

# Effiziente Trinkwassererwärmung

## Versuchsstand zur Visualisierung von Be- und Entladevorgängen an Schichtladespeichern



Prof. Dr.-Ing.  
Hans Messerschmid,  
Fakultät Gebäude-  
Energie- und Um-  
welttechnik, Hoch-  
schule Esslingen.

Zirka die Hälfte des gesamten Wasserverbrauchs in privaten Haushalten ist Warmwasser zum Duschen, Baden, Waschen und Reinigen. Im Niedrigenergie- und 3-Literhaus beträgt der Anteil des Energieaufwandes für diese Warmwasserbereitung zwischen 30 und 50% des gesamten Energieaufwandes des Gebäudes. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die eingesetzte Energie zur Warmwasserbereitung effizient genutzt wird und Verluste möglichst weitgehend reduziert werden.

An der Hochschule Esslingen wurde deshalb im Rahmen einer Bachelorarbeit [1] ein Versuchsstand aufgebaut, der es erlaubt, die Strömungsvorgänge in einem Schichtladespeicher sichtbar zu machen und mit dessen Hilfe die Optimierung einzelner Komponenten möglich ist.

Um warmes Trinkwasser zu bevorraten gibt es auf dem Markt im Wesentlichen zwei verschiedene Speichertypen.

Indirekt beheizte Speicher haben einen innen liegenden Wärmetauscher, meist als glatte Rohrschlange ausgeführt. Die Temperaturschichtung im Speicher über der Höhe des Speichers ist in Abbildung 1 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass oberhalb des Wärmetauschers eine gleichmäßige Erwärmung stattfindet, sich jedoch im Bereich des Wärmetauschers und darunter Wasser mit niedrigerer Temperatur befindet.

Im Vergleich dazu ist bei Speichern mit externer Beladung – häufig mittels Plattenwärmetauschern – eine gute Trennung zwischen warmer und kalter Schicht, also eine schmale Mischzone, zu erkennen (Abbildung 2).

Jedoch gibt es auch bei solchen Schichtladespeichern Konstruktionselemente, die verbesserungsfähig sind.

### Mischzone im Schichtladespeicher

Wird ein Schichtladespeicher mit Warmwasser beschickt, führt dies zunächst zu Vermischungen des warmen Fluides mit dem im Speicher befindlichen kälteren Fluid. Ausgelöst wird dies durch die Übertragung vom Impuls des einströmenden Wassers auf das ruhende Wasser im Speicher. Dabei entsteht eine Temperaturzone unterhalb der Beladetemperatur. Je kleiner diese Mischzone zwischen Warmwasser im Trinkwasserbereich  $60\text{ °C}$  und Kaltwasser ca.  $10\text{ °C}$  ist, desto größer ist das nutzbare Volumen des Speichers. Die Ausdehnung der Mischzone wird im Wesentlichen beeinflusst durch Wärmeverluste an den Speicherwänden, durch Wärmeleitung zwischen Wasserschichten und durch Einmischvorgänge bedingt durch die Bénard-Konvektion, welche durch warme und kalte Wasserschichten im Übergangsbereich strukturierte Wirbel hervorbringt und zur Abkühlung beiträgt [3]. Außerdem verändert sich die Mischzonengröße je nach Belade- oder Entladezustand.

Das Ziel bei der Konstruktion von Speicherbehältern muss es also sein, dass diese Mischzone einen möglichst kleinen Prozentsatz des im Behälter befindlichen Wassers ausmacht.

Aus der Definition des Impulses als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit lässt sich ablesen, dass die Wirkung des Impulses durch die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst werden kann. Hierfür wurden bereits in der Vergangenheit Modelluntersuchungen an der TU-Dresden mit verschiedensten Einströmgeometrien durchgeführt [4]. Eine dort entwickelte Berechnungsmethode basiert auf der Einführung der dimensionslosen Richardson-Zahl (Ri-Zahl). Mit ihr lassen sich Aussagen zur Eindringtiefe der vertikalen Einströmung in den Speicher treffen. Ebenso kann sie zur indirekten Beschreibung der Schichtung im Speicher bei Lade- und Entladevorgängen herangezogen werden. Die Richardson-Zahl ist das Verhältnis von Auftriebskraft zu Trägheitskraft; sie wird angewendet, wenn komplexe Strömungsverhältnisse unter Berücksichtigung der Auftriebskräfte zu erwarten sind, die Strömung aber nicht allein durch die Auftriebskräfte ausgelöst wird. Bei der Be- und Entladung von Schichtladespeichern handelt es sich um einen solchen Ablauf.

Das beste Dämpfungspotential beim Be- und Entladen hat eine ebene Prallplatte mit einem bestimmten Verhältnis von Rohrlei-

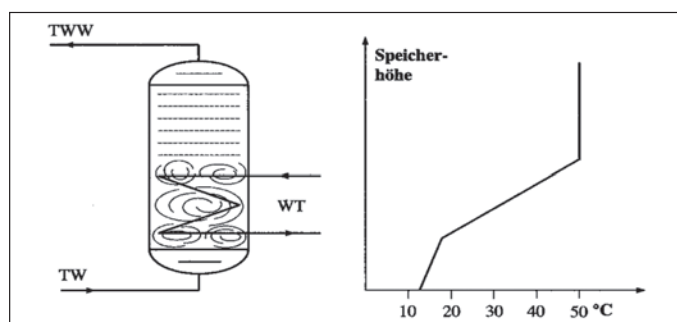


Abbildung 1:  
Trinkwasserspeicher  
mit innen liegendem  
Wärmetauscher  
[2].

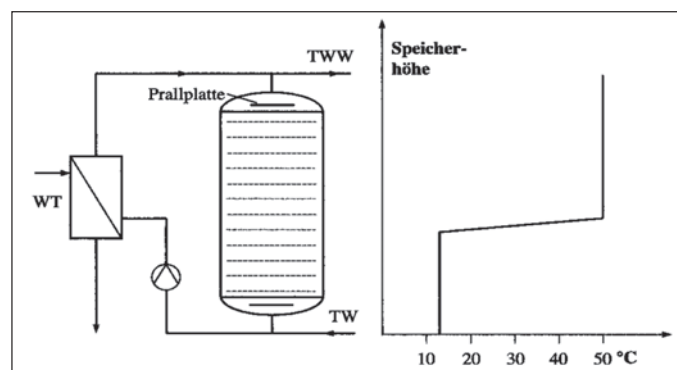


Abbildung 2:  
Trinkwasserspeicher  
mit externer Beladung  
[2].

tungsdurchmesser zum Durchmesser der Platte, die in einem bestimmten Abstand vom ebenen Speicherdeckel bzw. -boden angebracht ist.

### Rückführung der Zirkulationsleitung in den Speicher

Die Rückführung der Zirkulationsleitung in den Speicherbehälter wird meist über einen separaten Anschluss im oberen Drittel realisiert. Jeder zusätzliche Anschluss am Speicher ist aber eine potenzielle Wärmeverlustrquelle. Hinzu kommt, dass das zirkulierende Wasser auf seinem Weg zwischen Zapfstelle und Speicher, einen Wärmeverlust erfährt. Dies hat zur Folge, dass zirkulierendes Wasser mit einer Minimaltemperatur von 55 °C dem Warmwasserspeicher zugeführt wird [5]. Tritt dieses 55 °C warme Zirkulationswasser nun in einen Schichtladespeicher im oberen Drittel ein, hat dies bei einem beladenen Zustand eine nachteilige Auswirkung auf die Schichtung im Speicher.

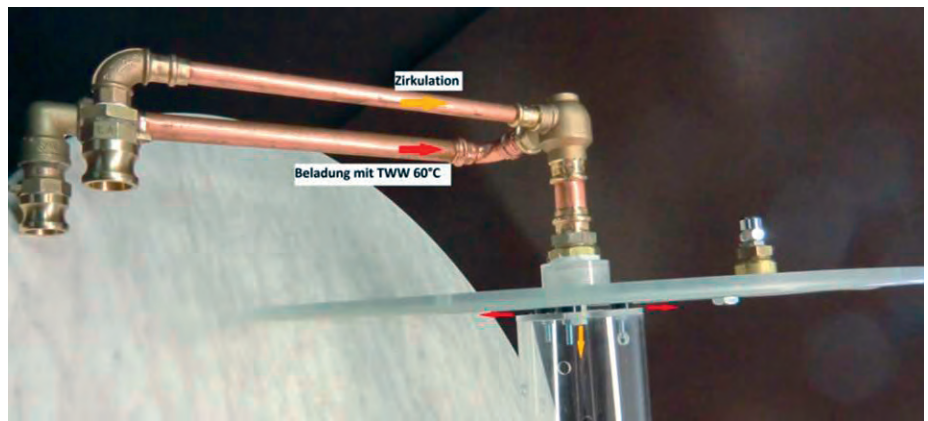
Die Rückführung über einen horizontalen Rohranschluss ist auch aus strömungstechnischen Gründen ungünstig, da eine Rotationsströmung im Speicher induziert wird. Sie führt zu einer Vermischung von unterschiedlichen Temperaturschichten, was eine geringere mittlere Temperatur der Mischzone zur Folge hat.

Bei der Einführung der Zirkulation in den Warmwasserspeicher ist deshalb darauf zu achten, dass damit keine Auskühlung wärmerer Schichten im Speicher stattfindet.

Hierzu hat ein studentisches Projektteam an der Hochschule einen Doppelrohranschluss auf der Basis der von Kemper entwickelten Inlinerzirkulation konzipiert. Hierbei führt das äußere Rohr Wasser zum Beladen des Speichers über die Prallplatte. Das Innenrohr, welches das zirkulierende Wasser in den Speicher zurückführt, durchdringt die Prallplatte unterhalb des Speicherdeckels und endet in einem Carnotdiffusor, der unterhalb der Prallplatte in Form eines Rohrs ausgeführt wird. Dieses Rohr hat Bohrungen mit 15 mm Durchmesser. Diese sind so angeordnet, dass ein Auslass auf jeder Höhe in der oberen Speicherhälfte möglich ist. Damit soll eine Rückführung des Zirkulationswassers aufgrund seiner spezifischen Dichte in der entsprechenden Temperaturzone gewährleistet werden. In Abbildung 3 ist die Beladeeinrichtung mit Prallplatte, Diffusor und Inlinerzirkulation dargestellt.

### Temperaturmessungen im Speicher

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal des Schichtladespeichers, im Vergleich zum



↑ Abbildung 3: Beladung am Speicherdeckel über einen Doppelrohranschluss, Zirkulationsrückführung im Diffusor.

Abbildung 4: Schichtladespeicher aus Acrylglas. →

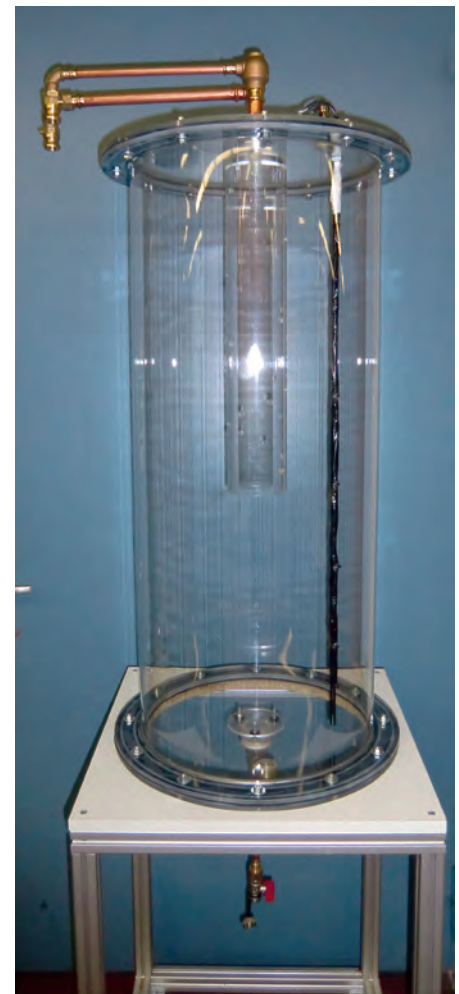
konventionellen Warmwasserspeicher, ist die Schichtung von Wasser unterschiedlicher Temperaturen. Um zu verdeutlichen wie sich die Wassertemperatur bei der Beladung, also der Erwärmung des Speicherwassers, über die gesamte Höhe des Speichers darstellt, wird eine vertikale Temperaturmesssonde im Speicher benötigt.

Bei bisherigen Versuchen solcher Art wurden vornehmlich PT100 Fühler verwendet. Diese wurden gleichmäßig über die Speicherhöhe verteilt angebracht. Bei dieser Art der Temperaturmessung ist für jeden Fühler ein separates Kabel aus dem Speicher herauszuführen. Die dabei gemessenen Widerstände können mithilfe eines Digitalmultimeters in Temperaturwerte umgerechnet werden. Die Durchführung des Kabelpaketes durch den Speicherdeckel ist aufwändig und nur schwer abzudichten.

Ein Lösungsansatz bietet das in der Projektarbeit in [6] beschriebene One-Wire System zur Vereinfachung der Temperatursonde.

Dabei werden ähnlich wie bei einem BUS-System, Daten einzelner Sensoren über eine Leitung mit einem übergeordneten Steuerrechner ausgetauscht. Bei diesem seriellen BUS findet kein Datenaustausch zwischen den Sensoren statt. Die Sensoren werden nacheinander abgefragt und geben direkt die gemessenen Temperaturen an den Steuerrechner ab.

Die Bezeichnung One-Wire ist dabei eigentlich irreführend, da auch bei einer drastischen Reduzierung der Kabel noch mindestens drei Adern eines Kabels benötigt werden. Der verwendete Sensor ist ein Dallas 18S20. Die Kosten für einen Sensor betra-



gen etwa 2 - 3 Euro. Der Sensor ist über drei Adern anzuschließen. Damit über Datenanschluss und Erdung ein parasitärer Betrieb ausgeschlossen werden kann, ist es möglich, den Sensor über die dritte Ader mit Spannung zu versorgen.

Die Sensoren sind in einem Abstand von 15 cm in Reihe geschaltet. Damit lässt sich während der Versuche das vertikale Temperaturprofil im Speicher abbilden.

Der Sensor kann dabei Temperaturen von -10 °C bis 125 °C messen, in dem relevanten

Bereich von  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zur Auswertung wird die Software DigitTemp verwendet, die frei im Internet zur Verfügung steht. Die Temperaturen werden unter der erfassten Identifikationsnummer des Sensors in einer „txt“-Datei ausgegeben.

### Versuchsstand

Das Ziel ist, die Strömungen beim Ein- und Ausschichten des Speichers sichtbar zu machen. Dabei soll nachgewiesen werden, dass die beschriebenen Optimierungsmaßnahmen ihre positive Wirkung zeigen.

Hierzu wird ein Speicher aus Acrylglas verwendet. Acrylglas ist der gebräuchliche Name für den Kunststoff Polymethylmetha-

crylat, kurz PMMA. Die Transparenz ist ähnlich wie bei Glas, daher ist PMMA geeignet um Strömungen zu visualisieren. Der Speicher besteht aus einem Zylinder und zwei Böden, die in Abbildung 4 als ebene Platte zu erkennen sind. Sie sind über Flansche mit dem Zylinder verbunden. Der Speicher hat einen Inhalt von 154 Litern bei einer Höhe von 101 cm.

Da das gewählte Material nur sehr wenig druckbeständig ist, muss der Versuchsstand über ein offenes Leitungssystem abgesichert werden.

Über einen zusätzlichen 65 l Tank wird Trinkwasser zur Verfügung gestellt. Eine konstante Kaltwassertemperatur von  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

ist über einen angeschlossenen Kaltwassersatz gewährleistet. Der 65 l Kaltwassertank wird über ein Schwimmerventil je nach Bedarf gefüllt. Der für die Be- und Entladung erforderliche Volumenstrom und Fließdruck werden von einer im Kaltwassertank installierten Tauchpumpe sichergestellt.

Die Erwärmung des Trinkwassers ist durch einen Elektrodurchlauferhitzer realisiert. Dieser erwärmt das Wasser auf  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Damit ist eine konstant bleibende Beladetemperatur gewährleistet.

Der Versuchsstand ist fahrbar auf einem Rahmen aus Aluprofilen montiert und kann so auch zu Demonstrationszwecken leicht transportiert werden. Lediglich ein Wasseranschluss und eine 400 V Steckdose mit einem 32 A Stecker sind zum Anschluss erforderlich.

Abbildung 5 und 6 zeigen den Versuchsstand und das Hydraulikschema.

### Ergebnisse

Für die Visualisierung der Einschichtung beim Be- und Entladen des Speichers wird Lebensmittelfarbe über eine Spritze dem Kernstrom der Strömung zugeführt. Zusätzlich wurden Be- und Entladung mit einer Thermokamera aufgezeichnet.

Bei der Beladung mit einer Temperatur von ca.  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einem Beladevolumenstrom von  $4,5\text{ l/min}$  konnte eine sehr geringe Dicke der Mischzone festgestellt werden. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die Schichtgrenzen zwischen warmem und kaltem Wasser sehr deutlich.

Bei der anschließenden Entladung mit einer Kaltwassertemperatur von ca.  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  strömt das Wasser mit  $9\text{ l/min}$  über den im Speicherboden befindlichen Anschluss in den Speicher ein. Der höhere Volumenstrom bewirkt eine größere Übergangsschicht im Speicher, wie dies in Abbildung 9 zu erkennen ist.

Bei der Rückführung der Zirkulation ist das obere Drittel des Speichers mit einer Temperatur von  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  beladen. Das Rücklaufwasser der Zirkulation hat eine Temperatur von  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durch die Öffnungen im carnotartigen Diffusor schichtet sich das zirkulierende Wasser leicht unterhalb der Warmwasserschicht von  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein. Abbildung 10 zeigt, wie das Zirkulations-Rücklaufwasser strahlenförmig aus den Bohrungen des Diffusors austritt und sich entsprechend seiner Dichte einschichtet.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Optimierung der Einströmgeometrie in Schichtladespeichern trägt wesentlich zur



Abbildung 5: Versuchsstand mit angeschlossenem Modellspeicher.

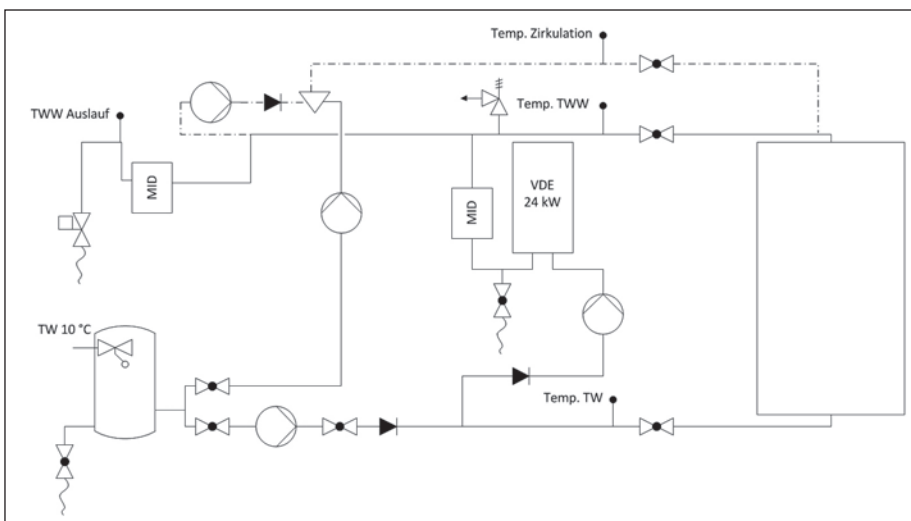


Abbildung 6: Hydraulikschema des Versuchsstandes

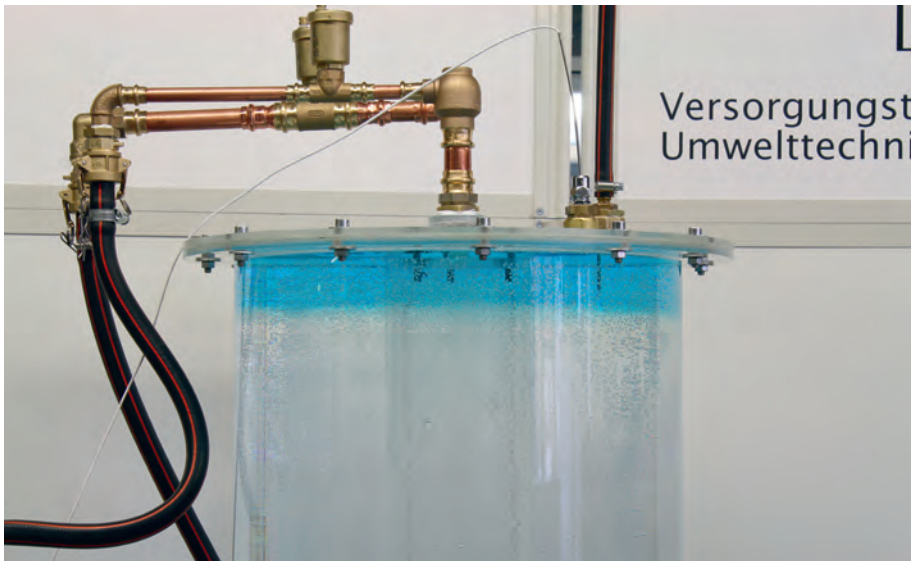


Abbildung 7: Einschichtung des Warmwassers oben im Speicher, 90 Sekunden nach Beladbeginn.

Erhöhung des Nutzungsgrades von Trinkwarmwasserspeichern bei. Ebenso wichtig ist die richtige Rückführung der Zirkulationsleitungen in den Speicher.

Durch den Bau eines Versuchsstandes im Gas-Wasserlabor der Hochschule Esslingen können Strömungsvorgänge beim Be- und Entladen von Schichtspeichern gezeigt werden. Ein Plexiglasspeicher, integriert in ein Versorgungssystem mit Kalt-, Warm- und Zirkulationsleitungen ermöglicht den Betrieb unter realen Bedingungen. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen bereits eine sehr gute Schichtung mit kleiner Mischzone. Auch die Rückführung der Zirkulation in den Speicher mittels eines Diffusors ermöglicht ein impulsarmes Einschichten des kühleren Zirkulationskreises. Hier sind aber mit Hilfe von CFD-Simulationen noch weitere Verbesserungen zu erwarten. Eine neue Art einer Temperaturmesssonde, hergestellt aus kostengünstigen Sensoren, ermöglicht für die Untersuchungen eine gute Erfassung der Speichertemperaturen. Solche Sonden können auch zukünftig für die Einbindung und den Betrieb von Speichern in komplexen Anlagen eine wichtige Komponente sein.

In einer weiteren Arbeit sollen weitere Visualisierungstechniken wie Laser-Doppler-Anemometrie und Laserlichtschnittverfahren untersucht werden um noch bessere Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge an der Prallplatte und dem Zirkulationsrücklauf zu erhalten.

Mit dem neuen Versuchsstand können den Studierenden im Rahmen von Laborversuchen die grundlegenden strömungsmechanischen Vorgänge bei der Be- und Entladung von Schichtladespeichern demonstriert

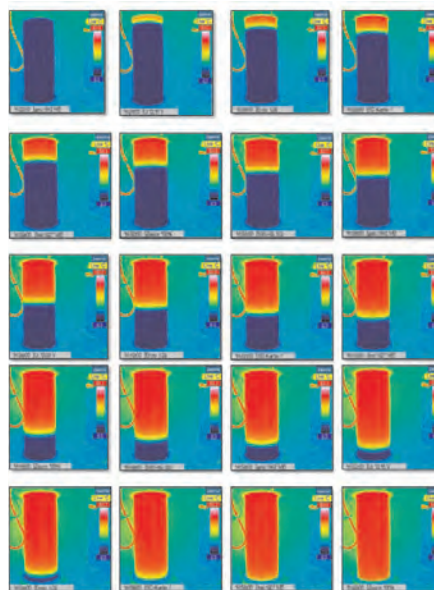


Abbildung 8: Thermografische Aufnahme einer vollständigen Beladung mit 52 °C und einem Beladdevolumenstrom von 4,5 l/min

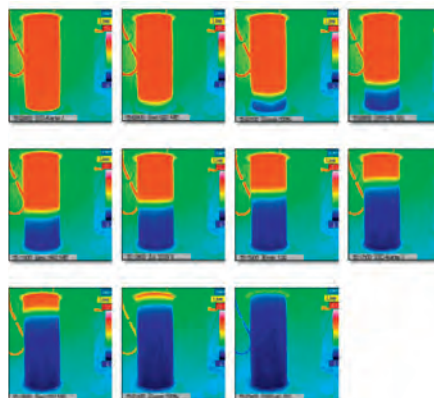


Abbildung 9: Thermografische Aufnahme der Entladung mit einem Entladdevolumenstrom von 9 l/min und einer Kaltwassertemperatur von 9,3 °C.

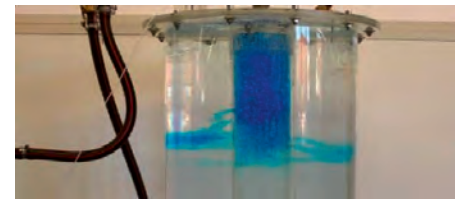


Abbildung 10: Einschichtung des Zirkulationsrücklaufs im Speicher.

werden. Weiterhin ist es möglich, die wesentlichen Komponenten sowie das Gesamtsystem Speicher noch weiter zu verbessern. Hier kann sich die Fakultät Gebäude-Energie- und Umwelttechnik auch eine Zusammenarbeit mit Herstellern aus der Heizungs- und Sanitärbranche vorstellen. Der in diesem Beitrag gezeigte Versuchsstand wurde bereits 2012 auf der IFH-intherm in Nürnberg gezeigt und hat dort unter dem Fachpublikum großes Interesse geweckt. ◀

#### Literatur

- [1] Akkawi, P.: Konzeption und Aufbau eines Prüfstandes zur Visualisierung von Strömungen in Schichtladespeichern, unveröffentlichte Bachelorarbeit an der Hochschule Esslingen, 2012
- [2] Fitzner, K: Rietschel, Raumklimattechnik, Band 3: Raumheiztechnik, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-57180-9, 16. Auflage, 2005
- [3] Striebel, D., Äda, W.: Modell für Langzeitwärmespeicher. Forschungsbericht T 81-176 vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, 1981
- [4] Huhn, R.: Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. Dissertation TU-Dresden Fakultät Maschinenwesen, 2007
- [5] DVGW Arbeitsblatt W 553: 1998-12 Bemessung von Zirkulationssystemen in zentralen Trinkwassererwärmungsanlagen
- [6] Frank, J.: Temperaturmessung mit One-Wire-Tempertursondator DS 1820 unveröffentlichte Projektarbeit, Hochschule Esslingen, 2010