

Dr. rer. nat. Rolf Meißner *)

Wie groß dürfen Solarspeicher sein?

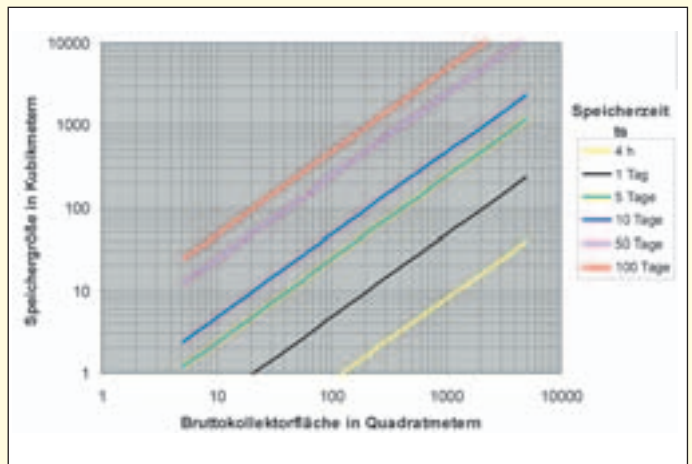
Zusammenfassung

Solarwärme kann übers Jahr nur während einer kurzen Zeit gewonnen werden. Oft wird sie zu ganz anderen Zeiten gebraucht, als sie preiswert zur Verfügung steht. Dann muss sie gespeichert werden. Doch dabei wird sie umso teurer, je länger diese Speicherung anhalten soll, denn der Verlust von Wärme aus dem Speicher ist in der Regel ein ununterbrochener Prozess. Der Autor befasst sich mit der Frage, ob es überhaupt möglich und sinnvoll ist, Solarwärme lange Zeit zu speichern und kommt dabei zu folgenden Ergebnissen:

- Besonders 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 absoluten Wärmeverluste.
- Nur Kurzzeitspeicher haben bei üblichen Speicherisoliertärken akzeptable Wärmeverluste im Verhältnis zum Solarertrag.
- Ein akzeptabler spezifischer Solargewinn ist nur mit sehr großen Solaranlagen und/oder mit kurzen Speicherzeiten möglich. Der Versuch einer Langzeitspeicherung über 10 Tage hinaus kann mit kleinen Kollektorflächen bis ca. 50 m² überhaupt nicht gelingen.
- Echte saisonale Speicherung (z. B. 100 Tage) ist nur mit Dämmstärken ab etwa 75 cm möglich.
- Mit wachsender Speichergröße (bzw. Speicherzeit) nimmt der spezifische System-Solarertrag ständig ab. Ein akzeptabler spezifischer Solarpreis ist demnach mit Langzeitspeicherung überhaupt nicht möglich.

Wozu dann aber überhaupt noch länger über die Speicherung mit Wasser nachdenken, die über eine Woche hinausgeht?

Diagramm 1
Speicherinhalt V_s
in Kubikmetern
in Abhängigkeit von
der Bruttokollektor-
fläche und von der
Speicherzeit.



Der Wettlauf zwischen Solargewinn und Wärmeverlust

Die momentan preiswerteste und technisch am meisten genutzte Form der Solarwärmespeicherung für Temperaturen bis ca. 120°C ist die fühlbare Wärme mit Heißwasser. Andere Speicherformen wie die Nutzung der Phasenwandlungswärme beim Schmelzen bzw. Erstarren oder die Bindungswärme bestimmter Stoffe an großen mikroporösen Strukturen wie Zeolithen oder Silikagelen sollen hier nicht untersucht werden.

Um das Thema zu vereinfachen, sollen nur die Speicherbehälter untersucht werden. Jeder Speicher hat einen Inhalt, eine Oberfläche und eine bestimmte Form. Betrachtet man weiter vereinfachend einmal nur zueinander ähnliche Formen, wie z. B. 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 .

$$(1) A_B = 5,6V_s^{2/3}$$

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 z. B. $Q_d=3$ kWh/m²d als Maßstab genommen werden. Auch der maximale Kollektorjahresertrag ist von vielen Parametern abhängig. Auch hier soll ein überdurchschnittlich guter Wert von $Q_a=500$ kWh/m²a als vernünftiger Maßstab genommen werden. Diese und alle folgenden spezifischen Angaben beziehen

sich auf die Bruttokollektorfläche und auf hervorragende Kollektoren mit einem Brutto-Aperturflächenverhältnis nahe der Eins.

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

$$(2) V_s = \frac{Q_s t_s}{1,16 [\text{kWh} / \text{m}^3 \text{K}] (T_{\text{max}} - T_R)} \quad [\text{m}^3/\text{m}^2]$$

Mit der Speichergröße V_s stehen mit (1) auch die Speicherbehälteroberfläche A_B und der Speicherdurchmesser $D_s = 2(V_s/\pi)^{1/3}$ 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.

$$(3) A_s = A_B \left(1 + 4 \frac{d_i}{D_s}\right)$$

Aus der Speicher-oberfläche A_s , der Dämmstärke d_i , dem Wärmeleitwert des Dämmmaterials λ_i und der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Außentemperatur ΔT_v folgt die Wärmeverlustleistung Q'_v , mit welcher der Speicher ständig Wärme verliert. ΔT_v soll mit 40K 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 Außentempera-



*) Dr. rer. nat. Rolf Meißner ist Physiker und befasst sich als Produktmanager und Entwickler seit 1990 bei PARADIGMA mit der Speicherung von Solarwärme für solarthermische Groß- und Kleinanlagen. Fax: 072 02 / 92 21 25 r.meissner@paradigma.de

tur meistens auf Raumtemperatur oder auf die mittlere Erdreichtemperatur begrenzt ist.

$$(4) Q'_v = \frac{\lambda_l A_s \Delta T_v}{d_l}$$

Der Wärmeleitwert λ_l kann nicht ohne weiteres pauschaliert werden. Nur bei kleinen Speichern kommen auch hochwertige Dämmstoffe wie EPS-, EPP-, Melamin- oder PU-Hartschäume mit mittleren Wärmeleitwerten (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 z. B. Schaumglas-schotter 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 ca. 0,6 W/mK verschlechtern (1). Weil Pufferspeicher nur selten mit hochwertigen Dämmstoffen ausgestattet werden, soll bei den folgenden Betrachtungen der Wärmeleitwert λ_l 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 $\lambda_l=0,08$ W/mK bei jeder Speichergröße immer noch um eine Idealisierung handelt.

Die Verlustleistung Q'_v führt übers Jahr (8.760 Stunden) zu einem vorhersagbaren Wärmeverlust Q_{va} . Um diesen Wärmeverlust gut zu veranschaulichen, soll er als Kollektorflächenanteil f_v ausgedrückt werden, der verdeutlicht, welcher Anteil von der gesamten Kollektorfläche F_k lediglich der Kompensation der Wärmeverluste dient (Diagramm 2). Dies bedeutet leider nur theoretisch, aber nicht praktisch, 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.

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

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 m² 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, verlustkompensierende Solaranlage.

- Jede Spardämmung mit weniger als 15 cm Dämmstärke führt übers Jahr zu inakzeptabel hohen Verlusten.
- Der Versuch einer Langzeitspeicherung über 10 Tage hinaus kann mit kleinen Kollektorflächen bis ca. 50 m² überhaupt nicht gelingen.
- Bei echter saisonaler Speicherung (z. B. 100 Tage) kommen nur sehr große Dämmstärken ab etwa 75 cm als sinnvoll in Frage. Wenn dabei die Dämmung jedoch nur etwas feucht wird, scheitert ein solches Projekt, weil sich die hier angenommenen Wärmeverluste rasch vervielfachen. Die völlige Vermeidung von Grundwasserkontakten ist außerordentlich schwierig und bisher erst selten gelungen.
- Weiterhin wird deutlich, dass mit wachsender Speichergröße (bzw. Speicherzeit) der spezifische System-Solarertrag (pro Quadratmeter Kollektorfläche) unter der Anwendung üblicher Dämmstandards nicht, wie oft geglaubt wird, immer weiter zunimmt, sondern 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 dann überhaupt noch länger über Langzeitspeicherung nachdenken?

Es gibt einen wichtigen Sonderfall. Wenn der saisonale Speicher Bestandteil der Gebäudearchitektur ist und seine gesamten Wärmeverluste der Gebäudeheizung zukommen, treffen diese Betrachtungen nicht zu. Dann wäre es aber sehr komfortabel, wenn mit einer variablen Dämmung die Wärmeverluste im Sommer reduziert und die übrige Zeit reguliert werden könnten, weil sonst die Solarwärme zwar nicht verloren geht, aber u. U. im Sommer auch lästig werden könnte.

Jeder Prozess, der Solarwärme nutzen kann, braucht bis zu einem gewissen Substitutionsgrad so gut wie gar keinen Solarspeicher. Der maximale Substitutionsgrad ohne Solarspeicher könnte meistens noch optimiert werden, z. B. durch die 7-Tage-Arbeitswoche, durch die Verlegung temporärer Prozesse 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.

Klassische Effizienzbetrachtung

In der Literatur findet man verschiedene Quellen, nach denen der Solar-Systemer-

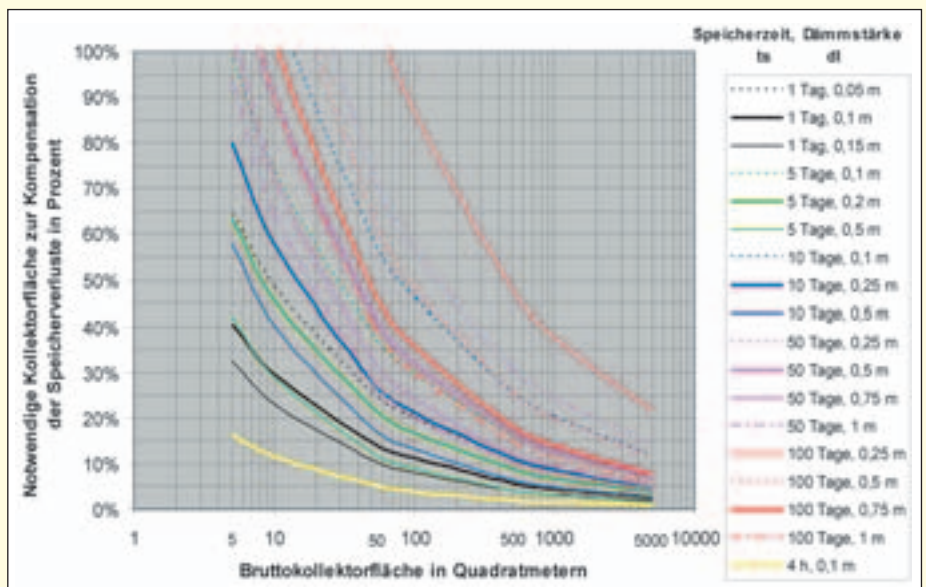


Diagramm 2 • Zur Kompensation der Speicherverluste notwendige Kollektorfläche in Prozent (=100f_v) für verschiedene Speicherzeiten t_s und Isolierstärken d_l. Die qualitativen Schlussfolgerungen aus diesem Diagramm sind nicht neu und deshalb auch nicht verwunderlich:

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

trag mit der Speichergröße immer nur wächst (2). Das kann aber nicht sein, denn statt in einen unendlich großen Speicher, könnte man die Solarwärme eben so gut ohne Gewinn ins Meer gießen.

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 Kollektorsertrag) 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 Vorwärmerspeicher 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, z. B. 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 Speicherverluste im mittleren Gleichgewicht befinden. 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 er-

zielbaren 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 Niedertemperaturanwendung 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 (3) an.

Ein weiterer Umstand, der jede Langzeitspeicherung erschwert oder verhindert, ist die Vermischung. Um Speicher nur teilweise be- 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, 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 Thermoeffusion 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, ganz vorbei, sondern wäre eher als sehr kostenintensive 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, 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

Im Bereich kleiner Speicher zeigen die Quellen, z. B. (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 Speichervolumens bringt dann nur noch 6% mehr solaren Deckungsgrad für 0,3m² Kollektorfläche pro 50 Liter WW-Bedarf bzw. auch nur 12% bei der 5fachen Solarfläche. Eine Verhundertfachung, wie zur saisonalen Langzeitspeicherung notwendig wäre, brächte nicht mehr, sondern (wie im letzten Abschnitt gezeigt) eher weniger. Das gilt für die üblichen Standardlastfälle. Wenn jedoch stets alle Solarwärme sofort verbraucht wird, leuchtet es ein, dass jeder Speicher überflüssig ist. Hierzu gibt es bereits gute Beispiele (4, 5).

Die Kosten wachsen mit der Speichergröße ungefähr linear. Im Bereich solarthermischer Großanlagen sind 500€/m² für die komplett installierte Kollektorfläche ein realer Preis ohne Speicher. Dieser soll ausnahmsweise auch einmal für Kleinanlagen gelten, weil ja vernünftig nichts dagegen spricht. 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 immer mindestens 600 €. Damit wird klar, dass Speichern den solaren Energiepreis in die Höhe treiben muss. Dies kann auch aus den Quellen leicht abgeleitet werden. Hier sollen jedoch die Betrachtungen zu Diagramm 1 fortgesetzt werden. Aus der verbleibenden Kollektorfläche, die nicht zur Kompensation von Wärmeverlusten benö-

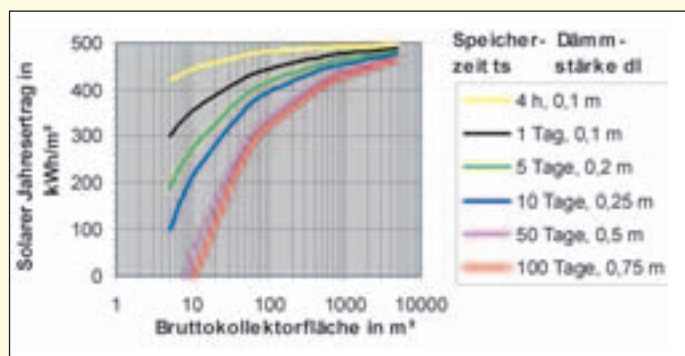


Diagramm 3
Spezifischer solarer Jahres-Systemertrag Q_{as} [kWh/m²] für verschiedene Speicherzeiten t_s und Isolierstärken d_i

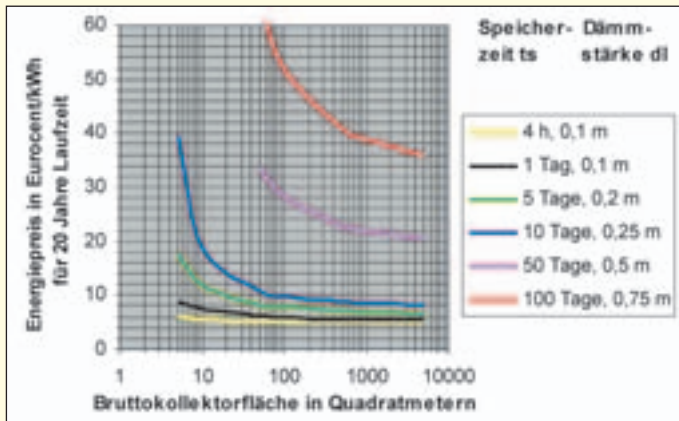


Diagramm 4
Energiepreis P_{20} in
€Ct/kWh (20 Jahre
Laufzeit) für
verschiedene
Speicherzeiten t_s
und Isolierstärken d_i

tigt wird, folgt zunächst ein spezifischer möglicher solarer Jahres-Systemgewinn Q_{as} (Diagramm 3). Ein akzeptabler spezifischer Solarpreis ist demnach mit Langzeitspeicherung überhaupt nicht möglich.

$$(6) Q_{as} = Q_a (1 - f_v)$$

Ein akzeptabler spezifischer Solargewinn ist demnach nur mit sehr großen Solaranlagen und/oder mit kurzen Speicherzeiten möglich. Aus Q_{as} folgt ein absoluter Jahresgewinn und daraus mit den genannten Kollektor- und Speicherpreisannahmen und der Annahme einer 20-jährigen Laufzeit ein Energiepreis P_{20} (Diagramm 4). Ein akzeptabler spezifischer Solarpreis ist demnach mit Langzeitspeicherung überhaupt nicht möglich.

Tatsächlich wachsen alle Kurven nach links hin zu kleinen Kollektorflächen noch viel rascher, als Diagramm 4 widerspiegelt, weil der Investor für kleine Solarflächen tatsächlich mehr als den oben angegebenen Kollektorflächen-Fixpreis zahlen muss.

Fazit, Ausblick

Zur Speicherung fühlbarer Wärme ist kein Wärmeträger praktischer und natürlicher als Wasser. Trotzdem ist eine Langzeitspeicherung von Heißwasser auf unabsehbare Zeit nicht rentabel. Neben den hohen Kosten dürfen auch die Risiken nicht unterschätzt werden. Wenn die Isolierung nur

mittelmäßig ist oder ganz verdirbt, z.B. aufgrund von Speicherleckagen oder einsickerndem 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 ca. 100 m² 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 % der fossilen Energie ersetzt werden, wenn die thermische Stagnation der Solaranlage kein Problem darstellt.

Bei Kleinanlagen bis ca. 20 m² Kollektorfläche muss nahezu jeder Versuch, mehr als eine Eintagesspeicherung zu nutzen, an den Wärmeverlusten scheitern. Bevor trotzdem höhere solare Deckungsgrade und Speichernutzungsgrade erreichbar sind, müssen hier erstmal noch die Probleme mit vollen Speichern im Sommer gelöst werden. Aber auch dazu gibt es bereits erprobte Systeme (6). 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 Überschusswärme Strom erzeugen müssen, wenn trotz kleiner Speicher auch bei ganz individuellen und ungünstigen thermischen Lastprofilen stets hohe solare Nutzungs- und Wirkungsgrade erzielt werden sollen. ■

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 oder http://www.paradigma.de/mediadb/2803638/2803639/FESTO_SHT.pdf
- (6) (3) Abrecht, S., Griebhaber, W., Kettner, C., Meißner, R., Wo sich Spreu und Weizen trennen, Teil 1-3, Heizungsjournal 6/2008 oder http://www.paradigma.de/mediadb/2803615/2803616/Kollektorvergleich_HZJ.pdf, 7-8/2008 (S. 38) oder http://www.paradigma.de/mediadb/3631256/3631257/DerWertvonSolarwrme_HZJ_07_08.pdf, 9/2008 oder http://www.paradigma.de/mediadb/3631260/3631261/Kollektorertge_HZJ.pdf