

Wie viel Solarwärme kommt aus Kombispeichern am Wasserhahn noch an?

von Dr. rer. nat. Rolf Meißner

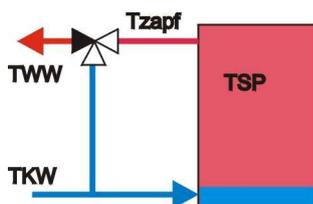
Einleitung und Zusammenfassung

Auf dem Solarmarkt wird die Vielfalt der Kombispeicher immer größer. Dies sind fast ausschließlich Heizungspufferspeicher, bei denen die Trinkwassererwärmung irgendwie im Durchlauf erfolgt. Mehr oder minder zu Recht nennen sich deshalb immer mehr dieser Speicher auch „Frischwassersysteme“. Der Begriff Kombispeicher drückt aus, dass sie nebenbei auch die Heizung solar unterstützen können. Der folgende Artikel geht der Frage nach, wie viel Trinkwasser aus verschiedenen Funktionstypen von Kombispeichern bei gleichem Solarwärmeinhalt und gleichen Ausgangsbedingungen maximal gezapft werden kann, ohne dass die Nachheizung bemüht werden muss. Es handelt sich in jedem Fall um die theoretische Abschätzung *nach oben*. In der praktischen Ausführung können die Ergebnisse aufgrund der getroffenen Vereinfachungen allenfalls gerade so gut sein wie unten beschrieben, ausnahmslos sind sie jedoch schlechter.

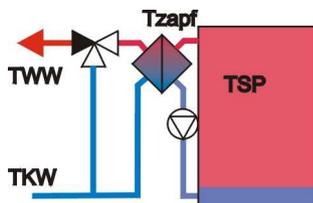
Trotz des kaum noch überschaubaren Spektrums von Kombispeichern kann man diese nach ihrer Funktionsweise klassifizieren. Die Menge der ohne Nachheizung zur Warmwasserbereitung nutzbaren Solarwärme, diese Eigenschaft soll hier „solarer Puffernutzungsgrad“ genannt werden, reicht bei den untersuchten Kombispeicherklassen von weniger als 10 % bei speziellen innen liegenden Gleichstromwärmetauschern bis zu über 90 % bei ideal funktionierenden externen Gegenstromwärmetauschern. Die am Markt sehr häufig vertretenen Kombispeicher mit sehr großen innen liegenden Wärmetauschern erreichen nach den Gesetzen der Physik nur Puffernutzungsgrade von maximal 30 %. Tank-in-Tank-Speicher erreichen immerhin noch zwischen 40 und 50 %. Der praktische Nachteil von Kombispeichern mit geringem Puffernutzungsgrad besteht darin, dass sie viel öfter den Kessel zur Verstärkung und Nachladung einschalten müssen, die schlechtesten von ihnen bereits nach kleinsten Zapfmengenentnahmen. Das nimmt der Solarwärme die Vorfahrt und sorgt für einen wesentlich höheren Öl- oder Gasverbrauch, besonders außerhalb der Heizperiode. Bei jedem Flachkollektor dämpft ein schlechter solarer Pufferwirkungsgrad zusätzlich drastisch den Kollektorwirkungsgrad, weil die zur Aufrechterhaltung des Komforts erforderlichen Durchschnittstemperaturen viel höher sind als bei Kombispeichern mit einem hohen Puffernutzungsgrad.

Acht verschiedene Kombispeicherklassen

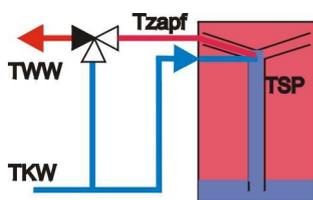
Betrachtet werden sollen 8 verschiedenartige Speicher mit gleichem Inhalt, die alle von unten bis oben gleichmäßig auf eine Speichertemperatur T_{SP} erwärmt sind. Aus allen soll nun so lange Warmwasser mit einer Zapftemperatur T_{zapf} ($T_{SP} \geq T_{zapf} \geq T_{WW}$) entnommen werden, bis die Zapftemperatur einen Sollwert T_{WW} unterschreitet. Die entnommene Warmwassermenge mit der variablen Temperatur $T_{zapf} \geq T_{WW}$ wird auf die Menge normiert, die exakt mit der Temperatur T_{WW} hätte entnommen werden können. Mit der Kaltwassertemperatur T_{KW} tritt das Trinkwasser in den Speicher ein. Die Zapfrate soll moderat sein (z. B. max. 12 Liter pro Minute). Es soll aber später noch erwähnt werden, wie stark die verschiedenen Ergebnisse von der Zapfrate abhängen, bei größerer Zapfrate also schlechter als hier dargelegt ausfallen würden. Die folgenden Skizzen bilden die 8 Kombispeicherklassen auf das Wesentliche reduziert ab. Ein idealer Mischautomat liefert Warmwasser exakt mit der Temperatur T_{WW} , sorgt also für die Normierung auf T_{WW} .



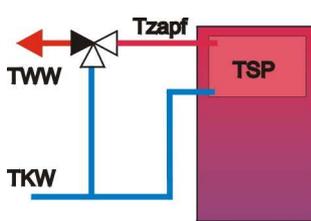
1. Als Referenz dient ein Warmwasserspeicher. Idealisiert wird hier wie auch bei allen weiteren Speichern angenommen, dass er ohne Verwirbelung und Vermischung des unten eintretenden Kaltwassers von oben geleert wird. Auf diese Weise gewinnt man eine um den Faktor $(T_{SP}-T_{KW})/(T_{WW}-T_{KW})$ größere Menge Warmwasser mit der Temperatur T_{WW} als Heißwasser mit der Temperatur T_{SP} anfangs im Speicher ist – mehr ist unter keinen Umständen möglich.



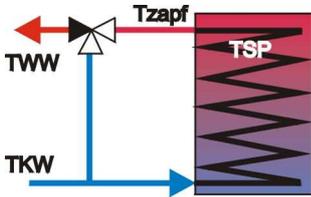
2. Der Speicher ist ein Puffer, dessen Heißwasser durch einen Gegenstromwärmetauscher gepumpt wird. Plattenwärmetauscher sind sehr effizient. Es ist bei moderater Zapfrate gut möglich, eine Temperaturdifferenz von minimal 5 Kelvin zwischen T_{SP} und T_{zapf} zu halten. Zur mathematischen Vereinfachung soll dabei der Warmwasservolumenstrom genauso groß sein wie der gepumpte Speicherwasserstrom, so dass auch die Speicherrücklauftemperatur T_{PR} gerade 5 K über T_{KW} liegt.



3. Ein Pufferspeicher hat einen effizienten internen Gegenstromwärmetauscher, der beim Zapfen einen Schwerkraftumlauf des Speicherwassers erzeugt, und zusätzlich einen nachgeschalteten, ganz oben angeordneten Glattrohrwärmetauscher. Anders als bei Speicher 2 wird der Schwerkraftumlauf immer kleiner, je weiter die Entladung des Speichers voranschreitet. In guter Näherung kann man gemittelt mit der dreifachen Temperaturdifferenz wie bei Speicher 2 rechnen.

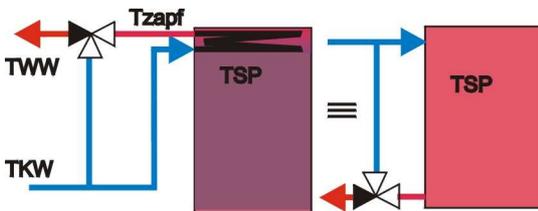


4. Tank-in-Tank-Speicher: Im Innern eines Puffers befindet sich ein kleiner Warmwasserspeicher, der wie der Puffer auf die Temperatur TSP erwärmt ist. Er wird wie Speicher 1 geleert, nimmt dabei aber auch wieder eine gewisse Wärmemenge vom Puffer auf, weshalb mehr Warmwasser gezapft werden kann als im Innentank ist. Interessanterweise kann der Puffer dabei bis unter den Wert TWW abkühlen, da der Wärmetausch zwischen Puffer und Warmwasserspeicher zeitlich verzögert geschieht.



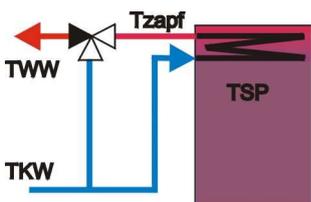
5. Ein Puffer ist von oben bis unten gleichmäßig mit einem sehr großen innen liegenden Gleichstrom-Warmwasser-Wendelwärmetauscher ausgestattet. Um den Druckverlust akzeptabel klein zu halten, muss dieser Wärmetauscher weite Rohre und damit sowohl einen beträchtlichen Inhalt als auch ziemlich schlechte Wärmeübertragungswerte aufweisen. Weil der untere Teil der Wärmetauscherwendel bereits als Warmwasser-Vorwärmung arbeitet, wird der Puffer etwas besser genutzt als bei einer flachen Wendel (vgl. auch mit 7) – allerdings nur aufgrund der enormen Größe des Wärmetauschers (vgl. auch mit 8.) und nur, wenn der Puffer von oben bis unten durchgeladen ist. Als Wärmespeicher verhält sich die Wendel wie Speicher 4 (Tank-in-Tank). Beide Eigenschaften tragen zur Zapfleistung bei. Mitunter ist auch bei diesen Speichern von Frischwasserbereitung die Rede, doch das ist meistens irreführend und ungerechtfertigt, weil der Trinkwasserinhalt u. U. mehr als 10-mal größer ist als bei wirklichen Frischwasserspeichern wie 2, 3, 7 oder 8. Es ist bei moderater Zapfrate immerhin möglich, eine Temperaturdifferenz von etwa 10 Kelvin zwischen TSP und T_{zapf} zu halten.

aufgrund der enormen Größe des Wärmetauschers (vgl. auch mit 8.) und nur, wenn der Puffer von oben bis unten durchgeladen ist. Als Wärmespeicher verhält sich die Wendel wie Speicher 4 (Tank-in-Tank). Beide Eigenschaften tragen zur Zapfleistung bei. Mitunter ist auch bei diesen Speichern von Frischwasserbereitung die Rede, doch das ist meistens irreführend und ungerechtfertigt, weil der Trinkwasserinhalt u. U. mehr als 10-mal größer ist als bei wirklichen Frischwasserspeichern wie 2, 3, 7 oder 8. Es ist bei moderater Zapfrate immerhin möglich, eine Temperaturdifferenz von etwa 10 Kelvin zwischen TSP und T_{zapf} zu halten.

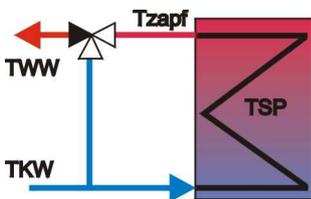


6. Ein Warmwasserspeicher wird scheinbar mit verkehrten Anschlüssen versehen. Kaltwasser strömt oben hinein und Warmwasser wird unten entnommen. Das erscheint sinnlos, weil der Warmwasserspeicher vollständig vermischt wird. Doch dieses System ist real. In China und anderen Ländern mit instabiler Wasserversorgung, wo es vielfach zum Einsatz kommt, ist es wichtiger, den Speicher auch als Reservoir

nutzen zu können, das bei Wasserausfall ganz einfach geleert werden kann, als auf thermische Schichtung zu achten. Physikalisch ist dieses System mit einem Puffer identisch, in dessen oberstem Bereich sich ein innen liegender Warmwasser-Wärmetauscher mit unendlich großer Tauscherleistung befindet – der perfekte oben und innen liegende Gleichstromwärmetauscher sozusagen, der besonders einfach mathematisch zu modellieren ist und sich deshalb als Modellvorlage für alle Kombispeicher mit Gleichstromwärmetauscher bestens eignet.



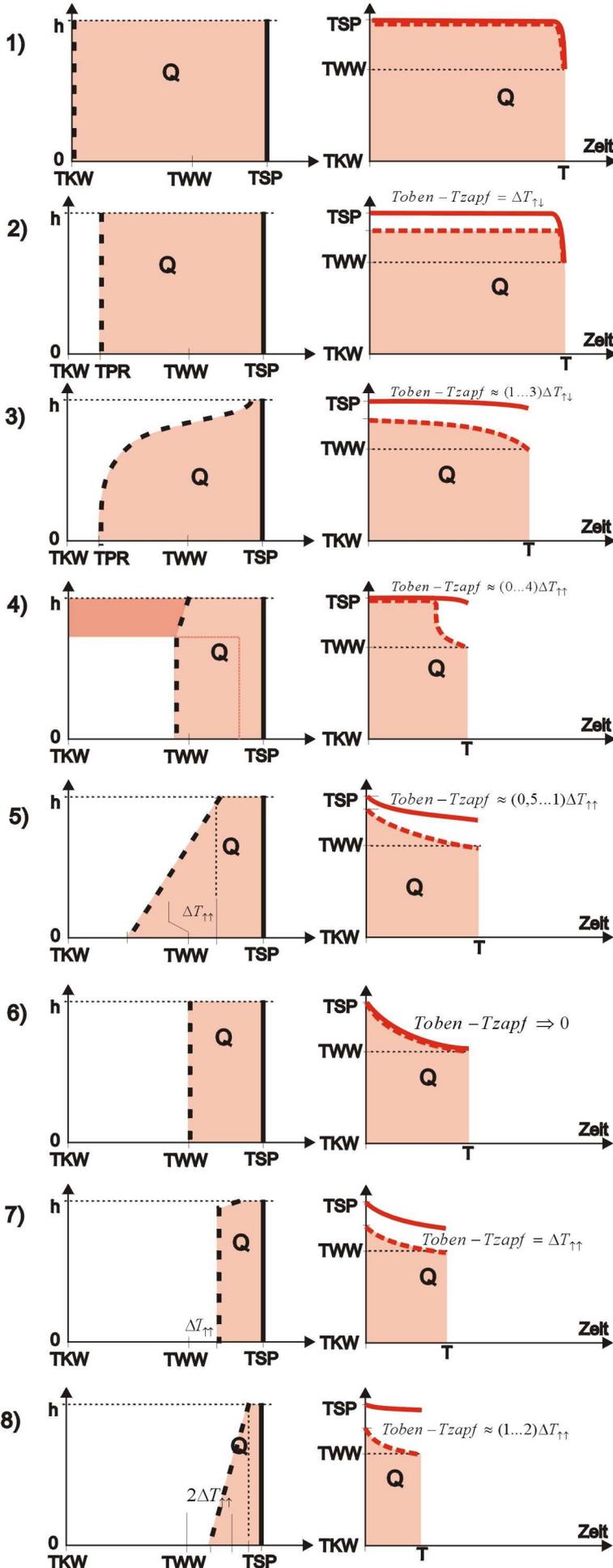
7. Ein Puffer ist in seinem obersten Bereich mit einem innen liegenden Gleichstrom-Wärmetauscher mit vernachlässigbarem Inhalt ausgestattet, stellt also einen echten Frischwasserspeicher dar.



8. Ähnlich wie bei Speicher 5 zieht sich ein innen liegender Gleichstrom-Warmwasser-Wendel-Wärmetauscher durch den gesamten Puffer, jedoch mit vernachlässigbarem Inhalt und derselben kleinen Wärmetauscherfläche wie bei Speicher 7 – sozusagen eine Synthese aus Speicher 5 und 7. Die Warmwasser-Vorwärmung im unteren Teil der Wendel nützt hier nichts, weil mit fortschreitender Abkühlung des Puffers der Temperaturgradient für immer größere Anteile des Wärmetauschers schwindet und die Übertragungsleistung überproportional zusammenbricht. Speicher 8 zeigt somit ungefähr, was von Speicher 5 übrig bliebe, wenn es wirklich ein Frischwasserspeicher wäre.

Speicher 8 zeigt somit ungefähr, was von Speicher 5 übrig bliebe, wenn es wirklich ein Frischwasserspeicher wäre.

Grafische Beurteilung von Ladezustands- und Zapfkurven



Die Skizzen verdeutlichen auf zwei verschiedene Betrachtungsweisen, was beim WW-Zapfen aus einem Kombispeicher passiert. Die Flächen beider Diagramme repräsentieren Wärmemengen und sind deshalb nichts anderes als zwei verschiedene Darstellungen des Energiesatzes.

Die linken Diagramme zeigen die Verteilung der Temperatur über der Höhe des Speichers zu Beginn der Zapfung (durchgezogene Linie) und zu deren Ende (gestrichelte Linie). Die markierten Flächen entsprechen den entnommenen Wärmemengen gemäß

$$Q \propto \int_0^h (TSP_{\text{Beginn}} - TSP_{\text{Ende}}) dh'$$

Die rechte Spalte zeigt den zeitlichen Verlauf der oberen Speichertemperatur (durchgezogene Linie) und der Zapftemperatur (gestrichelte Linie) während der Zapfung bis zum Abbruchkriterium $T_{zapf} \leq T_{WW}$. Die markierten Flächen entsprechen ebenfalls den entnommenen Wärmemengen gemäß

$$Q \propto V'_{zapf} \int_0^T (T_{zapf}(t) - TKW) dt,$$

wobei V'_{zapf} als konstant angenommen wird und T jeweils der Zeitpunkt ist, bei dem die Zapftemperatur kleiner wird als T_{WW} . Anmerkung: Da V'_{zapf} zuvor als Volumenstrom aus dem Speicher definiert wurde und konstant sein soll, muss der am Wasserhahn wahrgenommene Volumenstrom gemäß dem Mischfaktor $V'_{WW} = V'_{zapf} \frac{TSP - TKW}{TWW - TKW}$ größer sein bzw. außer bei den Speichern 1 und 2 während der Zapfung ständig abnehmen und erst genau am Abbruchkriterium $T_{zapf} \leq T_{WW}$ den Wert V'_{zapf} erreichen. Praktisch wird aber der Zapfvolumenstrom nicht nachreguliert, solange der Temperaturzusammenbruch unter der Dusche noch nicht zu sehr nervt. In der Realität sind die Temperaturabfälle der Zapfkurven (rot gestrichelt) also noch steiler, weil infolge des kontinuierlich fallenden Temperaturverhältnisses T_{zapf}/TKW eine sukzessive V'_{zapf} -Erhöhung stattfindet.

Legende:

— Speichertemperatur-Höhenverteilung am Beginn der Zapfung
 - - - - - Speichertemperatur-Höhenverteilung am Ende der Zapfung

— zeitliche Entwicklung der oberen Speichertemperatur während der Zapfung
 - - - - - zeitliche Entwicklung der Zapftemperatur T_{zapf} während der Zapfung, Abbruch beim Erreichen der Temperatur T_{WW} zum Zeitpunkt T

Physikalische Modellierung

Die folgenden Modelle greifen nur auf einfache Zusammenhänge wie den Energieerhaltungssatz und die physikalischen Unterschiede zwischen Gegenstrom- und Gleichstromwärmetauschern zurück. Der komplizierte Vorgang Konvektion wird nicht im Detail, sondern ideal und in seinem sofort wirksamen Ergebnis betrachtet. Darüber hinausgehende Stoff- und Wärmevermischungseffekte durch Thermodiffusion, vertikale Wärmeleitung sowie durch Verwirbelungen werden vernachlässigt. Der Mischautomat sei mathematisch ideal. Wärmeverluste werden ignoriert. Der Zapfvolumenstrom wurde in jedem Fall mit ca. 12 l/min sehr moderat angenommen, er soll bei den Berechnungen keine Rolle spielen. Es sei aber betont, dass seine Erhöhung die Ergebnisse außer bei den Speichern 1, 4 und 6 verschlechtern würde. Allerdings wirkte sich diese Verschlechterung bei den Speichern mit Gleichstromwärmetauschern (5, 7 und 8) wesentlich heftiger aus als bei denen mit Gegenstromwärmetauschern (2 und 3).

Es handelt sich konsequent um eine positive Abschätzung „nach oben“. Jeder der vernachlässigten Effekte verschlechtert in Wahrheit das Ergebnis. Das betrifft prinzipiell alle 8 Kombispeicherklassen. Auch die im letzten Absatz bereits erwähnte (unrealistische) Vereinfachung, dass V'_{zapf} konstant ist, dafür aber die Zapfrate am Wasserhahn gemäß dem Mischfaktor sukzessive bis auf V'_{zapf} abnimmt, führt bei allen außer den Speichern 1 und 2 zu einer Aufbesserung des in Wahrheit schlechteren Ergebnisses. Ebenso liegt bei den Speichern 5 und 8 am Ende der Zapfung auch keine Temperaturschichtung von unten nach oben mit einem *linearen* sondern mit einem *progressiven* Temperaturanstieg vor, was den solaren Pufferwirkungsgrad ebenfalls weiter einschränkt.

Folgende Parameter werden verwendet:

ΔT_{\downarrow}	Differenz TSP-Zapftemperatur (T_{zapf}) bei Zapfbeginn, typischer Gegenstrom-WT	5 K
ΔT_{\uparrow}	Differenz TSP-Zapf bei Zapfbeginn, typischer Gleichstrom-WT	10 K
$n_{TT} = V_{SP} / V_{TT}$	Größenverhältnis Außen- zu Innentank bei Speicher 4 (Tank-in-Tank)	3
$n_{iWT} = V_{SP} / V_{iWT}$	Größenverhältnis Speicherinhalt zum Inhalt des Gleichstrom-WT bei Speicher 5	20
TSP	Speichertemperatur bei Zapfbeginn	65 °C
TWW	Temperatur nach dem Mischautomaten, bei $T_{zapf} \leq TWW$ endet die Zapfung	45 °C
TKW	Kaltwassertemperatur, bleibt während der Zapfung konstant	10 °C
V_{SP}	Speichervolumen	1000 l

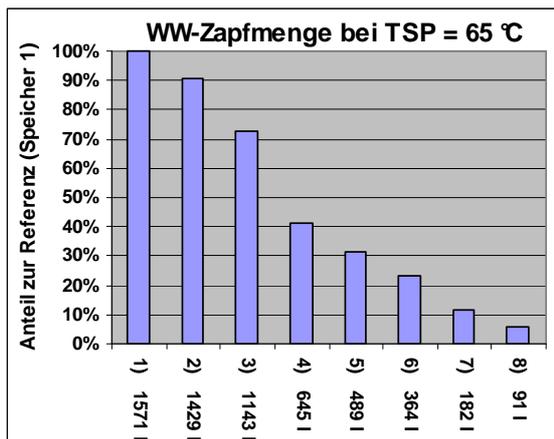
Unbekannt sind die Größen

T_{zapf}	Temperatur nach dem Speicher bzw. vor dem Mischautomaten
V_{WW}	Warmwassermenge, die maximal mit der Temperatur TWW gezapft werden kann

Im Folgenden sollen die verwendeten Formeln zur Berechnung von TWW für die verschiedenen Kombispeicherklassen vorgestellt werden. Man beachte die hier nur qualitativ erwähnte Abhängigkeit der Warmwassermenge V_{WW} vom Zapfvolumenstrom.

Nr.	Näherungsgleichung für die Warmwassermenge V_{WW}	Abhängigkeit von V'_{zapf}	Ergebnis für V_{WW}
1.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TKW}{TWW - TKW}$	nein	1571 l
2.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TKW - \Delta T_{\downarrow}}{TWW - TKW}$	ja	1429 l
3.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TKW - 3\Delta T_{\downarrow}}{TWW - TKW}$	ja	1143 l
4.	$V_{WW} \leq V_{SP} \left[\frac{TSP - TKW}{n_{TT}(TWW - TKW)} + \frac{(n_{TT} - 1)(TSP - TWW - \Delta T_{\uparrow})}{n_{TT}(TSP - TKW)} \right]$	sehr gering	645 l
5.	$V_{WW} \leq V_{SP} \left[\frac{TSP - TKW}{n_{iWT}(TWW - TKW)} + \frac{(n_{iWT} - 1)(TSP - \frac{TKW + 3TWW + 2\Delta T_{\uparrow}}{4})}{n_{iWT}(TSP - TKW)} \right]$	ja	489 l
6.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TWW}{TSP - TKW}$	nein	364 l
7.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TWW - \Delta T_{\uparrow}}{TSP - TKW}$	sehr stark	182 l
8.	$V_{WW} \leq V_{SP} \frac{TSP - TWW - 1,5\Delta T_{\uparrow}}{TSP - TKW}$	sehr stark	91 l

Auswertung



Das folgende Diagramm zeigt das auf den Referenzspeicher 1 normierte Ergebnis für die Parameter:

TSP = 65 °C

TWW = 45 °C

TKW = 10 °C

nTiT (4) = 3

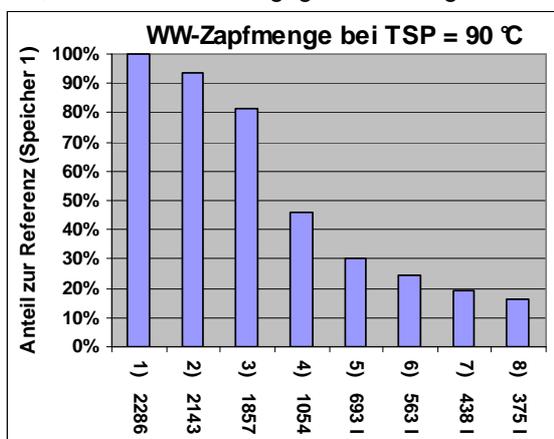
niWT (5) = 20

$\Delta T_{\uparrow\downarrow}$ (2, 3) = 5 K

$\Delta T_{\uparrow\uparrow}$ (4, 5, 6, 7, 8) = 10 K.

Die Unterschiede sind enorm. Allerdings heißt das nicht einfach, dass die Speicher im selben Maße, wie sie Solarwärme speichern können, auch konventionelle Wärme einsparen. Tatsächlich sind diese Speicher immer in

Kombination mit Heizkreisen und mit konventionellen Nachheizungen anzutreffen. Und diese sorgen dafür, dass die zur Warmwasserbereitung notwendige Speichertemperatur TSP möglichst immer bereitgestellt wird. Wenn TSP sinkt, weil gezapft wird, startet die konventionelle Heizung. Aber die Solarwärme geht dabei ja nicht verloren, sie wird von Speicher 1 bis 8 jedoch in zunehmendem Maße „verhindert“, weil sie mit ziemlich hohen Temperaturen TSP von den Kollektoren zur Verfügung gestellt werden muss und deshalb nur zu immer geringeren Teilen genutzt werden kann. Man bezeichnet das als „Vorwärmung“, weil die konventionelle Nachheizung ebenfalls auf einem von Speicher 1 bis 8 immer weiter zunehmenden Temperaturniveau beginnt. Diese Ineffizienz schlägt sich vor allem in den Bereitschaftswärmeverlusten des Speichers, der Solaranlage und der konventionellen Heizung im Sommer nieder. Weiterhin verhindert ein einmal geladener Speicher, dass noch mehr Wärme aufgenommen werden kann. Im ungünstigsten Fall geht die Solaranlage für den Rest des Tages in den Stillstand. Insofern gilt für eine Kombi-Solaranlage generell, dass sie umso mehr konventionelle Energie spart, je weniger sie zur Warmwasserbereitung ohne Nachheizung auskommt. Besonders ungünstig wirkt sich ein kleiner solarer Pufferwirkungsgrad in Kombination mit Flachkollektoren aus, weil deren Wirkungsgrad bei steigenden Temperaturansprüchen dramatisch einbricht.



Das zweite Diagramm zeigt das Ergebnis bei einem voll geladenen Solarspeicher mit

TSP = 90 °C.

Die Referenz 100 % steht jetzt bei einem 1000-Liter-Speicher statt für maximal 1571 l mit TWW = 45 °C immerhin für eine absolute Zapfmenge von 2286 l.

Prozentual verbessert sich der solare Puffernutzungsgrad bei höherer Ladetemperatur bei allen 8 Speichern jedoch nicht signifikant.

Schlussbemerkungen

Nun stellt sich abschließend die Frage, warum diese Unterschiede nicht auch deutlich in den Simulationsergebnissen marktüblicher Programme erscheinen. Dies ist nicht zu erwarten, solange die Stillstands- und Bereitschaftsverluste immer wieder klein gerechnet werden. Es gibt auch erst für ganz wenige Kombispeicher wirklichkeitsnahe mathematische Modelle. Für viele Anbieter von Kombispeichern wäre es wenig attraktiv, wenn ihre Speicher realistischer abgebildet würden, ganz abgesehen davon, dass sie für diese Modellierung auch noch sehr viel bezahlen müssten. Eine dynamische Modellierung eines komplizierten Kombispeichers, in deren Ergebnis auch noch die individuelle Kesseleinschalthäufigkeit herauskäme, würde die Rechenzeit einer Jahressimulation gewaltig erhöhen. Jahressimulationen mit wissenschaftlichen Programmen wie TRNSYS oder COLSIM rechnen daran einige Stunden und kosten auch dementsprechend viel. Das wäre für den „Hausgebrauch“ inakzeptabel.

Die Unterschiede im solarer Pufferwirkungsgrad korrelieren auch weder mit den Preisdifferenzen zwischen den verschiedenen Kombispeicherklassen noch mit deren Marktanteilen – ein deutlicher Beweis für die Dominanz von Marktmacht und starkem Marketing.



Zum Autor

Dr. rer. nat. Rolf Meißner ist Physiker und hat als Produktmanager und Entwickler seit 1990 bei PARADIGMA Vertreter nahezu aller Kombispeicherklassen entwickelt, getestet, bewertet und, wenn angebracht, auch wieder verworfen.