

# Optimierung von solarunterstützten Speicherladesystemen

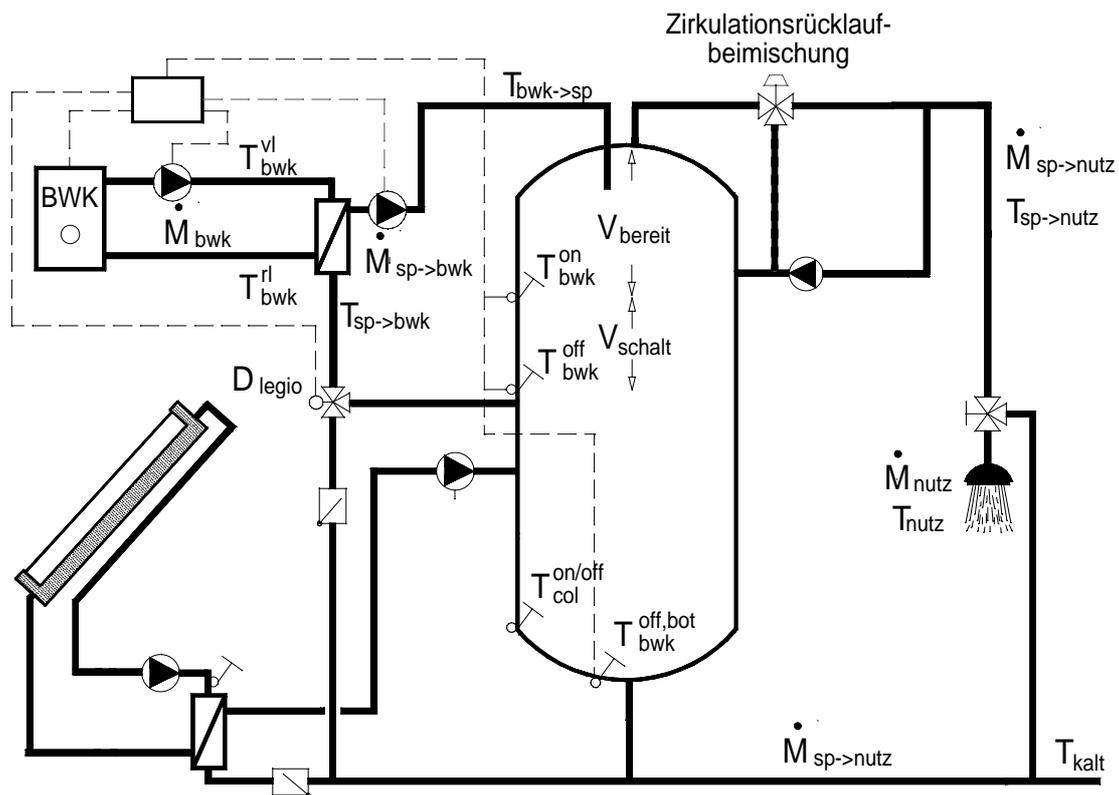
Klaus Vajen

Univ. Marburg, FB Physik, D-35032 Marburg

Tel.: 06421/284148, Fax: /286535, e-mail: vajen@physik.uni-marburg.de

## Abstract

Bei der fossilen Aufheizung weisen Speicherladesysteme (Speicherbeladung 'von oben', meist mit externem Wärmeübertrager, vgl. Abb. 1) Vorteile auf gegenüber Speichersystemen (Speicherbeladung 'von unten', meist mit internem WÜT), insbesondere in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage. Im vorliegenden Beitrag werden die Auswirkungen der Wahl der Kessel-Vorlauftemperatur und der Massenströme im Kessel- bzw. Speicherkreis bei Speicherladesystemen mit modulierenden Brennern untersucht sowie Regulationsmöglichkeiten vorgestellt und diskutiert. Zur energetischen Quantifizierung wurden TRNSYS-Simulationsrechnungen durchgeführt.



**Abb. 1:** Vereinfachtes Hydraulikschema eines Speicherladesystems zur solarunterstützten Warmwasserbereitung für eine Großanlage i.S.d. DVGW W551 /DVGW93/. Im normalen Nachheizbetrieb wird das zu erwärmende Wasser dem Speicher unterhalb des Schaltvolumens  $V_{\text{schalt}}$  entnommen und oben wieder eingespeist. Einmal täglich wird das Drei-Wege-Ventil  $D_{\text{legio}}$  geschaltet, die Entnahme für die Nachheizung erfolgt jetzt ganz unten im Speicher.

## Randbedingungen

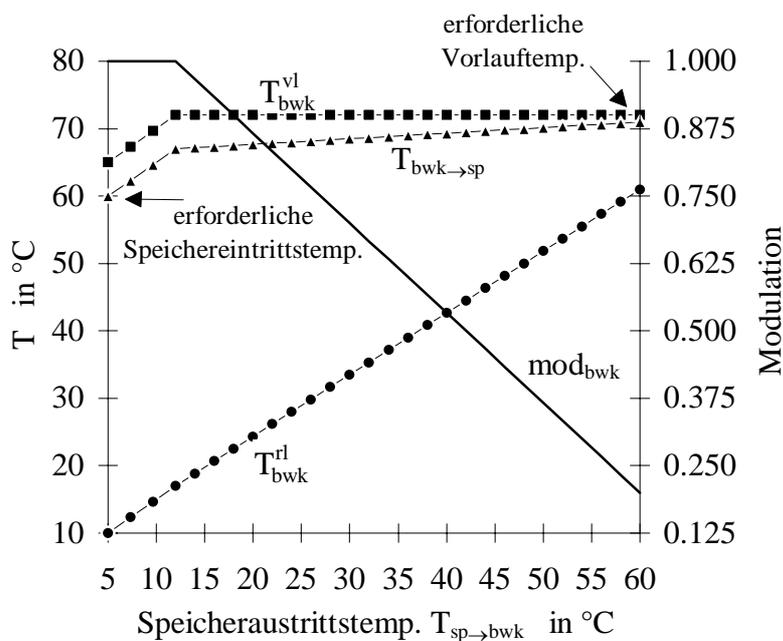
Bei der hydraulischen Verschaltung nach Abb. 1 wird der Massenstrom  $\dot{M}_{sp \rightarrow bwk}$  zeitweise unten an der kältesten Stelle des Speichers entnommen und oben wieder eingespeist. Das Speicherwasser muß also in dem Wärmeübertrager von  $T_{kalt}$  (Annahme hier: minimales  $T_{kalt}=5^{\circ}C$ ) auf die Solltemperatur  $T_{sp \rightarrow nutz}^{set}=60^{\circ}C$  (nach /DVGW93/) erwärmt werden können.

Die Massenströme am Wärmeübertrager müssen so gewählt werden, daß der Kessel bei Vollleistung eine Erwärmung des Speicherwassers um  $(60-5)^{\circ}C = 55 K$  sicherstellen kann. Verfügt der Kessel über eine untere Modulationsgrenze von  $mod_{bwk}^{min}=0.2$ , so beträgt die minimale Erwärmung von  $\dot{M}_{sp \rightarrow bwk}$ , ohne daß der Kessel taktet,  $55 K \cdot 0.2 = 11 K$ .

Da der Speicher nach der DVGW W551 einmal täglich komplett auf  $60^{\circ}C$  zu erwärmen ist, muß also auch  $59.9^{\circ}C$  warmes Speicherwasser noch aufgeheizt werden können. Unter der Voraussetzung  $\dot{M}_{bwk}=\dot{M}_{sp \rightarrow bwk}=\text{konstant}$  und bei einer logarithmischen Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager von  $5 K$  bei maximaler Brennerleistung ist dann eine Kesselvorlauftemperatur  $T_{bwk}^{vl}$  von  $72^{\circ}C$  ( $60^{\circ}$  Speicheraustritt +  $11 K$  minimale Erwärmung +  $5 K \cdot 0.2$  am Wärmeübertrager) erforderlich. Ist die Soll-Vorlauftemperatur nicht regel- oder steuerbar, wie es nach Wissen des Autors bisher bei allen in Deutschland marktgängigen Geräten der Fall ist, muß  $T_{bwk}^{vl}$  also immer auf mindestens  $T_{bwk}^{vl,set}=72^{\circ}C$  eingestellt sein.

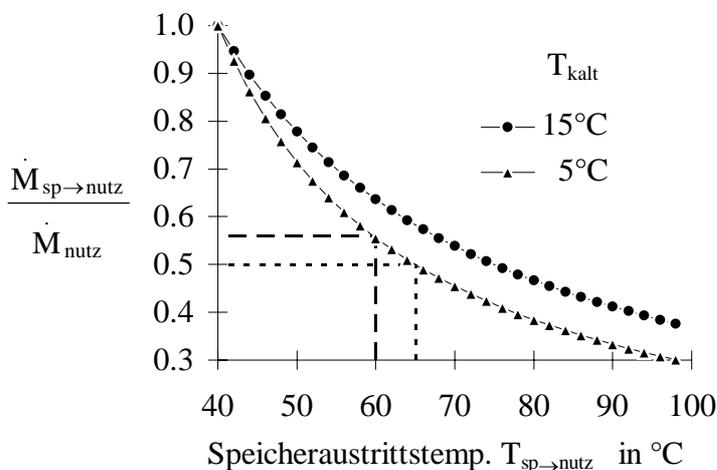
## Folgen

Aus diesen Randbedingungen können die Kesselvor- und Rücklauftemperaturen,  $T_{bwk}^{vl}$  bzw.  $T_{bwk}^{rl}$ , die Speichereintrittstemperatur  $T_{bwk \rightarrow sp}$  sowie die Kesselmodulation  $mod_{bwk}$  in Abhängigkeit von der Speicheraustrittstemperatur  $T_{sp \rightarrow bwk}$  berechnet werden, vgl. Abb. 2 (Berechnungsgrundlagen in /Vaj96/).



**Abb. 2:** Temperaturverläufe von Kesselvor- und rücklauf sowie Speichereintritt und die Brennermodulation in Abhängigkeit von der Speicheraustrittstemperatur für ein Speicherladesystem nach Abb. 1,  $\dot{M}_{bwk}=\dot{M}_{sp \rightarrow bwk}=\text{konstant}$ .

Bei sehr niedrigen Speicheraustrittstemperaturen erreicht der Kesselvorlauf nicht die Solltemperatur von  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl, set}} = 72^\circ\text{C}$ . Mit steigendem  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}}$  nimmt auch  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl}}$  zu. Bei  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}} > 12^\circ\text{C}$  kann nicht mehr die ganze Kesselleistung über den Wärmeübertrager abgeführt werden, der Kessel moduliert. Mit der Brennerleistung sinkt auch die logarithmische Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager, die Speichereintritts- nähert sich der Kesselvorlaufstemperatur. ~~Sowie die Speicheraustrittstemperatur höher als  $T_{\text{kalt}} = 5^\circ\text{C}$  ist, treten also am Speichereintritt z.T. deutlich höhere Temperaturen auf als die eigentlich ausreichenden  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{nutz}}^{\text{set}} = 60^\circ\text{C}$ .~~ In rein fossil befeuerten Speicherladesystemen sind Speicheraustrittstemperaturen  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}}$  im mittleren Temperaturbereich ( $15^\circ\text{..}50^\circ\text{C}$ ) eher die Ausnahme, in solarunterstützten Systemen aber die Regel. Die daraus resultierenden Übertemperaturen ziehen erhöhte Speicher- und vor allem Zirkulationsverluste nach sich und verstärken mögliche Probleme durch Kalkausfall. Darüberhinaus fließt insgesamt weniger Kaltwasser in den Speicher, da dieses in größerem Maße an der Entnahmestelle beigemischt werden muß, um dort die Nutztemperatur  $T_{\text{nutz}} \approx 40^\circ\text{C}$  zu erreichen. Aus Abb. 3 folgt, daß bereits eine Speicheraustrittstemperatur  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{nutz}}$  von  $65^\circ$  statt  $60^\circ\text{C}$  zu einer Verminderung der Kaltwasserzufuhr in den Speicher um rund 10% führt. Die damit verbundene Erhöhung der Kollektorrücklaufstemperatur hat einem merklichen Rückgang des Kollektorwirkungsgrades zur Folge. Auch der Nutzungsgrad des Brennwertkessels sinkt geringfügig.



**Abb. 3:** Anteil des in den Speicher fließenden Kaltwassers  $\dot{M}_{\text{sp} \rightarrow \text{nutz}}$  am Gesamtverbrauch  $\dot{M}_{\text{nutz}}$  in Abhängigkeit von der Speicheraustrittstemperatur  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{nutz}}$  für Kaltwassertemperaturen  $T_{\text{kalt}}$  von  $5^\circ$  und  $15^\circ\text{C}$ . Die angenommene Nutztemperatur beträgt  $40^\circ\text{C}$ . Rohrleitungsverluste auf dem Weg vom Speicher zum Nutzort sind vernachlässigt.

### Lösungsmöglichkeiten

Insgesamt wurden sieben Möglichkeiten daraufhin untersucht, inwieweit sie, in Ergänzung zur vorhandenen Modulationsregulation, zu einer Verminderung der durch die fossile Nachheizung hervorgerufenen Übertemperaturen beitragen können.

Bei variabler Kesselvorlauftemperatur  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl}}$  und gleichen Massenströmen  $\dot{M}_{\text{bwk}} = \dot{M}_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}}$  eine

- Erweiterung des Modulationsbereichs des Kessels
- Synchrone Regulation der Massenströme im Kessel- und Speicherkreis
- Beimischung des Vorlaufs im Speicherkreis
- Regulation der Soll-Kesselvorlauftemperatur

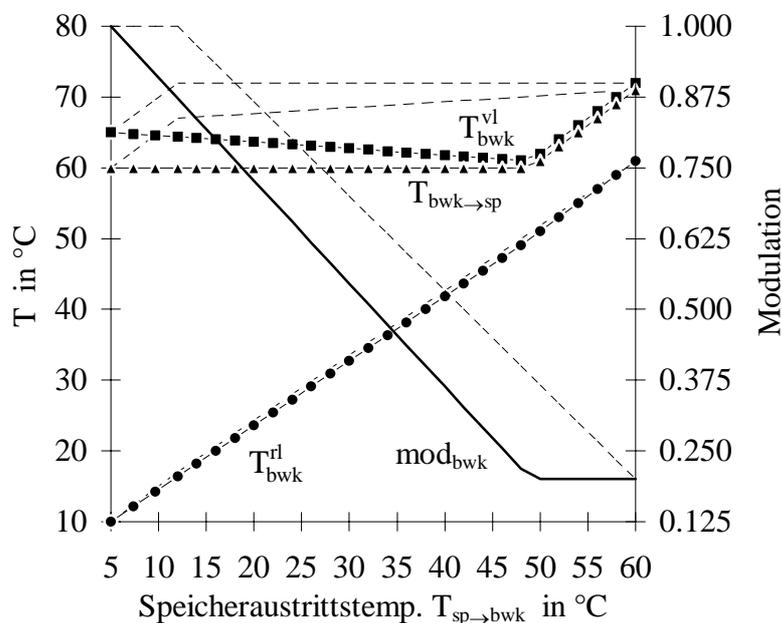
und bei konstanter Kesselvorlauftemperatur sowie ungleichen Massenströmen

- Regulation des Massenstroms im Kesselkreis
- Regulation des Massenstroms im Speicherkreis
- Konstante, aber ungleiche Massenströme in Kessel- und Speicherkreis

## Empfehlungen

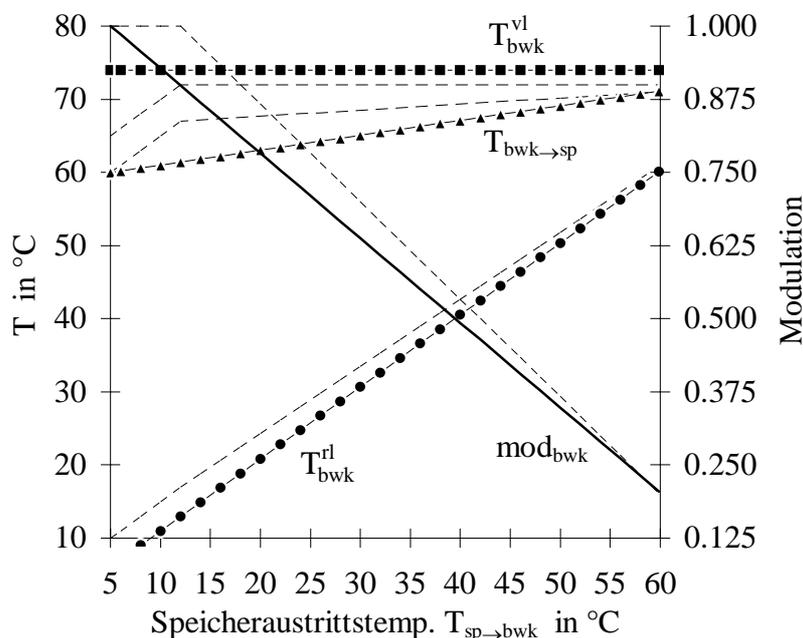
Für die günstigsten Optionen läßt sich zusammenfassend festhalten:

- Durch eine geeignete Regulation der Soll-Kesselvorlauftemperatur ließen sich die Speicheraustrittstemperaturen über einen weiten Eintrittstemperaturbereich auf  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{nutz}}^{\text{set}} = 60^\circ\text{C}$  begrenzen, vgl. Abb. 4. Zur optimierten Heizungsregelung werden moderne Kessel ohnehin mit geregelter Soll-Vorlauftemperatur betrieben, eine Ausweitung dieser Option auf die Warmwasserbereitung ist technisch machbar und scheint nicht besonders aufwendig.



**Abb. 4:** Temperaturverläufe und Brennermodulation analog Abb. 2 für ein Speicherladesystem mit einer Kesselvorlauftemperaturregulation,  $\dot{M}_{\text{bwk}} = \dot{M}_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}} = \text{konstant}$ . Zum Vergleich sind die Kurven aus Abb. 2 gestrichelt mit eingezeichnet. Die Speichereintrittstemp.  $T_{\text{bwk} \rightarrow \text{sp}}$  ist für  $12 \leq T_{\text{bwk} \rightarrow \text{sp}} / ^\circ\text{C} \leq 48$  beim geregelten System um 7 bis 10 K niedriger.

- Können Massenströme reguliert werden, sollte bei konstantem Kesselmassenstrom  $\dot{M}_{\text{bwk}}$  der Speichermassenstrom  $\dot{M}_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}}$  mit steigendem  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}}$  soweit erhöht werden, daß  $T_{\text{bwk} \rightarrow \text{sp}}$  möglichst weitgehend auf  $60^\circ\text{C}$  begrenzt werden kann.
- Muß auf zusätzliche Regulationen von Massenströmen bzw. Temperaturen verzichtet werden, sollte eine in allen Betriebszuständen erreichbare Soll-Kesselvorlauftemperatur (im vorliegenden Bsp.:  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl, set}} \geq 73.7^\circ\text{C}^1$ ) eingestellt werden. Der Massenstrom im Speicherkreis muß dann rund 25% größer als der im Kesselkreis gewählt werden. Die in Abb. 5 dargestellte, im Vergleich mit dem Kurvenverlauf aus Abb. 2 etwas höhere, Kesselvorlauftemperatur führt zu geringfügig erhöhten Strahlungsverlusten am Heizkessel. Diese Verluste dürften aber durch die, wegen der niedrigeren Rücklauftemperaturen, gestiegene Brennwertnutzung überkompensiert werden können.



**Abb. 5:** Temperaturverläufe und Brennermodulation analog Abb. 2 für ein System mit konstanten, aber ungleichen Speicher- und Kesselmassenströmen und konstantem  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl}} = T_{\text{bwk}}^{\text{vl, set}} = 74^\circ\text{C}$ , woraus  $\dot{M}_{\text{bwk}} / \dot{M}_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}} = 0.81$  folgt. Kurven aus Abb. 2 gestrichelt.

- Bei einem solarunterstützten System ist in jedem Fall eine Rücklaufbeimischung für den Zirkulationskreislauf vorzusehen (vgl. Abb.1). Die dadurch erniedrigte Zirkulationsvorlauftemperatur führt durch eine geringere Kaltwasserbeimischung an den Entnahmestellen zu einem erhöhten Kaltwassereintrag in den unteren Speicherteil.
- Wichtig ist, neben dem Einsatz eines leistungsfähigen Wärmeübertragers, insbesondere auch eine hohe Modulationsfähigkeit des Kessels. Beträgt die minimale Modulation  $\text{mod}_{\text{bwk}}^{\text{min}} = 0.3$  (statt wie in Abb. 2:  $\text{mod}_{\text{bwk}}^{\text{min}} = 0.2$ ), erfordert dies eine Soll-

<sup>1</sup>Die untere Grenztemperatur für  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl, set}}$  ergibt sich daraus, daß der Kessel für  $T_{\text{sp} \rightarrow \text{bwk}} = 60^\circ\text{C}$  und minimaler Brennermodulation nicht taktet.

Vorlauftemperatur  $T_{\text{bwk}}^{\text{vl.set}}$  von  $78^{\circ}\text{C}$  (statt  $72^{\circ}\text{C}$ ). Ohne zusätzliche Regulation ergäben sich dann bereits für Speicheraustrittstemperaturen  $T_{\text{sp}\rightarrow\text{bwk}} > 18^{\circ}\text{C}$  am Speichereintritt Temperaturen  $T_{\text{bwk}\rightarrow\text{sp}}$  von über  $73^{\circ}\text{C}$  (statt der erforderlichen  $60^{\circ}\text{C}$ ).

### **Auswirkungen auf den Energieverbrauch**

Bei TRNSYS-Simulationen wurde als Referenz eine für ein Freibad konzipierte Anlage analog Abb. 1 mit einer Kesselregelung nach Abb. 2 und ohne Zirkulationsrücklaufbeimischung gewählt. Bei einem solarunterstützten System mit einer solaren Deckungsrate von knapp 50% führen sowohl eine Regulation der Kesselvorlauftemperatur als auch eine Zirkulationsrücklaufbeimischung zu einer Verminderung des fossilen Energieeinsatzes von jeweils mehr als 4%. Da nur eine dieser Maßnahmen Übertemperaturen im Speicher bzw. in der Zirkulationsleitung bei weitem nicht vollständig vermeiden kann, ergaben die Simulationen, daß beide Potentiale nahezu additiv sind. Der größte Teil dieser Einsparungen ist auf die höhere Kaltwasserzufuhr in den unteren Speicherbereich und damit steigende (Flach)kollektorstufenwirkungsgrade zurückzuführen.

Selbst bei einem rein fossil befeuerten System ergeben sich durch die beiden vorgeschlagenen Maßnahmen additive Einsparpotentiale von jeweils rund 1%, die hier allerdings zum größten Teil auf die sinkenden Zirkulationsverluste (simulierte einfache Leitungslänge: 40 m) zurückzuführen sind.

### **Einschränkungen**

Die Diagramme in dem vorliegenden Beitrag sind unter der Annahme einer rücklauftemperaturunabhängigen Kesselleistung erstellt. Eine Berücksichtigung der Brennwertnutzung im Kessel führt nur zu geringfügig anderen Temperatur- und Modulationsverläufen und ist in ihren Auswirkungen vergleichbar mit einer Absenkung der unteren Modulationsgrenze um rund 10% (also z.B. von  $\text{mod}_{\text{bwk}}^{\text{min}} = 0.20$  auf 0.18).

Abschließend sei noch erwähnt, daß eine Speichereintrittstemperatur  $T_{\text{bwk}\rightarrow\text{sp}}$  von exakt  $60^{\circ}\text{C}$  gar nicht wünschenswert ist. Im Verlauf eines Aufheizvorgangs kühlt sich das Speicherwasser durch Mischvorgänge ein wenig ab, nach einem vollständigen Speicherdurchsatz könnte die Temperatur unten im Speicher z.B. nur noch  $59^{\circ}\text{C}$  betragen. Ein weiterer Durchsatz ohne Brennwertnutzung wäre erforderlich, um die Ausschaltbedingung  $T_{\text{bwk}}^{\text{off.bot}} \geq 60^{\circ}\text{C}$  zu erreichen. Die zur Vermeidung dieses Effektes erforderliche Übertemperatur ( $T_{\text{bwk}\rightarrow\text{sp}} = 60^{\circ}\text{C} + X$ , mit  $X \approx$  wenige Kelvin) sollte für die verschiedenen Kombinationen aus Speichern und Einströmeinrichtungen experimentell überprüft werden.

## Literatur

- /DVGW93/ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Arbeitsblatt W 551, 'Trinkwassererwärmungs- und Leitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums', Eschborn 1993
- /Vaj96/ Vajen, K., 'Systemuntersuchungen und Modellierung solarunterstützter Warmwasserbereitungssysteme in Freibädern', Dissertation, Marburg 1996