

Dr. rer. nat. Rolf Meißner; Dipl.-Ing. Stefan Abrecht \*

# Sinn und Unsinn von Solarspeichern

## Das Beherrschen der Stagnation ist Voraussetzung für eine optimierte Speicherauslegung



Abb. 1 · Solaranlagen für Heizung im Winter und Kühlung im Sommer in Esslingen (links) und Istanbul (rechts) mit nur ca. 10 Litern Speicher pro Quadratmeter Kollektorfläche und weit über 500 kWh pro Quadratmeter Systemertrag (2011).

Man stelle sich vor, man lebte in tropischer Naturverbundenheit und zum guten Teil von leicht verderblichen Früchten. Konservierung sei unbekannt oder zu aufwändig. Drei Viertel des Jahres würde man davon zur Hälfte satt, jedoch für zwei Monate gäbe es Obst im Überfluss. Nur Narren legten deshalb große Lager an. Stattdessen äße man sich satt solange wie möglich und baute für die Monate der Knappheit einfach etwas mehr an. Eine Überlegung, die heute auch bei der Nutzung solarer Wärme zum Tragen kommen sollte.

Das Potenzial zur Nutzung thermischer Solarwärme ist weltweit noch nicht einmal zu einem Tausendstel ausgeschöpft. Trotzdem gelten, auch ausgehend von Deutschland, bereits scheinbar unumstößliche Regeln, nach denen bestimmte spezifische Mindestspeichergößen notwendig wären, um Solarenergie sinnvoll zu nutzen. Leider wird dabei übersehen, dass für solare Deckungsgrade von ca. 10 Prozent praktisch gar kein Speicher notwendig ist ( $\approx 10 \text{ l/m}^2$ ). Damit lassen sich in Deutschland mit einem durchschnittlichen Jahresnutzungsgrad von etwa 40 Prozent zum Beispiel 500 kWh Wärme pro  $\text{m}^2$  Kollektorfläche im Bereich 70 bis 90 °C zum sofortigen Verbrauch erzeugen. Mit spezifischen Speichergößen von weniger als  $40 \text{ l/m}^2$  lässt sich etwa die Hälfte der Wärme eines sonnigen Tages für 24 Stunden speichern, um variierende Ta-

gestaltprofile zu bedienen. Damit können für Warmwasser und Heizung bis zu 50 Prozent des Bedarfes mit der Sonne erbracht werden. Auch bei industriellen Anwendungen mit täglich gleichen Lastprofilen können bei jährlichen Erträgen von etwa  $350 \text{ kWh/m}^2$  ähnlich hohe Deckungen erzielt werden. Der Minderertrag wird dabei überwiegend durch die etwa 115 arbeitsfreien Tage bestimmt. Einzige Bedingungen, um die Solarwärme so einfach bereitzustellen, sind sehr hochwertige Kollektoren und ein System, das problemlos mit Stillstandssituationen umgehen kann. Größere Speicher braucht man erst für solare Deckungen über 50 Prozent. Diese Speicher müssen dazu auch noch extrem gute Wärmedämmungen aufweisen, sonst verfehlen sie dieses Ziel. Diese Anwendungen besitzen in Deutschland aufgrund ihrer Unwirtschaftlichkeit noch ein sehr geringes Potential. Saisonalstorage war bisher gegenüber Kurzzeitspeicherung technisch, ökonomisch und ökologisch unterlegen. Fast alle realisierten Langzeitspeicherprojekte haben das 50-Prozent-Ziel verfehlt oder kaum erreicht und stellen damit ihre Berechtigung in Frage. Trotzdem widmet sich die Forschungsförderung besonders in Deutschland schon immer mehr der Speicherung von Solarwärme als deren Erzeu-



\* Dr. rer. nat. Rolf Meißner  
Geschäftsführer  
Ritter XL Solar GmbH  
D - 76307 Karlsbad  
Fax (0 72 02) 9 22 - 125  
info@ritter-xl-solar.com



\* Dipl.-Ing. Stefan Abrecht  
Selbstständiger Berater

gung und Verwendung. Dass besonders große Speicher einen Anspruch auf einen „Innovationsbonus“ genießen, mag man angesichts der Unwirtschaftlichkeit noch verstehen. Für Solarwärmeinteressenten sind aber zu große spezifische Speichervolumina seit Langem eine Fördervoraussetzung, und damit ein Hemmnis. Hier werden Investoren mit technisch unsinnigen Vorgaben zu unwirtschaftlichem Handeln quasi gezwungen oder von vorneherein abgeschreckt. Der nachfolgende Unmut über das vorhersehbare Ergebnis schadet dem Markt nachhaltig. Woher kommt diese Kluft zwischen naheliegender Vernunft und Realität, zwischen Theorie und Praxis? Die Autoren wagen die Vermutung, dass oft als Speicher bezeichnet wird, was eigentlich nur Überhitzungsschutz sein soll. Zu diesem Schluss kommen sie nach der Auseinandersetzung mit der Frage, ob es überhaupt möglich und sinnvoll ist, Solarwärme lange Zeit zu speichern. Der Artikel dokumentiert diese Auseinandersetzung über einfach nachvollziehbare physikalische und ökonomische Plausibilitäten, vor allem für Wassertankspeicher, kurz aber auch für Erdsonden- und Aquifer-Speicher.

## Der Wettlauf zwischen Solarertrag und Wärmeverlust

Die momentan preiswerteste Solarwärmespeicherung für Temperaturen bis etwa 120 °C erfolgt mit Heißwasser. Latentwärme, Adsorptionswärme sowie Vakuum-Speicherdämmungen sollen hier nicht untersucht werden, weil sie noch unerprobt und nicht marktrelevant sind.

Es sollen nur die Speichertanks untersucht werden. Jeder Speicher hat einen Inhalt, eine Oberfläche und eine bestimmte

Form. Betrachtet man weiter vereinfachend nur Zylinder mit einem gleichen Höhen-Durchmesser-Verhältnis von 1,5, dann gibt es auch einen stets gleichen Zusammenhang zwischen dem Inhalt  $V_S$  und der Behälteroberfläche  $A_B$ .

$$(1) A_B [m^2] = 5,6 (V_S [m^3])^{2/3}$$

Der Inhalt speichert die Wärme, über die Oberfläche versucht sich diese ständig wieder zu verflüchtigen. Es kann immer nur eine begrenzte Menge Wärme pro Quadratmeter Kollektorfläche  $F_K$  und Zeit in den Speicher gelangen. Die spezifische Kollektorleistung ist von vielen Faktoren abhängig. Es soll ein weit überdurchschnittlich guter Tag mit zum Beispiel  $Q_d = 3 \text{ kWh/m}^2\text{d}$  als Maßstab genommen werden. Auch der maximale Kollektorjahresertrag ist von vielen Parametern abhängig. Auch hier soll ein überdurchschnittlich guter Wert von  $Q_a = 500 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  als Maßstab genommen werden. Diese und alle folgenden spezifischen Angaben beziehen sich auf die Bruttokollektorfläche und auf flächeneffiziente Kollektoren mit einem Brutto- Aperturflächenverhältnis von etwa 0,9.

Mit dem Speicher verfolgt man das Ziel, Wärme für eine bestimmte Zeit  $t_s$  bei mindestens einer bestimmten Solltemperatur  $T_{\text{Soll}}$  aufzubewahren. Die mittlere Rücklauftemperatur  $T_R$ , die maximale Speichertemperatur  $T_{\text{max}}$  und die beabsichtigte Speicherzeit liefern den notwendigen Speicherinhalt (Diagramm 1). Um zu einem einigermaßen positiven Ergebnis zu gelangen, sollen die Rücklauftemperatur mit  $T_R = 40 \text{ °C}$  sehr niedrig und die maximale Speichertemperatur mit  $T_{\text{max}} = 95 \text{ °C}$  hoch angenommen werden.

$$(2) V_S = \frac{Q_d t_s F_K}{1,16 [kWh/m^2K] (T_{\text{max}} - T_R)}$$

Mit der Speichergröße  $V_S$  stehen mit (1) auch die Speicherbehälteroberfläche  $A_B$  und der Speicherdurchmesser  $DS = 2(V_S/\pi/3)^{1/3}$  fest. Jetzt kommt es noch auf die Dämmstärke  $d_i$  und das Dämmmaterial an. Die für die Wärmeverluste maßgebliche Speicher- oberfläche  $A_S$  kann aus  $A_B$  und  $d_i$  abgeschätzt werden.

$$(3) A_S \approx A_B (1 + 4 \frac{d_i}{D_S})$$

Aus der Speicher- oberfläche  $A_S$ , der Dämmstärke  $d_i$ , dem Wärmeleitwert des Dämmmaterials  $\lambda_i$  und der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Außentemperatur  $\Delta T_V$  folgt die Wärmeverlustleistung  $Q'_V$ , mit welcher der Speicher ständig Wärme verliert.  $\Delta T_V$  soll mit 40 K niedrig angesetzt werden (z. B. 30 °C/10 °C oder 60 °C/20 °C). Mit dieser Pauschalierung wird auch einigermaßen dem Umstand Rechnung getragen, dass die Speichertemperatur nie homogen und die Außentemperatur meistens auf Raumtemperatur oder auf die mittlere Erdreichtemperatur begrenzt ist.

$$(4) Q'_V = \frac{\lambda_i A_S \Delta T_V}{d_i}$$

Der Wärmeleitwert  $\lambda_i$  kann nicht ohne weiteres pauschaliert werden. Nur bei kleinen Speichern kommen auch hochwertige Dämmstoffe, wie EPS-, EPP-, Melamin- oder PU-Hartschäume mit mittleren Wär-

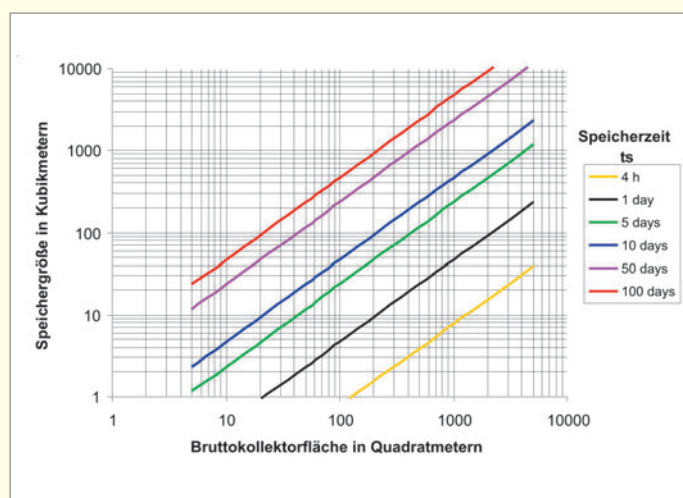


Diagramm 1 · Notwendiger Speicherinhalt  $V_S$  in Kubikmetern in Abhängigkeit von der Bruttokollektorfläche und von der Speicherzeit für  $Q_d = 3 \text{ kWh/m}^2\text{d}$  und  $T_{\text{max}} - T_R = 55 \text{ K}$  ( $V_S [m^3] = 0,047 * F_K [m^2] * t_s [d]$ ).

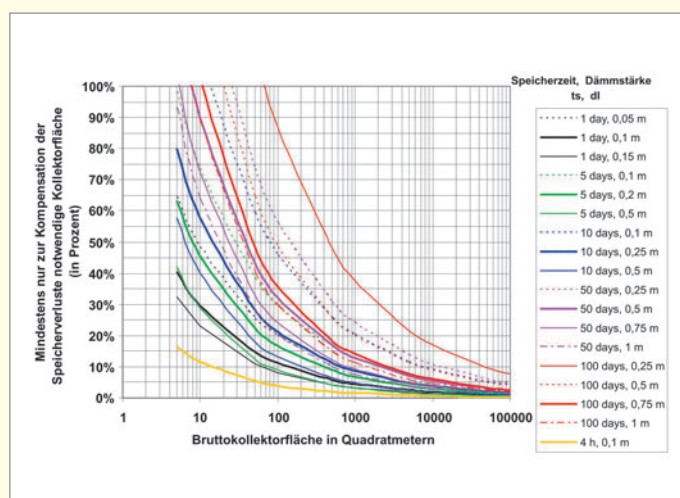


Diagramm 2 · Zur Kompensation der Speicher- verluste mindestens notwendige Kollektorfläche in Prozent (= 100  $f_v$ ) für verschiedene Speicherzeiten  $t_s$  und Isolerstärken  $d_i$ .

meleitwerten (bei ca. 50 °C mittlerer Dämmstofftemperatur) unter 0,045 W/mK zum Einsatz. In der Praxis dominieren jedoch PU-Weichschäume mit 0,05 ... 0,065 W/mK. Größere Ortstanks werden meistens mit mineralischen Dämmstoffen oder Glaswolle mit Wärmeleitwerten von 0,06 ... 0,075 W/mK gedämmt. Bei im Erdreich vergrabenen Speichern kommen, zum Beispiel, Schaumglasschotter oder Blähglasgranulat zum Einsatz. Diese können nur in vollkommen trockenem Zustand Wärmeleitwerte von 0,1 W/mK unterschreiten und sich bei Durchfeuchtung bis zum Wärmeleitwert von Wasser auf etwa 0,6 W/mK verschlechtern [1]. Weil Pufferspeicher nur selten mit hochwertigen Dämmstoffen ausgestattet werden, soll bei den folgenden Betrachtungen der Wärmeleitwert  $\lambda_i$  konstant 0,08 W/mK betragen. Zu den Speicherverlusten kommen immer noch die Verluste der Speicheranschlüsse, der Rohre und sämtlicher Armaturen hinzu. Da diese Zusatzverluste umso stärker zu Buche schlagen, je kleiner die Speicher sind, findet dadurch eine gewisse Fehlerkompensation statt, so dass es sich bei dieser pauschalierten Annahme von  $\lambda_i = 0,08$  W/mK bei jeder Speichergröße immer noch um eine Idealisierung handelt.

Die Verlustleistung  $Q'_v$  führt über das Jahr (8.760 Stunden) zu einem vorhersagbaren Wärmeverlust  $Q_{va}$ . Um diesen Wärmeverlust gut zu veranschaulichen, soll er als Kollektorflächenanteil  $f_v$  ausgedrückt werden, welcher lediglich der Kompensation der Wärmeverluste dient (Diagramm 2). Dies bedeutet nicht, dass der Rest der Solarwärme auch genutzt werden kann, weil dies lediglich auf Speichertemperaturen oberhalb der Solltemperatur zutrifft und hohe Solltemperaturen jeden der

angenommenen Parameter nur verschlechtern können.

$$(5) f_v = 8760h Q'_v / Q_a$$

Die qualitativen Schlussfolgerungen aus diesem Diagramm sind nicht neu:

- Kleine Speicher brauchen eine hervorragende Wärmedämmung.
- Je kleiner die Solaranlage ist, umso größer sind die spezifischen Wärmeverluste.
- Je größer die Speicherzeit ist, umso größer sind die Wärmeverluste.

Die quantitativen Erkenntnisse sind schon überraschender:

- Nur Kurzzeitspeicher haben bei üblichen Speicherisolerstärken im Verhältnis zum Solarertrag akzeptable Wärmeverluste.
- Für den Kleinanlagenbereich mit Kollektorflächen unter 15 m<sup>2</sup> wird deutlich, dass eine Solaranlage allein nur unter hervorragenden Begleitumständen einen Pufferspeicher rechtfertigen kann, ein bereits vorhandener oder mehrfach genutzter Pufferspeicher jedoch immer eine ergänzende, Verluste kompensierende Solaranlage.
- Jede Spardämmung mit weniger als 15 cm Dämmstärke führt über das Jahr zu inakzeptabel hohen Verlusten.
- Der Versuch einer Langzeitspeicherung über 10 Tage hinaus kann mit kleinen Kollektorflächen bis etwa 50 m<sup>2</sup> überhaupt nicht gelingen.
- Bei saisonaler Speicherung mit Kollektorflächen bis etwa 2.000 m<sup>2</sup> kommen nur sehr große Dämmstärken in Frage. Wenn dabei die Dämmung jedoch nur

etwas feucht wird, scheitert ein solches Projekt, weil sich die hier angenommenen Wärmeverluste rasch vervielfachen.

- Wenn allerdings die Speicher quasi unendlich groß werden (>200.000 m<sup>3</sup>), spielt die Dämmstärke kaum noch eine Rolle. Dazu gehören dann aber auch Kollektorflächen von 50.000 m<sup>2</sup> und mehr. Auf diesem Effekt sowie auf einer intelligenten Energiepreispolitik beruht der Erfolg der solarthermischen Nah- und Fernwärmeunterstützung in Dänemark. Erst ab dieser Größenordnung ist Saisonspeicherung eine wichtige Option für die Zukunft, weil das Speichern ohne Isolierung wieder preiswerter wird und solare Deckungsgrade größer 90 Prozent möglich werden.
- Weiterhin wird deutlich, dass mit wachsender Speicherzeit der spezifische System-Solarertrag immer kleiner wird. Nur mit extremen Aufwendungen für die Wärmedämmung könnte man sich gegen diesen Trend stemmen. Wenn der System-Solarertrag aber nicht beliebig mit der Speicherzeit wächst, wohl aber die Kosten, wozu wird dann überhaupt heute schon so viel über Langzeitspeicherung nachgedacht?

Es gibt einen wichtigen Sonderfall. Wenn der saisonale Speicher Bestandteil des Gebäudes ist, treffen diese Betrachtungen nicht zu. Dann geht die Solarwärme zwar nicht verloren, könnte aber im Sommer auch recht lästig werden.

Solar unterstützte Prozesse brauchen bis zu einem gewissen Substitutionsgrad so gut wie keinen Solarspeicher. Der maximale Substitutionsgrad ohne Solarspeicher könnte meistens noch optimiert werden, zum Beispiel durch die 7-Tage-Arbeitswoche, durch die Verlegung temporärer Pro-



**Abb. 2 · Zwei XL-Solarhäuser in Passivbauweise mit ca. 30 bzw. 80 Litern Kombispeicherkapazität pro Quadratmeter Kollektorfläche und mehr als 50 Prozent solarer Deckung für Warmwasser und Heizung.**

zesse auf die zweite Hälfte der Tagschicht, durch Einbeziehung des Wetters und der Jahreszeiten in die Produktionsplanung usw. Mit der Speicherung von Solarwärme erhöht sich der mögliche Substitutionsgrad oft nochmals rapide, allerdings wachsen auch die Kosten, weshalb mit Speicherung keine Effizienz Wunder zu erwarten sind.

## Effizienz des Systems

In der Literatur findet man verschiedene Quellen, nach denen der Solar-Systemertrag mit der Speichergröße immer nur wächst [2]. Das kann aber nicht sein, denn statt in einen unendlich großen Speicher, könnte man die Solarwärme ebenso gut ohne Gewinn ins Meer gießen. Der Irrtum besteht in der Verwechslung von Solar-Kollektorertrag und Solar-Systemertrag.

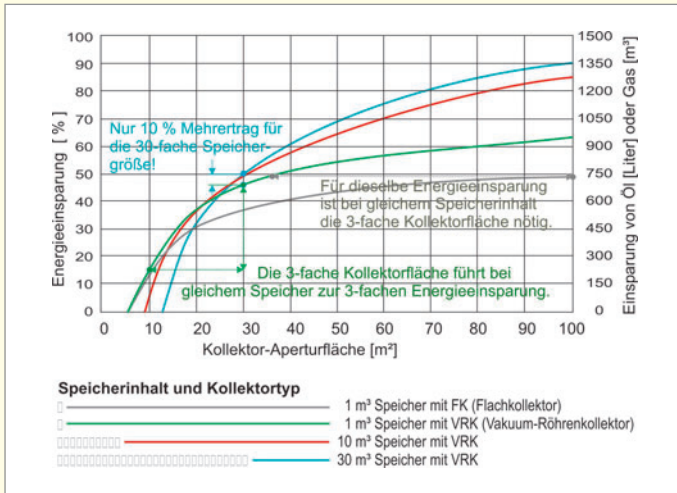
Große Speicher sind besonders kritisch zu betrachten, wenn sie außer mit Solarwärme auch noch mit Wärme aus dem konventionellen Heizsystem gespeist werden. Das findet immer statt, wenn die Systemrücklauftemperatur (Heizkreise usw.) höher ist als die Umgebungstemperatur des Speichers. Dann wird der Speicher mit zunehmender Größe zu einer riesigen Wärmesenke für das Nachheizsystem. Auch wenn es sich nur um Niedertemperaturwärme handelt, stammt diese immer auch wenigstens teilweise aus der Nachheizung. Da der Solar-Systemertrag (anders als der Kollektorertrag) mit der eingesparten konventionellen Energie gleichgesetzt werden muss, kann er nur so lange wachsen, bis die in den Speicher eingebrachte und über die Speicheroberfläche wieder entweichende fossile Energiemenge größer wird als die ebenfalls entweichende Solarenergie. Nur reine solare Vorwärmespeicher haben keinen Speichereintrag von fossiler Rücklaufwärme. Reines solares Vorwärmen aus einem Speicher bedeutet, dass die Systemrücklauftemperatur kleiner ist als die Speicherumgebungstemperatur. Das gleicht aber der Quadratur des Kreises und ist nur selten, zum Beispiel für eine zweistufige Warmwasserbereitung, praktikabel.

Da nur der exergetische Anteil der Solarenergie wieder genutzt werden kann (das ist nur die Wärme, die mindestens mit der vom Verbraucher geforderten Temperatur zur Verfügung steht), dieser aber mit wachsender Speichergröße und Speicherzeit irgendwann wieder abnimmt, muss selbst ohne Systemrücklaufwärme auch der Solar-Systemertrag ab einer bestimmten Speichergröße wieder zurückgehen, nämlich von dem Punkt an, an dem sich Kollektor-Exergiegewinn und Speicherwärmeverluste im mittleren Gleichgewicht be-

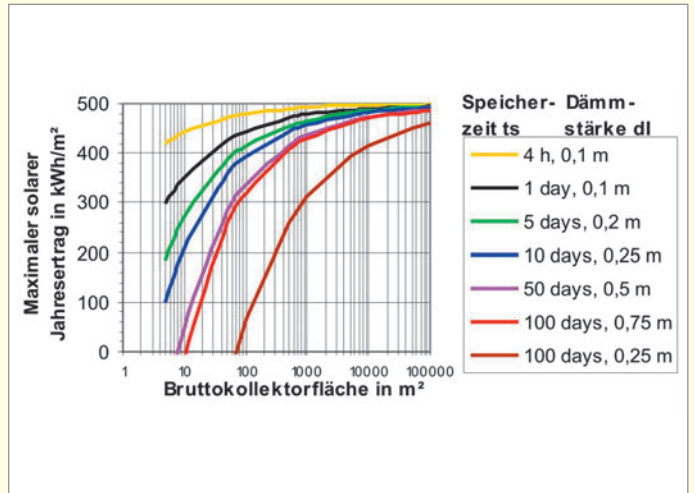
finden. Mittelt man dabei nicht über ein ganzes Jahr, sondern zum Beispiel nur über einen Monat oder sogar nur über eine Woche, so stellt man fest, dass das Maximum des erzielbaren Solar-Systemertrags sehr jahreszeiten- und wetterabhängig ist. Einfacher gesagt, hat fast jeder Speicher immer nur kurzzeitig im Sommer die richtige Größe, die übrige Zeit ist er viel zu groß. Dieses Maximum verändert sich auch mit nahezu allen übrigen Parametern, wie Speichersolltemperatur, Kollektorfläche, Speicherdämmung, Verbrauchsprofil usw. und kann für Niedertemperaturanwendungen sehr flach sein. Aber niemals nähert sich der Solar-Systemertrag mit gegen Unendlich wachsender Speichergröße einem anderen Grenzwert als der Null, abgesehen vom „reinen Vorwärmen“. Dieses Ergebnis deutete sich auch bereits bei früheren Modellen an [3].

Ein weiterer Umstand, der jede Langzeitspeicherung erschwert oder verhindert, ist die Vermischung. Um Speicher nur teilweise beladen bzw. auch wieder entladen zu können, nutzt man die natürliche thermische Schichtung, die auf der ab 4 °C stetig mit steigender Temperatur abnehmenden Dichte und auf der relativ schlechten Wärmeleitfähigkeit von Wasser beruht. Mit einigem Aufwand gelingt es noch, das Wasser nahezu verwirbelungsfrei in die Speicher hinein- und wieder herauszubringen (heiß oben, kalt unten, warm in der Mitte). Für kurze Zeiten im Stundenbereich bleibt die Temperaturschichtung auch beeindruckend stabil erhalten. Doch der Entropiesatz fordert stets seinen Tribut. Durch Thermodiffusion und Wärmeleitung verschwimmen und verschmelzen die Temperaturschichten mehr und mehr. Zusätzlich kriecht die Wärme die Behälterwände hinunter. Durch das Abkühlen der Behälter von außen nach innen sinkt das randnahe Wasser langsam ab und setzt eine gewaltige, aufwärts strebende Kernströmung in Gang. Dieser Thermosiphon ist zwar sehr langsam, aber gewaltig, vergleichbar mit dem Golfstrom. Je nach Speichergröße ist nach einem Tag, einer Woche oder einem Monat die Temperaturschichtung zerstört, ein Großteil der wertvollen Exergie in nutzlose Anergie verwandelt.

Nun könnte man versuchen, die verbliebene Anergie in Form von zu kaltem Wasser mit Hilfe einer Wärmepumpe wieder in Exergie zu verwandeln. Doch dies ginge am Kern des Problems, der Vermeidung der Verluste, im Grunde vorbei, und wäre eher als teure Nachbesserung zu verstehen. Es handelte sich um eine reine Nachheizung. Mit kostbarer Primärenergie oder elektrischem Strom würde dabei versucht, die Entropie im Speicher wieder zu senken,



**Diagramm 3 · Anteilige Energieeinsparung und absolute Öl-/ Gas-Ersparnis für verschiedene Speichergrößen in Abhängigkeit von der Apertur-Kollektorfläche in einem Standard-EFH in Würzburg.**



**Diagramm 4 · Maximaler spezifischer solarer Jahres-Systemgewinn  $Q_{as}$  [kWh / m<sup>2</sup>] für verschiedene Speicherzeiten  $t_s$  und Isolierstärken  $d_i$ .**

sich gegen das Abkühlen durch Vermischung zu stemmen oder zu niedrige Kollektortemperaturen nachzubessern. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass auch die nun minderwertige, mit der Wärmepumpe wieder zu veredelnde Wärme aus dem Speicher genommen wird und dass es sich dabei um ehemals hochwertige Solar- oder um über den Systemrücklauf eingedrungene Primärenergie handelt. In der Gesamtbilanz kann es damit verglichen werden, dass der Backofen oder ein Elektro-Raumheizer angeschaltet wird, weil die Wohnung trotz Zentralheizung nicht warm genug ist, denn außer dem Strom kommt auch hierbei keinerlei Wärme „von außen“ in den Wärmebilanzraum „Wohnung“ hinzu.

**Kostenbetrachtung**

Es ist bekannt [2], dass der Solargewinn zunächst sehr schnell mit der Speichergröße wächst und bereits ab 10 Litern Speicherinhalt pro Quadratmeter Kollektorfläche nur noch langsam größer wird. Eine Verzehnfachung des Speichers bringt dann nur noch sechs Prozent mehr solaren Deckungsgrad für 0,3 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro 50 Liter WW-Tagesbedarf bzw. auch nur zwölf Prozent bei der fünffachen Solarfläche (1,5 m<sup>2</sup>/50 Liter). Eine Verhundertfachung, wie zur saisonalen Langzeitspeicherung notwendig wäre, brächte nicht mehr, sondern (wie im letzten Abschnitt gezeigt) eher weniger. Das gilt für die üblichen Standard-Lastfälle. Wenn jedoch stets alle Solarwärme sofort verbraucht wird, leuchtet es ein, dass jeder Speicher überflüssig ist. Hierzu gibt es bereits gute Beispiele [4, 5]. Diagramm 3 verdeutlicht sehr eindrucksvoll den Zusammenhang zwischen

Kollektorfeld, Kollektortyp, Speichergröße und Energieeinsparung anhand eines standardisierten Einfamilienhauses in Würzburg. Diese oder ähnliche Zahlen sind seit langem bekannt [6, 7]. Offenbar führt eine größere Kollektorfläche fast immer zu deutlich höheren Energieeinsparungen als eine Vergrößerung des Speichers. Vakuumröhrenkollektoren, die mühelos auch höhere Temperaturen erreichen, nutzen dabei den vorhandenen Speicher am besten und erreichen höhere Energieeinsparungen mit wesentlich kleineren Kollektorflächen als Flachkollektoren, deren Wirkungsgrad nur bei schönem Wetter und relativ niedrigen Temperaturunterschieden sehr gut sind.

Die Kosten wachsen mit der Speichergröße ungefähr linear. Im Mittel sind 500 €/m<sup>2</sup> für die komplett installierte Kollektorfläche ein realer Preis ohne Speicher. Wenn man den Wettlauf zwischen Solargewinn und Wärmeverlust nicht aufgibt, sondern größer werdende Speicher für längere Speicherzeiten auch ausreichend immer besser dämmt, dann kostet ein Kubikmeter Wasserspeicher installiert annähernd so viel wie ein Quadratmeter Kollektorfläche. Damit wird klar, dass Speichern den solaren Energiepreis in die Höhe treiben muss. Hier sollen jedoch die Betrachtungen zu Diagramm 1 fortgesetzt werden. Aus der verbleibenden Kollektorfläche, die nicht zur Kompensation von Wärmeverlusten benötigt wird, folgt zunächst ein spezifischer möglicher solarer Jahres-Systemgewinn  $Q_{as}$  (Diagramm 4).

$$(6) \quad Q_{as} = Q_g (1 - f_v)$$

Ein akzeptabler spezifischer Solarpreis ist demnach nur mit sehr großen Solaranla-

gen und/oder mit kurzen Speicherzeiten möglich. Mit Saisonspeicherung ist ein akzeptabler spezifischer Solarpreis nur mit extrem großen Solaranlagen möglich, wie in Dänemark gezeigt wird. Dies ist dort jedoch im Wesentlichen das Ergebnis kluger Energiepreispolitik. Durch eine relativ hohe Besteuerung knapper, wertvoller Primärenergie werden Handlungsspielräume geschaffen, indem der Verbraucher um Jahre früher, als dies nur über die Weltmarktpreise geschehen würde, zum Handeln gezwungen wird.

**Erdwärmesonden- und Aquiferspeicher**

Erdwärmesondenspeicher nutzen das oberflächennahe Erdreich bzw. Gesteinsschichten in Tiefen von 20 bis 100 Metern als Speichermedien. Dazu werden großflächige Wärmeübertrager über zahlreiche Erdbohrungen in den Boden eingebracht. Aquiferspeicher nutzen dazu natürlich vorkommende Grundwasserschichten (Aquifere). Weil oberflächennahe Aquifere häufig der Trinkwassernutzung vorbehalten sind, werden dabei eher Schichten unterhalb von 100 Metern Tiefe genutzt. Die Wärme wird über Brunnenrohre in den Speicher eingebracht und nach Umkehrung der Fließrichtung wieder entnommen. Bei diesen Formen der unterirdischen Speicherung gibt es überhaupt keine feste Speichergrenze in Form einer thermischen Isolierung gegen die Umgebung. Deshalb ist der Anteil der wieder nutzbaren Wärme von der in den Speicher eingebrachten noch viel kleiner als bei Speichern in Form thermisch isolierter Wasserbehälter. Damit ist von vornherein klar, dass diese Speicher nur

- in Kombination mit sehr billiger Überflusswärme,
- für niedrige Temperaturen im Vergleich zur natürlichen Erdwärme und
- für sehr große Speichervolumina

sinnvolle Anwendungen finden können. Aquifer-Wärmespeicher auf hohem Temperaturniveau sind nur bei sehr großen Speichervolumina (minimal 100.000 m<sup>3</sup>) sinnvoll [8].

Obwohl Solarwärme noch nicht unbedingt als billige Überflusswärme gilt, werden Erdspeicherspeicher auch mit Sonnenkollektoren betrieben. Bei ausgezeichneten Anlagen liegen dann die aktuellen Solarwirkungsgrade (= Kollektorwirkungsgrad x Speicherwirkungsgrad) wie folgt: 1. Jahr: 0,029 %, 2. Jahr: 6 %, 3. Jahr: 9 %, 4. Jahr: 10 %, 5. Jahr: 10 % [9]. Von einer Kilowattstunde Sonneneinstrahlung wird also am Ende maximal 1/10 genutzt. Fünf Jahre brauchte der Speicher ungefähr, um mit seiner Umgebung ins thermische Gleichgewicht zu kommen. Etwa 14 Prozent der genutzten Wärmemenge wird zusätzlich noch einmal als Elektroenergie benötigt, hauptsächlich für Pumpen. Je nach Wirkungsgrad zur Gewinnung der Elektroenergie (z. B. 0,35) entspricht das etwa 40 Prozent bzw. 0,04 kW (pro kW Einstrahlung) eingesetzter (oder nicht eingesparter) konventionell gewonnener Wärme. Berücksichtigt man dies auch noch beim Solarwirkungsgrad, dann sinkt dieser auf den Grenzwert von sechs Prozent. Das ist nicht einmal die Hälfte von in der Photovoltaik üblichen Wirkungsgraden. Die mittlere Speichertemperatur beträgt dabei übers Jahr etwa 50 °C. Auf die Rentabilität solcher Anlagen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Um den oben genannten Mindestrentabilitätsanforderungen für Saisonspeicher genügen zu können, hätte diese Anlage mindestens 25-mal größer sein müssen.

## Zusammenfassung

Zur Speicherung von Wärme mit Heißwasser kann Langzeitspeicherung erst ab exotischen Speichergößen von über 200.000 m<sup>3</sup> und Kollektorflächen ab etwa 50.000 m<sup>2</sup> sinnvoll werden, weil erst dann Oberflächen-Wärmeverluste allmählich vernachlässigbar sind. Bei wärmedämmten Erdspeichern dürfen neben den hohen Kosten auch die Risiken nicht unterschätzt werden. Wenn die Isolierung nur mittelmäßig ist oder ganz verdirbt, zum Beispiel aufgrund von Speicherleckagen oder einsinkendem Grund- oder Oberflächenwasser, droht nahezu ein Totalverlust.

Saisonale Speicherung mit vergrabenen Betonspeichern ist auch nicht nachhaltig. Während bei der übrigen Solaranlage inzwischen energetische Amortisationszeiten von unter 2 Jahren möglich sind, schlagen beim Erdspeicher zusätzlich gewaltige Tiefbau- und Transportaufwendungen in der Energiegesamtbilanz zu Buche. Mit Kurzzeitspeichern bis zu einem halben Monat Speicherzeit kann für große Solaranlagen ab etwa 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche der solare Deckungsgrad erfolgreich gesteigert werden, wenn wesentlich längere Amortisationszeiten akzeptabel sind. In Kombination mit Kurzzeitspeichern für 1 bis 5 Tage könnten bei den meisten solaren Nieder- und Mitteltemperaturanwendungen schätzungsweise auch weit über 50 Prozent der fossilen Energie ersetzt werden. Das ist derzeit aber nur mit Kollektoranlagen mit Wasser als Wärmeträger möglich, weil dort die thermische Stagnation der Solaranlage kein Problem darstellt.

Manch großer Speicher ist auch nicht zum Speichern geplant, denn sonst würde man versuchen, immer mit Höchsttemperatur weit über dem Sollwert ein Maximum an Speicherkapazität zu schaffen. Stattdessen werden große Speicher kaum bei Solltemperatur beladen. Erst wenn der ganze Speicher bereits Solltemperatur hat, beginnt man mit dem Speichern. Es ist leicht einsehbar, dass auf diese Weise gar nicht oder sehr unwirtschaftlich gespeichert wird, aber enorme Wärmeverluste entstehen. Man kann große Speicher deshalb auch als getarnten Überhitzungsschutz begreifen. Das Beherrschen der Stagnation ist die Voraussetzung dafür, den Speicher nach dem Ertrags-/Investitions-Optimum auszulegen zu können und dabei bewusst auf Sommerüberschüsse oder Teile des Wochenendertrags zu verzichten, als unbedingt die Stagnation vermeiden zu müssen. Bis etwa 20 m<sup>2</sup> Kollektorfläche muss nahezu jeder Versuch, mehr als eine Eintages-Speicherung zu nutzen, an den Wärmeverlusten scheitern. Bevor trotzdem höhere solare Deckungsgrade und Speichernutzungsgrade erreichbar sind, müssen erst noch die Probleme mit vollen Speichern im Sommer gelöst werden. Aber auch dazu gibt es bereits erprobte Systeme [10]. Neue Perspektiven zur Minimierung von Speichern trotz hoher solarer Deckungsgrade eröffnen sich auch zunehmend, je günstiger und effizienter die Möglichkeiten zum solaren Kühlen werden, weil mit kombiniertem Kühlen und Heizen der große zeitliche Widerspruch zwischen Solarangebot und Solarbedarf endlich aufgehoben werden kann [5]. Man wird in der Zukunft auch aus der Über-

schusswärme Strom erzeugen, wenn trotz kleiner Speicher auch bei ganz individuellen und ungünstigen thermischen Lastprofilen stets hohe solare Nutzungs- und Wirkungsgrade erzielt werden sollen.

Das Potenzial zur Nutzung thermischer Solarwärme ist noch in keinem Land der Erde auch nur zu einem Tausendstel ausgeschöpft. Beherrscht man technisch die thermische Stagnation, dann wird für Anwendungen mit solaren Deckungsgraden von bis zu etwa zehn Prozent gar keine oder nur eine Kurzzeitspeicherung benötigt. Erst nach wenigstens einer weltweiten Verhundertfachung der solarthermischen Kollektorfläche wird demnach die Zeit für Langzeitspeicherung von Solarwärme wirklich reif sein, auch wenn man in Dänemark damit heute schon erfolgreich begonnen hat. ■

## Literatur

- [1] Kreis, O. (2005), Untersuchung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, Studienarbeit Nr. 2005-3, ITW der UNI Stuttgart
- [2] Remmers, K.H. (1999), Große Solaranlagen, SOLARPRAXIS, S. 66 ff., ISBN3-901626-16-6
- [3] Streicher, W. (1996), Teilsolare Raumheizung, Auslegung und hydraulische Integration, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, 8200 Gleisdorf, Postfach 142, ISBN 3-90-1426-06-3 (vergriffen)
- [4] Meißner, R., Energetisch spektakulär: Panorama-Sauna Holzweiler, SHT 12/2008 (S. 76)
- [5] Meißner, R., SHT 4/2008 (S. 54), Einfach ist besser, die größte Vakuumröhrenkollektoranlage steht in Deutschland
- [6] H. Drück, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: Potenziale innovativer Speichertechnologien für solare Kombianlagen, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (2004)
- [7] H. Drück, H. Müller-Steinhagen: Innovative Speicherkonzepte für Kombianlagen mit hohen solaren Deckungsanteilen, Tagungsband Solarthermisches Symposium Staffelstein 2003
- [8] <http://www.thema-energie.de/energie-im-ueberblick/technik/speicher-netze/energiekonzept-spreebogen/aquiferspeicher-am-beispiel-reichstag.html> oder BINE projektinfo 09/03
- [9] Sibbitt, B., McClenehan D., Djebbar, R., Thornton, J., Wong, B., Carriere, J. and Kokko, J. (2011), Measured and simulated performance of a high solar fraction district heating system with seasonal storage
- [10] Abrecht, S., Griebhaber, W., Kettner, C., Meißner, R., Wo sich Spreu und Weizen trennen, Teil 1-3, HeizungsJournal 6/2008, 7-8/2008 und 9/2008