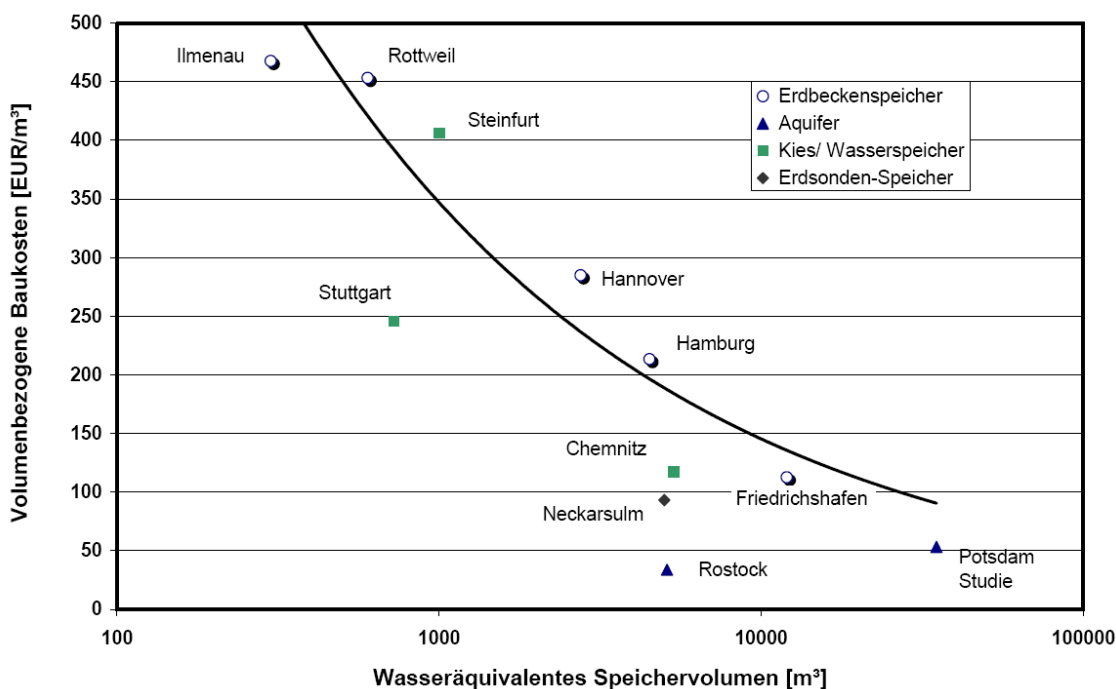


Abb. 4: Investitionskosten realisierter Langzeitwärmespeicher. Quelle: Institut für Gebäude- und Solartechnik, Braunschweig.

Erdsonden als Kältespeicher

Bei der Kältespeicherung im Erdreich können theoretisch sogar Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes erreicht werden. Die Effizienz dieser Systeme steigt jedoch mit höherer Kühltemperatur bzw. der Kombination mit einer Erdwärmepumpe. Systeme zur Einspeicherung von Kälte (bzw. Wärme) im Erdreich sind im Allgemeinen wartungsärmer als die Kältespeicherung in Aquiferen und es sind nur einfache Genehmigungsprozesse zu beachten. Die Amortisation dauert jedoch aufgrund der höheren Investitionskosten häufig deutlich länger (6 bis 10 Jahre). Je nach Kältebedarf werden auch zusätzliche Kältequellen zur Spitzenlastdeckung benötigt.

Auch bei höheren Amortisationszeiten ergeben sich (durch die hohe Lebensdauer des Systems und die Energieeinsparungen über lange Zeit) jedoch durch die Lebenszyklus-



16 / 25

kosten positive Ergebnisse. Durch eine sorgfältige Analyse des tatsächlichen Bedarfs können die Investitionskosten auch unter denen einer traditionellen (häufig überdimensionierten) Kälteanlage liegen. Ebenfalls positiv fallen im Vergleich die Ästhetik der Produkte und der fehlende Lärm auf.

Latente Wärme: Phasen-Wechselmaterialien (PCM)

Im Unterschied zur Speicherung sensibler („fühlbarer“) Wärme handelt es sich bei latenter Wärme im Sinne von „verborgener“ Wärme um gespeicherte thermische Energie, welche nicht direkt mit einer wesentlichen Temperaturveränderung des Speichermediums verbunden ist. Das Speichermedium in Latentwärmespeichern kann die Wärme vielmehr dadurch speichern, dass es seinen Aggregatzustand (meist von festem zu flüssigem Zustand) verändert. Es wird daher auch als Phasenwechselmaterial (engl. Phase Change Material, PCM) bezeichnet. Ein Beispiel eines PCM ist ein Eiswürfel im Getränk, wobei die Wärme zum Wechsel des Aggregatzustandes dem Getränk entzogen wird, welches sich daraufhin abkühlt).

Während des Ladevorganges, d.h. der Wärmeaufnahme durch das Speichermedium, wird die thermische Energie im Wechsel des Aggregatzustandes des Speichermediums „fixiert“. Anstatt sich zu erhitzen, wird das Speichermedium bei Wärmezufuhr flüssig, beim Entladen, d.h. der Wärmeabgabe, erstarrt es wieder. Dies ermöglicht die Aufnahme von relativ großen Wärmemengen sowie hohe Energiedichten bei weitgehend konstanter Betriebstemperatur.

Aufgrund der jedem Stoff eigenen Schmelztemperatur können je nach Einsatz- und Anwendungsgebiet bzw. Arbeitstemperatur Speichermedien mit geeigneter Phasenwechseltemperatur eingesetzt werden. Verwendet werden können drei Gruppen von Speichermaterialien:

- anorganische Speichermedien (Salzhydrate, reine Metalle/Salze),
- organische Speichermedien (Paraffine und Fettsäuren),
- sowie Mischungen von Phasenwechselmaterialien.



PCMs besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, was einerseits geringe Wärmeverluste bedeutet, da das Medium die Wärme schwer wieder abgibt. Sie bedeutet jedoch auch, dass die Wärme dem Medium nur schwer zuzuführen ist. Um dennoch eine entsprechend ausreichend hohe Be- und Entladeleistung zu erreichen, können die Speichermedien durch eine Umhüllung verkapselt, d.h. hermetisch geschlossen werden. Darüber hinaus kann dem PCM eine neue innere Struktur hinzugefügt werden. Hierzu wird das PCM mit

| Phasen-Wechselmaterialien (PCM) | |
|--|---|
| Energiedichte | bis 120 kWh/m ³ mobil: 150-200 kWh/m ³ |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Salzhydrate (30-80 °C); Paraffine (10-60 °C); Fettsäuren (bis 110 °C); Salze (über 130 °C); Salz-Graphit-Verbund (130-330 °C); (Erd-)Alkalisalze (100-1.000 °C); Gashydrate |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 0,2 W/m K (Paraffin); 0,6 W/m K (Salzhydrat); 4-15 W/m K (im Verbund) |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Warmwasser & Heizungsunterstützung; Prozesswärme; Gebäudetechnik; mobile Wärme |
| Stand der Technik | teilweise marktreif |
| Speichervolumen | einige Kubikmeter bis (materialabhängig) ca. 100 m ³ |
| Speicherdauer | Kurz- und Langzeitspeicher |

einem anderen sehr gut Wärme leitenden Stoff zu einem neuen Verbundmaterial, z.B. hochleitfähige Salz-/Graphit-Materialien zusammengefügt. Hiermit konnten erstmalig wirtschaftliche Latentspeicher für höhere Temperaturen verwirklicht werden.

PCMs sind vielseitig einzusetzen, da sich mit der Wahl des entsprechenden Speichermediums das jeweilig gewünschte Temperaturniveau der Speicherung realisieren lässt. Ihr Ursprung findet sich im Transport temperatursensibler Produkte (z.B. Blutkonserven).

In der Prozessdampfbereitstellung wurde erstmals 2007 mit PCM ein „Sandwichkonzept“ mit Graphit-Platten und Schmelzsatz beim DLR-Forschungszentrum im spanischen Almeria erprobt. Solche Speicher könnten z.B. bei solarthermischen Kraftwerken sowie Biogasanlagen zum Einsatz

kommen, um Temperaturschwankungen zu glätten, ein zeitliches Überangebot von Wärme zu verwerten oder auch industrielle Prozesswärme bereitzustellen.

PCMs ermöglichen auch das viel versprechende Angebot „mobiler Wärme“. Drei transportfähige Container mit PCM könnten z.B. eine Wärmeleistung von 250 kW bieten. Statt des Öl-Tankwagens würde ein Lkw mit dem Wärmespeicher vorfahren. Mobile Wärmespeicher gelten bis zu einer Entfernung von 30 km zwischen Wärmelieferant und -abnehmer als wirtschaftlich. Für Entfernungen von unter 5 km und für einen Wärmebedarf von über 400.000 kWh/a können Wärmekosten von 5 Cent/kWh erreicht werden. Voraussetzung ist jedoch ein geeigneter Wärmeabnehmer mit konstanter und durchgängiger



18 / 25

Wärmeabnahme, z.B. Krankenhäuser, Hallenbäder, Wohnheime oder industrielle Niedertemperaturanwendungen. Mobile Wärmespeicher können somit unter Umständen eine sinnvolle Alternative zum Anschluss an eine Fernwärmeleitung bieten. Die Versorgung mit mobilen Wärmespeichern wurde sowohl von der Clariant Deutschland GmbH in Sulzbach (Speichermedium: Natriumacetat) als auch von der LSG Lufthansa Service GmbH (Speichermedium: Bariumhydroxid) bereits in der Praxis erprobt.

PCMs haben den besonderen Vorteil, dass sie auch mit diskontinuierlich verfügbarer Abwärme beladen werden können und bei ihrer Entladung einen konstanten Wärmestrom liefern können. Im Labortest wurden PCMs als stabil für über 500 Zyklen getestet. Bei sensibler wie latenter Wärmespeicherung ist eine Langzeitspeicherung jedoch nur durch eine sehr gute Dämmung und nur mit großen Speichervolumina zu erreichen.

Ein Latentwärmespeicher mit PCM versorgt in Dänemark einen landwirtschaftlichen Betrieb mit rund 3,4 Megawatt (MW) Leistung aus 340 modularen Latentwärmезellen. Alternativ hätte ein 75 m³ fassender Wasserspeicher eingesetzt werden müssen. Gespeist wird der Speicher durch eine solarthermische Anlage mit 500 m² Sonnenkollektoren. Für zusätzlichen Wärmebedarf steht eine Holzheizung bereit.

In den letzten 10 Jahren hat die Kommerzialisierung von Latentwärmespeichern große Fortschritte machen können. Die Marktreife ist in den letzten Jahren für zahlreiche PCM-Produkte erreicht worden, wie z.B. Baustoffe mit beigemischten PCMs für den Temperatureausgleich im Gebäude.

In Zukunft bieten Phasenwechselfluide (engl. Phase Change Slurries, PCS) interessante Anwendungsmöglichkeiten, mit denen Energiedichten von über 200 kWh/m³ angestrebt werden. Damit könnten noch kompaktere Speicher realisiert werden. Diskutiert wird zudem die Zugabe von mikroverkapselten PCMs zu Wärmeträgerflüssigkeiten, um deren Wärmetransportfähigkeit zu erhöhen. Insbesondere Wasser-Paraffin-Gemische sind als Alternative zu Wasser als Transportmedium in Wärme- bzw. Kältespeichern technologisch sehr vielversprechend.

Phasen-Wechselmaterialien als Kältespeicher

Latentwärmезellen aus PCM, die auch Kälte speichern können, sind mit 9 bis 11 kWh Wärmeleistung und rund 5 kWh Kälteleistung kommerziell erhältlich. PCM mit Phasenübergangstemperaturen unterhalb 0°C haben geringere Herstellungskosten als PCMs zur Wärmespeicherung. Große Kältespeicher zählen zum Stand der Technik und werden bereits wirtschaftlich als Pufferspeicher in der Klimatisierung eingesetzt. PCMs kommen auch in der passiven Gebäudeklimatisierung zum Einsatz: hier werden u.a. Temperaturausgleichende PCM-Gipsputze und -kartonplatten angeboten.



Sorptionsspeicher und chemische Reaktionswärme

Sorptionsspeicher arbeiten mit einem Speichermedium und einem Arbeitsmedium. Bei der Sorption kann sich das Arbeitsmedium mit dem Speichermedium für das Entladen des Speichers auf zwei unterschiedliche Weisen verbinden: der **Adsorption** und der **Absorption**.

Als Speichermedien für die **Adsorption** eignen sich Stoffe mit sehr poröser und somit großer Oberfläche, welche große Mengen Wasser zu binden vermögen. Es werden vor allem Zeolithe und Silikagele eingesetzt. Auch Metallhydride sind geeignet. Je nach dem Herstellungsverfahren und der Struktur des Speichermediums können Energiedichte und erreichbare Nutztemperaturen variiert werden. Sorptionsspeicher lassen sich daher an viele unterschiedliche Verwendungszwecke anpassen.

Das Beladen des Sorptionsspeichers mit Wärme wird als **Desorption** bezeichnet. Dem Speichermedium, z.B. Silikagel, an dessen poröser Oberfläche in entladem Zustand Wasser „angedockt“ ist, wird dabei durch Wärmezufuhr das Wasser „ausgetrieben“, wodurch sich Silikagel und Wasserdampf voneinander trennen. Soll die gespeicherte Wärme wieder abgerufen werden, genügt es, Wasserdampf auf niedrigem Temperaturniveau zuzuführen. Der Wasserdampf wird unter Wärmezufuhr vom trockenen Silikagel angezogen und die Wassermoleküle „docken“ wieder an dessen poröser Oberfläche an. Dieser Prozess des Entladens des Speichers wird als **Adsorption** bezeichnet.

Statt eines festen Speichermediums wie Silikagel können Sorptionsspeicher auch flüssige Speichermedien wie z.B. Salzlösungen nutzen. Das Arbeitsmedium Wasser kann dann allerdings nicht an einer porösen Oberfläche „andocken“, sondern vermischt sich mit der Salzlösung. Beim Beladen des Sorptionsspeichers mit Wärme wird der Salzlösung das Wasser „ausgetrieben“ (**Desorption**). Wasserdampf wird von der Salzlösung abgegeben. Die hochkonzentrierte Salzlösung zieht beim Entladen des Speichers befeuchtete Luft wieder an. Da die Salzlösung den Wasserdampf „verschluckt“, entsteht trockene, erwärmte Luft, die abgegeben werden kann. Dieser Prozess des Entladens des Speichers wird als **Absorption** bezeichnet. Im Gegensatz zur Adsorption beim festen Speichermedium „klebt“ das Arbeitsmedium Wasser hier nicht an der Oberfläche, sondern verteilt sich gleichmäßig im flüssigen Speichermedium.

| Sorptionsspeicher | |
|--|---|
| Energiedichte | 200 - 500 kWh/m ³ (theoretisch); 130 kWh/m ³ (praktisch) |
| Speichermedium & Temperaturbereich | Zeolithe (100 - 300°C) Silikagele (40 - 100°C) Metallhydride (280 - 500°C) |
| Wärmeleitfähigkeit (Wie leicht kann Wärme aufgenommen werden?) | 0,14 - 0,6 W/m K |
| Anwendungsbereich/ Einsatzgebiet | Heizungssystem; Nahwärme; mobile Wärme; Hallenbäder |
| Stand der Technik | Pilotprojekte, hohes Entwicklungspotenzial |
| Speichervolumen | ab 10 m ³ |
| Speicherdauer | Kurzzeitspeicher; potenzieller Langzeitspeicher |



Sorptionsspeicher besitzen zusammen mit anderen chemischen Speichern die höchste potenzielle Energiedichte. Thermochemische Speicher im Allgemeinen beruhen auf umkehrbaren chemischen Reaktionen, bei denen Wärme aufgenommen bzw. abgegeben wird. Im Gegensatz zu anderen thermochemischen Reaktionen – wie z.B. dem Verbrennen von Holz – gibt das Speichermedium Wärme ab, ohne vernichtet zu werden. Je nach Material und Systemauslegung können die Energiedichten hierbei theoretisch deutlich über denen von Speichern von sensibler oder latenter Wärme liegen. Bislang konnten in der Praxis allerdings nur Energiedichten bis etwa 130 kWh/m^3 erzielt werden, was nicht wesentlich über den Energiedichten von Latentspeichern liegt.

Unabhängig von den hier vorgestellten Sorptionsspeichern gibt es eine zweite Gruppe chemischer Speicher. Diese können Reaktionswärme dadurch speichern oder wieder abgeben, indem sich zwei Komponenten eines Speichermediums vereinigen oder teilen. Dabei gibt es kein „Andocken“ und „Austreiben“ wie bei den Sorptionsspeichern, sondern eine einfache chemische Reaktion der beiden Speicherkomponenten. Diese können jede für sich über einen längeren Zeitraum und ohne Energieverlust bei Raumtemperatur gelagert werden.

Zum Einsatz kommen Sorptionsspeicher z.B. in Kombination mit Solarkollektoren oder Brennwertkesseln für Einfamilienhäuser. Sie fangen optimal Wärmespitzen oder puffern ungünstige Wittersituationen ab. Ebenso eignen sie sich als Puffer in Wärmenetzen und als große Langzeitspeicher, die z.B. die Abwärme von Blockheizkraftwerken aufnehmen. Ein interessanter Anwendungsbereich ist – wie bei PCM-Systemen – die Nutzung als mobile Wärmequelle, um z.B. Abwärme von Biogasanlagen zum Nutzer zu transportieren. Eine potenziell wirtschaftliche Alternative bieten Sorptionsspeicher als Heizung und Luftbefeuchter für Hallenbäder.

In München werden seit 2005 das Heizsystem einer Schule und gleichzeitig das Kühlsystem eines Veranstaltungsraumes durch einen Sorptionsspeicher mit festem Speichermedium (Zeolith) versorgt. Der Speicher dient dabei als Lastausgleich im Fernwärmenetz. Er umfasst rund 1.400 kWh Speicherkapazität und kann bei maximaler Heizlast des Gebäudes den Wärmebedarf 14 Stunden lang decken. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bei 100 und mehr Zyklen pro Jahr und Materialkosten des Speichermediums von 2 Euro pro Kilogramm gegeben. Im Dauerbetrieb ist eine Überprüfung des Speichermediums im Abstand von 4 bis 5 Jahren ausreichend. Bei rund 60.000 Euro Investitionskosten ergibt sich für das beschriebene System eine Amortisationszeit von 7 bis 8 Jahren.

Ein Einfamilien-Niedrigenergiehaus (4.000 kWh Wärmebedarf/Jahr) kann mit Hilfe eines Sorptionsspeichers eine vollständige solarthermische Deckung des Wärmebedarfs erreichen. Eine solarthermische Anlage mit 35 m^2 Solarkollektorfläche und ein 12 m^3 umfassender Sorptionsspeicher reichen dafür aus. Einem breiten, kosteneffizienten Einsatz von Sorptionsspeichern stehen deren relativ hohe Produktionskosten allerdings noch entgegen.



21 / 25

gen. Die Vorteile der thermochemischen Speichermedien liegen in ihren potenziell hohen Energiedichten (4- bis 5mal höhere volumenbezogene Wärmemenge als bei Heißwasserspeichern) und den geringen Wärmeverlusten (fast unbegrenzte Speicherdauer). Zudem sind die gängigen Materialien gut zu transportieren. Sie sind weder umweltschädlich noch feuergefährlich und können praktisch unbegrenzt be- und entladen werden. Angepasste Speichermedien ermöglichen in Heizsystemen deutliche Effizienzsteigerungen. Durch die nahezu verlustfreie Speicherung der thermischen Energie sind Sorptionsspeicher auch gute Kurzzeitspeicher.

Sorptionsspeicher als Kältespeicher

Sorptionsspeicher mit flüssigen Speichermedien wie Salzlösungen erzeugen beim Entladen (Absorption) trockene, erwärmte Luft. Diese kann für die Gebäudeklimatisierung mit einem nachgeschalteten Befeuchter abgekühlt werden. Sorptionsspeicher können besser ausgelastet und wirtschaftlicher betrieben werden, wenn sie kombiniert im Winter heizen und im Sommer kühlen. Mit Sorptionsspeichern, die die Gebäudeluft entfeuchten, sind keine beliebigen Temperatursprünge zwischen Außen- und Innenluft möglich. Diese Klimaanlage erreichen jedoch die in der Klimatechnik geforderten Kühl- und Entfeuchtungsleistungen für sommerliche Außenluft. Prototyp- und Demonstrationsanlagen für die sorptionsgestützte Klimatisierung wurden bisher im Leistungsbereich von 10-100 kW realisiert.

Fazit

Mit einer effizienten Wärmespeichertechnik ist es möglich, ein zeitlich und räumlich variables Energieangebot, wie es insbesondere bei den Erneuerbaren Energien vorliegt, mit der variablen Energienachfrage in Einklang zu bringen. Welcher Speichertyp bzw. welche Speicher methode letztendlich eingesetzt werden sollte, hängt zum einen von den erzielbaren Energiedichten und benötigten Temperaturbereichen ab, zum anderen steht eine bestimmte Anwendung immer in Abhängigkeit zu den örtlichen Gegebenheiten, dem benötigten Volumen oder den geologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes. Eine allumfassende Patentlösung gibt es hierbei nicht.

Zwar hat Wärmespeichertechnik erhebliche Fortschritte und eine Vielzahl von Lösungen zu bieten, doch befinden sich vor allem die Langzeitspeicher größtenteils noch in der Entwicklungsphase in Form von Pilotprojekten und Demonstrationsanlagen. Mit steigendem Interesse insbesondere zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung hat das Wissen über diese Technik aber mittlerweile Eingang in die zentralen Zielbranchen (Städte, Stadtwerke, Bauträger, Planungsbüros) gefunden. Die Anwendungsgebiete von Langzeit-Wärmespeichern bieten mit der Erschließung des privaten Heizungsanlagen-Bestandes sowie der Einbindung großer Speicher in Wärme- und Kältemanagementsysteme der Industrie oder des öffentlichen Sektors jedoch noch wichtige Erweiterungen.



Glossar

| | |
|------------------------|--|
| Absorption | Absorption ist das Entladen eines Sorptionsspeichers mit flüssigem Speichermedium. Ein Arbeitsmedium (z.B. Wasser als Luftfeuchtigkeit) wird von einem Speichermedium (z.B. Salzlösung) angezogen und „verschluckt“, wobei Luft getrocknet und erwärmt wird. Das Arbeitsmedium vermischt sich gleichmäßig im Speichermedium. |
| Adsorption | Adsorption ist das Entladen eines Sorptionsspeichers mit festem Speichermedium. Bei der Adsorption wird ein Arbeitsmedium (z.B. Wasser) von der Oberfläche eines Speichermediums angezogen und „andockt“, wobei Luft getrocknet und erwärmt wird. |
| Desorption | Desorption ist das Beladen eines Sorptionsspeichers mit Wärme. Einem festen oder flüssigen Speichermedium wird dabei ein Arbeitsmedium (z.B. Wasser) durch Wärmezufuhr entzogen (bzw. „ausgetrieben“). |
| Energiedichte | Die Energiedichte stellt das Verhältnis von nutzbarer Energie zur Masse oder zum Volumen dar. Sie gibt an, wie viel Energie eine Masseneinheit (in kWh/kg) oder Volumeneinheit (in kWh/l oder kWh je m ³) eines Speichers enthält. |
| K | Kelvin; Temperatureinheit, die zur Angabe von Temperaturunterschieden in der Wärmeübertragung genutzt wird. Eine Temperatur von 0° Celsius entspricht 273,15 K. |
| kJ | Kilojoule; hier Einheit für Energie und Wärmemenge |
| kWh | Kilowattstunde; Einheit für Energie- und Wärmestrom |
| Speichermedium | Stoff, welcher im Wärmespeicher selbst die Wärme aufnimmt und wieder abgibt. Das Speichermedium und der Wärmeträger können identisch sein. |
| Speichervolumen | Volumen des Speichermediums |
| Wärmekapazität | Wird mit einem Speichermedium Wärme gespeichert, so erwärmt es sich dabei normalerweise. Erwärmt sich das Speichermedium selbst stark, führt dies zu potenziell hohen Wärmeverlusten. Die Wärmekapazität gibt an, um wie viel Kelvin sich das Speichermedium bei einer bestimmten zugeführten Wärmemenge selbst erwärmt: Wie viel Wärme kann das Speichermedium bei einer Temperaturerhöhung um ein Kelvin aufnehmen? Eine hohe Wärmekapazität bedeutet, dass das Speichermedium sehr große Wärmemengen bei geringer Temperaturveränderung aufnehmen kann. |



| | |
|---------------------------|--|
| Wärmeleitfähigkeit | Soll ein Speichermedium eine bestimmte Wärmemenge aufnehmen, so muss diese Wärmemenge innerhalb des Speichermediums transportiert werden. Die Wärmeleitfähigkeit gibt dabei diejenige Wärmemenge an, welche pro gemessenem Zeitabschnitt (z.B. einer Sekunde) durch einen Meter des Speichermediums übertragen wird: Wie viel Wärme kann durch das Speichermedium hindurchwandern? Gemessen wird die Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperaturdifferenz zwischen den gegenüberliegenden Seitenflächen des Speichermediums von einem Kelvin. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit, desto weniger Wärme kann durch das Speichermedium hindurchwandern, (d.h. verloren gehen); desto weniger Wärme kann jedoch auch schnell und leicht in das Speichermedium hinein gespeichert werden. |
| Wärmeträger | Stoff, welcher die Wärme in den Speicher transportiert und an das Speichermedium abgibt bzw. von diesem aufnimmt und aus dem Speicher abtransportiert. |

Quellen und weitere Informationen

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)
www.zae-bayern.de

BINE: Wärme und Strom speichern. Basis Energie 19, Dezember 2005.

BINE: Langzeit-Wärmespeicher und solare Nahwärme. Profi-Info I/2001.

BINE: Thermochemische Speicher. Projektinfo 2/2001.

BINE: Wärmespeicher. 4., erweiterte und völlig überarbeitete Auflage, April 2005.

BINE Informationsdienst vom Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe
www.bine.info

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Förderprogramme
„Solarthermie 2000“ und Solarthermie-2000 plus“
www.solarthermie2000.de, www.solarthermie2000plus.de

Deutscher Bundestag: Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung: Energiespeicher – Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“. Drucksache 16/10176. Berlin, August 2008.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
www.dlr.de

EUREKA AG; Anbieter von mobilen Wärmespeichern
www.transheat.de

Eurosolar/WCRE: Dokumentation der International Renewable Energy Storage Conference (IRES). Gelsenkirchen/Bonn 2006/2007.
www.eurosolar.org

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
www.ise.fhg.de

Geothermische Vereinigung - Bundesverband Geothermie e.V.
www.geothermie.de

HAASE-Wärmespeicher; Anbieter von Wärmespeichern aus GFK-Werkstoff
www.ichbin2.de/waermespeicher.html

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart
www.itw.uni-stuttgart.de

PowerTank GmbH; Anbieter von modularen Latentwärmespeichern
www.powertank.de

25 / 25

RAL Gütezeichen für PCMs in Gebäuden
www.pcm-ral.de

Solites, Steinbeis-Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
www.solites.de

ZfS - Rationelle Energietechnik GmbH
www.zfs-energietechnik.de

Herausgeber:

Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
Reinhardtstr. 18
10117 Berlin
Tel. 030/2005353
Internet: www.unendlich-viel-energie.de
E-Mail: kontakt@unendlich-viel-energie.de

Stand der Hintergrundinformation: November 2009