

Kennzahlen für die Evaluierung der Konstruktion und Betriebsführung von Wärmespeichern

Robert HUHN¹, Jens TÖDTER²

¹Institut für Energietechnik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
email: rhuhn@metrs1.mw.tu-dresden.de

²Fernwärmeforschungsinstitut in Hannover e.V., 30966 Hemmingen
email: toedter@fernwaerme.de

SCHLAGWORTE

Wärmespeicherung, Evaluierung, thermische Schichtung, Exergie, innere Verluste

KURZFASSUNG

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt von Fernwärmeforschungsinstitut in Hannover e.V. (FFI) und dem Institut für Energietechnik der TU Dresden wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen zum thermischen Verhalten von Wärmespeichern für Trinkwarmwasser und Heizungsanwendungen durchgeführt. Schwerpunkt der Arbeit war die Evaluierung der energetischen und exergetischen Effizienz von Wärmespeichern und deren Bewertung mit dimensionslosen Kennziffern. Von besonderem Interesse waren dabei die Einflüsse der inneren Verlustprozesse, wie vertikale Wärmeleitung und zeitliche Veränderung der Temperaturmischzone im geschichteten Wärmespeicher, auf die sich ergebenden Exergieverluste.

Ein einheitliches Kennziffernsystem zur Beschreibung des Input-/Outputverhaltens und eine Berechnungsmethode zur Quantifizierung der inneren Verluste sowie der Gesamtverluste eines Wärmespeichers wurde entwickelt. Zusätzlich konnten eine Prüfvorschrift für die Bestimmung der Kennziffern und Empfehlungen zur Speicherkonstruktion und -betriebsführung erstellt werden. In Zukunft werden bei Anwendung des Bewertungs- und Prüfverfahrens ein besserer Vergleich von Wärmespeichern sowie Primärenergieeinsparungen und eine erhöhte Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Nutzung thermischer Energie erwartet.

1. EINLEITUNG

Wärmespeicher tragen bei optimierter Integration in Wärme- und Kälteanlagen zur Einsparung von installierter Erzeugerleistung, Brennstoffeinsatz und Betriebskosten bei. Durch die Glättung von Belastungsspitzen und die Vergleichmäßigung der Fördermengen in Rohrleitungssystemen erhöhen sie die Lebensdauer von Anlagenkomponenten. Optimal ausgewählte und dimensionierte Speicher können bei sachgerechter Einbindung in die Abnehmeranlagen der Wärmeversorgungssysteme zu einer Verminderung der Netzzücklauftemperatur und damit zu geringeren Umwälzkosten und Wärmeverlusten bei gleichzeitiger Erhöhung der Stromerzeugung in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung beitragen.

Entscheidend für die Effizienzsteigerung von Wärmespeichern mit thermischer Schichtung ist die Ausbildung und Aufrechterhaltung einer schmalen Mischzone zwischen dem wärmeren und kälteren Bereich des Speichers. Je größer die Temperaturmischzone, desto geringer ist der nutzbare Teil des Speichervolumens. Die Höhe dieser Zone ist von der Gestaltung der Be- und Entladevorrichtungen und auch von der Betriebsweise abhängig. Aufgrund der vertikalen Wärmeleitung im Speicher breitet sich die Mischzone mit der Zeit aus.

Eine Vielzahl Untersuchungen zur Modellierung und Bewertung der Temperaturschichtung sind bereits angestellt worden, z.B. [1], [2], [3]. Besonders im Bereich Wärmespeicher für Solaranlagen liegen ausführliche Untersuchungen zu thermischen Verlusten vor [4]

Die von den Autoren durchgeführten praktischen Untersuchungen an Wärmespeichern haben bestätigt, dass Wärmeausgleichsvorgänge im Inneren eines Speichers einen deutlichen Anteil der Gesamtverluste darstellen [5]. Diese inneren Verluste entstehen aufgrund von Mischungsvorgängen bei Be- und Entladung, innerer Wärmeleitung zwischen unterschiedlich temperierten Schichten sowie auch aus freier Konvektion im Speicherbehälter. An zwei aus Plexiglas gefertigten Modellspeichern konnten einige dieser Prozesse visualisiert werden. Besonders die Mischungsvorgänge in Abhängigkeit von der konstruktiven Gestaltung der Einströmöffnung im Speicher und der strömungstechnischen Parameter und ihre Auswirkungen auf die thermischen Speicherkennziffern sind an diesen Modellen studiert worden.

Die thermische Prüfung und Bewertung von Wärmespeichern erfolgt heute nach verschiedenen Ansätzen. Die Modellierung der Speicher im Rahmen einer Jahresbetriebssimulation ist eine Möglichkeit. Dafür werden oft eindimensionale Speichermodelle verwendet, in denen nicht alle einzelnen physikalischen Vorgänge direkt berechnet werden. Einige verlustbehaftete Vorgänge, wie z.B. die vertikale Wärmeleitung, werden mit Parametern berechnet, die experimentell und mit Hilfe von Parameteridentifikationssoftware ermittelt werden. Durch Prüfmessungen werden diese Parameter für jedes einzelne Speichermodell bestimmt, was mehrere Tage bis Wochen in Anspruch nehmen kann [6]. Auswirkungen der Speicherkonstruktion werden nur in ihrer Gesamtheit erfasst. Die in Deutschland geltenden Speichernormen betreffen neben konstruktiven Vorgaben hauptsächlich die thermische Leistungsprüfung in Kombination mit einem Wärmeerzeuger sowie die Ermittlung des Bereitschaftswärmeaufwandes. Damit ist die Energie gemeint, die von der Heizeinrichtung des Speichers zur Bereithaltung des warmen Wassers ohne Wasserentnahme aufgenommen werden muss. Einzelne Verlustquellen können damit nicht identifiziert werden.

Es besteht ein Mangel an Bewertungsmethoden, welche die Qualität der Wärmespeicherung mit einbeziehen. Die kausale Verknüpfung von Details der Speicherkonstruktion und -betriebsweise zu den inneren und äußeren Verlusten würde nützliche Information liefern, die zur Reduzierung der Verluste in Wärmespeichern führen könnten.

2. SCHWERPUNKT DER UNTERSUCHUNGEN

Wärmespeicher mit Wasser als Speichermedium sind die am meisten angewendete Art von Wärmespeichern, die bei Systemen für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Nah- und Fernwärmeversorgung und auch bei industriellen Prozessen eingesetzt werden. Latentwärmespeicherung und Wärmespeicherung mit chemischen Reaktionen ist mit anderen Materialien und Technologien möglich, was aber im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

Wärmespeicher für Heizung und Warmwasserbereitung werden überwiegend in einem Bereich von etwa 100 l bis 1000 l eingesetzt. Diese Speicherbehälter werden fast ausschließlich in zylindrischer Form angeboten.

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf dieses Segment von Wärmespeichern. Entsprechend ihrer Funktion können sie in mehrere Gruppen unterteilt werden. Betrachtet werden nur indirekt mit innenliegenden Wärmeübertragern beladene und direkt beladene Speicher (Ladespeicher).

2.1. Kennziffern zur Bewertung von Wärmespeichern

Dimensionslose Kennziffern für konstruktive Ähnlichkeiten und das thermische Speicherverhalten sind dienen dazu, verschiedene Wärmespeicher zu beurteilen und miteinander zu vergleichen. Ihr Wert sollte möglichst zwischen 0 und 1 liegen. Die hier verwendeten Ähnlichkeitskennziffern wurden in zwei Gruppen unterteilt:

- Geometrie und Material
- Energie und Exergie.

Beispiele für Kennziffern bezüglich Geometrie und Material

- Höhen-Durchmesser-Verhältnis H/D
- Verhältnis der vertikalen Temperaturleitfähigkeit im Speichermedium zu der im gesamten Speicherquerschnitt
- Verhältnis der Wärmekapazität des Speichermediums zur Wärmekapazität des gesamten Speichers

Beispiele für energetische und exergetische Kennziffern

- energetischer Nutzungsgrad ζ_{en}

$$\zeta_{en} = \frac{- \int_{t_0}^{t_E} \Delta \dot{H}_{Entl} \cdot dt}{\int \Delta \dot{H}_{Lad} \cdot dt} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit $\Delta \dot{H}_{Entl} = \dot{m}_{Entl} \cdot \Delta h_{Entl} = \dot{m}_{Entl} \cdot c_p \cdot (\mathcal{G}_{Sp,Entl,aus} - \mathcal{G}_{Sp,Entl,ein})$ Gleichung 2

$$\Delta \dot{H}_{Lad} = \dot{m}_{Lad} \cdot \Delta h_{Lad} = \dot{m}_{Lad} \cdot c_p \cdot (\mathcal{G}_{Sp,Lad,aus} - \mathcal{G}_{Sp,Lad,ein}) \quad \text{Gleichung 3}$$

- energetischer $\zeta_{en,ges}$ and exergetischer $\zeta_{ex,ges}$ Gesamtnutzungsgrad

$$\zeta_{en,ges} = \frac{- \int \Delta \dot{H}_{Entl} \cdot dt + \Delta U_{Sp,Rest}}{\int \Delta \dot{H}_{Lad} \cdot dt} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit $\Delta U_{Sp,Rest} = m_{SM} \cdot c_v \cdot (\bar{\mathcal{G}}_{Sp} - \mathcal{G}_{Bezug})$ Gleichung 5

$$\zeta_{ex,ges} = \frac{- \int \Delta \dot{E}_{Entl} \cdot dt + \Delta E_{Sp,Rest}}{\int \Delta \dot{E}_{Lad} \cdot dt + \int P_{Pumpe} \cdot dt} \quad \text{Gleichung 6}$$

mit $\Delta E_{Sp,Rest} = m_{SM} \cdot c_v \cdot \left(\bar{\mathcal{G}}_{Sp} - \mathcal{G}_{Bezug} - (\mathcal{G}_U + 273,15K) \cdot \ln \frac{\bar{\mathcal{G}}_{Sp} + 273,15K}{\mathcal{G}_{Bezug} + 273,15K} \right)$ Gleichung 7

$$\int \Delta \dot{E}_{Entl} \cdot dt = c_p \cdot \int \dot{m}_{Entl} \cdot \left(\mathcal{G}_{Sp,Entl,aus} - \mathcal{G}_{Sp,Entl,ein} - (\mathcal{G}_U + 273,15K) \cdot \ln \frac{\mathcal{G}_{Sp,Entl,aus} + 273,15K}{\mathcal{G}_{Sp,Entl,ein} + 273,15K} \right) \cdot dt$$

Gleichung 8

$$\int \Delta \dot{E}_{Lad} \cdot dt = c_p \cdot \int \dot{m}_{Lad} \cdot \left(\mathcal{G}_{Sp,Lad,aus} - \mathcal{G}_{Sp,Lad,ein} - (\mathcal{G}_U + 273,15K) \cdot \ln \frac{\mathcal{G}_{Sp,Lad,aus} + 273,15K}{\mathcal{G}_{Sp,Lad,ein} + 273,15K} \right) \cdot dt$$

Gleichung 9

- Volumenanteil der Mischzone am Speichervolumen bei Be-/Entladung Ψ_{MZ}
- zeitlicher Abbau der Temperaturschichtung (Schichtungsabbaufaktor)

Bei den Nutzungsgraden erfolgt eine Bilanzierung der entladenen Energie-/Exergiemenge zu der bei Beladung zugeführten Menge, wobei nur beim Gesamtnutzungsgrad die komplette Entladeenergie/-exergie betrachtet wird. Der energetische Nutzungsgrad berücksichtigt nur den „wertvollen“ Anteil mit einer Temperatur $\vartheta_{Sp,aus,real} \geq \vartheta_{Sp,aus,grenz}$. Die Energiemengen werden über die dem Speicher zu- und abgeführten Enthalpieströme bei Betrachtung differentiell kleiner Zeitschritte dargestellt. Die Wärmekapazitäten c_p und c_v des Wassers sind wegen der Inkompressibilität nahezu gleich groß.

Der Volumenanteil der Mischzone und deren zeitliche Stabilität lassen sich aus dem gemessenen Temperaturverlauf am Speicheraustritt mit Hilfe der geometrischen Daten des Speicherbehälters bestimmen. Die Beurteilung des Schichtungsabbaus erfolgt im Vergleich zu dem theoretischen – und damit idealen – Fall der instationären Wärmeleitung in einer einseitig unendlichen ausgedehnten ebenen Wand nach einem Temperatursprung. Dieser ideale Fall stellt die ausschließliche vertikale Wärmeleitung im Speichermedium dar und wird mit dem realen Vorgang der Wärmeleitung in Speichermedium, Behälterwand und den Einbauten im Behälter verglichen. Auch Konvektion kann im realen Speicher einen Einfluss haben.

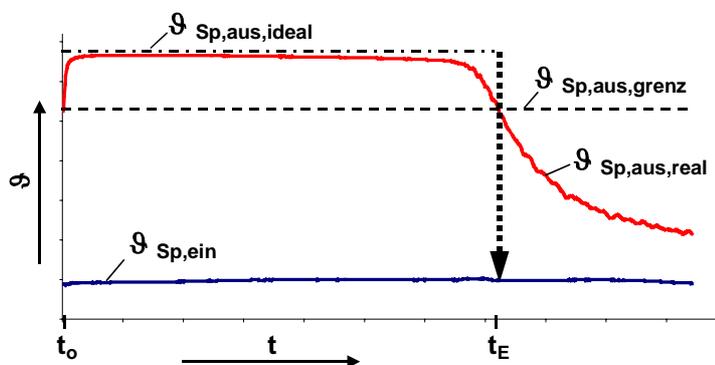


Abb. 1: Temperaturverlauf bei Speicharentladung.

2.2. Bewertungssystem auf Basis der Kennziffern

Wärmeverluste (oder Energieverluste) sind stets äußere Verluste, während Exergieverluste durch innere und äußere Verluste auftreten können. Deshalb ist eine getrennte Betrachtung der inneren und der gesamten Verluste durch die Kombination der oben definierten energetischen und exergetischen dimensionslosen Kennziffern möglich.

Der Exergieverlust aufgrund von Wärmeverlusten kann aus den Energieverlusten und der mittleren Speichertemperatur zu Beginn und Ende des Betrachtungsintervalls berechnet werden. Entsprechend der nachfolgenden Gleichung kann der dimensionslose innere Verlustgrad (hier: Exergieverlust) für eine Testsequenz "Beladen – kurzer Stillstand – Entladen" hergeleitet werden. Die Gleichung gilt nur für kurze Stillstände, in denen der Wärmeverlust des Speichers gering ist [7].

$$\varphi_{Intern, ex} = 1 - \frac{\zeta_{ex, ges}}{\zeta_{en, ges} \cdot \frac{T_{m,0} \cdot (T_{m,1} - T_{Entl})}{T_{m,1} \cdot (T_{m,0} - T_{Entl})}} \quad \text{Gleichung 10}$$

Die Indizes 0 und 1 stehen für „nach Beladung“ und „vor Entladung“. Die mittlere Temperatur $T_{m,1}$ wird aus dem energetischen Gesamtnutzungsgrad berechnet, während $T_{m,0}$ auf den Wert der Beladetemperatur gesetzt wird.

Die Exergie ist eine physikalische Größe zur Bewertung der Wertigkeit der gespeicherten Energie, jedoch am Beispiel eines Wärmespeichers nicht besonders anschaulich. Das oben genannte Verfahren ist aber auch für die Ermittlung des inneren Verlustgrades $\varphi_{Intern, WW}$ bezogen auf das Zapfwarmwasser bzw. Heizwarmwasser geeignet. Hierfür kann der energetische Nutzungsgrad direkt vom energetischen Gesamtnutzungsgrad subtrahiert werden, da die inneren Verluste nur in ζ_{en} , aber nicht in $\zeta_{en, ges}$ enthalten sind.

$$\varphi_{Intern, WW} = \zeta_{en, ges} - \zeta_{en}$$

Gleichung 11

2.3. Zusammenwirkung von Wärmespeicher und vorgeschaltetem Wärmeerzeuger

Innere Verluste verursachen eine schlechtere Temperaturschichtung sowie deren schnelleren Abbau. Sie führen auf diese Art zu höheren mittleren Rücklauftemperaturen vom Wärmespeicher hin zum Wärmeerzeuger. Ein Anstieg der Rücklauftemperatur um 1 K wurde als Basis für den Vergleich der Auswirkungen der inneren Verluste auf die Effizienz von verschiedenen vorgeschalteten Wärmeerzeugern verwendet. Eine statische Sensibilitätsanalyse ergab, dass die deutlichsten Folgen bei thermodynamischen Linksprozessen mit niedrigem Temperaturhub und bei Anlagen, in denen thermische Verluste eine große Rolle spielen, zu erwarten sind. Flachkollektoren ($\Delta\eta_{th} \approx -0.7 \%/K$) und Fernwärmesysteme ($\Delta\dot{Q}_{Verl} \approx +0.5..1 \%/K$) gehören zu der letzteren Gruppe. Eine Verschlechterung der Leistungszahlen (COP) errechnet sich für Kompressionswärmepumpen (1-2 %/K). Bei Kompressionskältemaschinen (für Kältespeicher) fällt sie wegen des niedrigeren Temperaturhubs etwas stärker aus (1.5-3 %/K). In Blockheizkraftwerken nimmt der totale Nutzungsgrad ab (ca. 0,2 %/K) und die Blockleistung muss bei wärmegeführter Fahrweise erhöht werden ($\Delta P_{el} \approx 0.5 \%/K$). Für Brennkessel ergibt sich eine Verringerung des Normnutzungsgrades um ca. 0,25 %-Punkte (Öl) bzw. ca. 0,4 %-Punkte (Gas), vorausgesetzt, dass das Rauchgas bis unterhalb des Taupunktes abgekühlt wird [7].

3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1. Versuchseinrichtungen

An den beiden Forschungsstellen FFI und TU Dresden wurden Versuchsstände mit mehreren Wärmespeichern errichtet, darunter zwei Ladespeicher, ein Speicherwassererwärmer, ein Speicher für Heizwasser und indirekte Warmwasserbereitung sowie je ein Plexiglasmodellspeicher mit ca. 175 l Volumen zur Visualisierung der inneren Strömungs- und Mischungsvorgänge (Abb. 4).

Die oben beschriebenen Kennziffern wurden an diesen Testspeichern auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft und exemplarisch bestimmt. Die Ermittlung der thermischen Kennziffern stützt sich ausschließlich auf Messwerte von Temperaturverlauf und Durchfluss an den Anschlussleitungen der Speicher. Die Speicher werden dabei als Blackbox betrachtet. In einer Vielzahl verschiedener Testfolgen wurden die qualitativen Merkmale der Wärmespeicherung untersucht. Auf diese Weise können verschiedene Speicherarten unabhängig von ihrem inneren Aufbau miteinander verglichen werden.

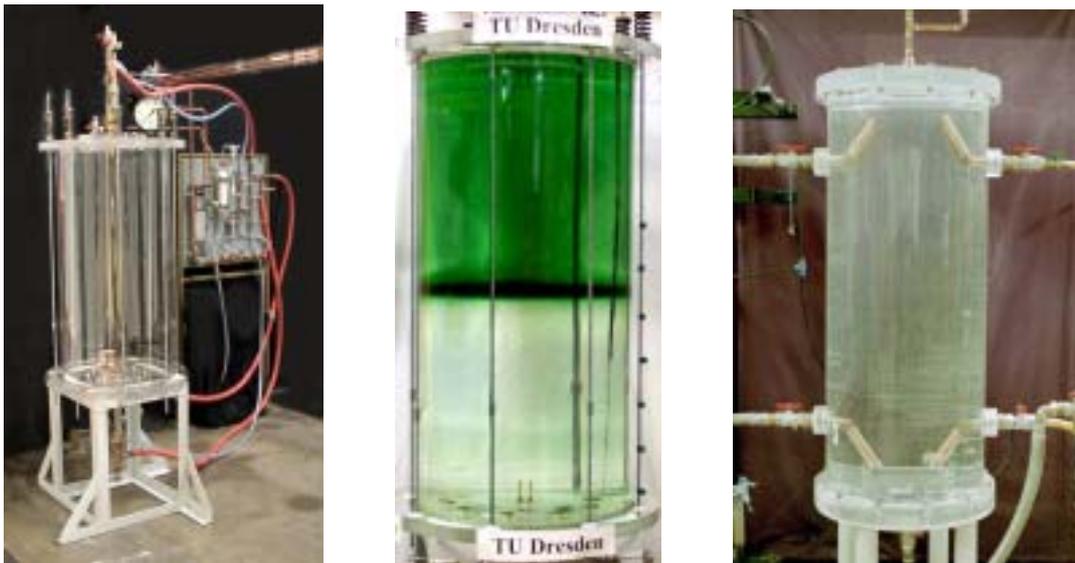


Abb. 2: Plexiglasmodellspeicher an TU Dresden (links und Mitte) und FFI Hannover (rechts).

Der Plexiglasmodellspeicher der TU Dresden verfügt über auswechselbare Deckel und ermöglicht den Einbau verschiedener Einströmarmaturen. Vertikale und tangentielle Einströmröhre verschiedener Durchmesser, Prallplatten mit verstellbarer Spalthöhe und ein Sieb konnten unter verschiedenen thermischen und strömungstechnischen Randbedingungen getestet werden. Plexiglas, transparent wie Fensterglas, erlaubt die visuelle Erfassung der inneren Strömungsvorgänge. Durch Anfärben des einströmenden Wassers wird der erforderliche Kontrast erzeugt, um Strömungsweg und Mischungsvorgänge zu beobachten.

3.2. Bestimmung der Kennziffern

Das Testverfahren zur Bestimmung der thermischen Kennziffern orientiert sich an bestehenden Speicherprüfnormen (DIN 4708, DIN V ENV 12977-3). Damit ist eine weitreichende Vergleichbarkeit mit diesen Testverfahren gegeben. Speicher mit direkter Beladung, Speicher mit externen oder internen Wärmeübertragern können bezüglich der Temperaturschichtung und deren Verhalten bei Stillstand geprüft werden.

Vor jeder Testfolge wird der Speicher auf 20 °C Anfangstemperatur konditioniert. Die Beladung erfolgt mit konstant 60 °C. Entladungs- und Umgebungstemperatur sind auf 20 °C festgeschrieben.

Die Be- und Entladevolumenströme sind normiert. Der hohe Volumenstrom $\dot{V}_1 = \frac{0,9 \cdot V_{Sp}}{10 \text{ min}}$ bildet eine realistische Warmwasserzapfung ab. Die Fähigkeit zur geschichteten Entladung bei hohen Zapfvolumenströmen stellt eine Hauptanforderung an Warmwasserspeicher dar. Der niedrige Volumenstrom $\dot{V}_2 = \frac{2 \cdot V_{Sp}}{60 \text{ min}}$ dient als Vergleich und zur Untersuchung der Schichtungsstabilität.

Die vier durchgeführten Teilversuche lassen sich in ein Ablaufschema gliedern (Abb. 3).

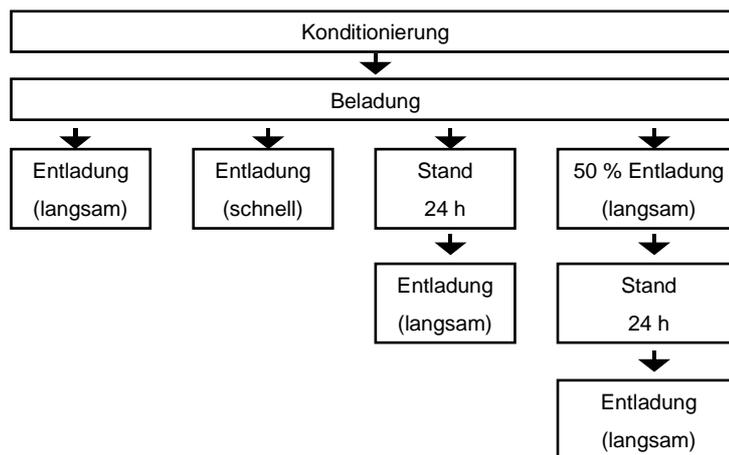


Abb. 3: Ablaufschema der vier Teilversuche

Die Messungen mit Stillstand bestätigten die Zunahme der energetischen und exergetischen Nutzungsgrade mit steigendem Speichervolumen. Bei sofortiger Entladung ist der innere Speicheraufbau und die Speichergeometrie (H/D-Verhältnis) entscheidend für die inneren Verluste.

3.3. Ursachenforschung nach Verlustquellen

Die Analyse der Ursachen für innere Speicherverluste erfolgte sowohl theoretisch als auch experimentell. Bei den Speichertests wurden hinsichtlich der Ausbreitung der Temperaturmischzone folgende Aspekte berücksichtigt:

- Konstruktion der Einströrmarmaturen
- Abhängigkeit von Temperaturdifferenz Speicherinhalt – Zustrom und Beladungs-/Entladungsvolumenstrom
- Abbau der Temperaturschichtung mit der Zeit, Einflüsse aus Speicherkonstruktion und –material

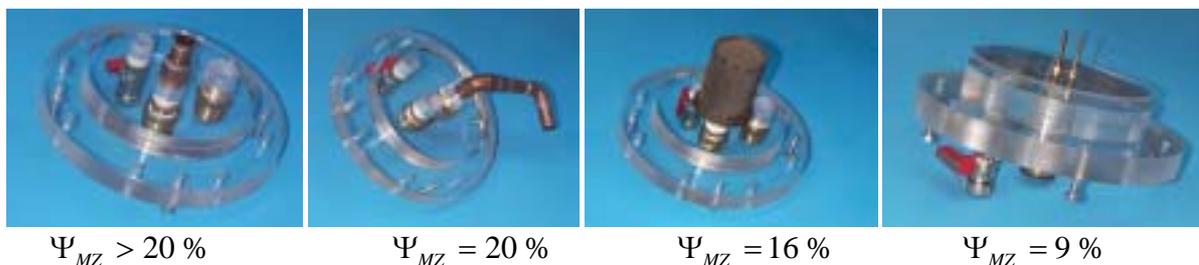


Abb. 4: Austauschbare Deckeleinbauten des Plexiglasmodellspeichers und Ermittelte Volumenanteile der Mischzone bei Entladung mit hohem Volumenstrom, von links: vertikales Rohr, tangenciales Rohr, Sieb und Prallplatte mit variabler Spalthöhe.

Bei Entladung mit hohem Volumenstrom wurden je nach Deckeleinbau unterschiedliche Volumenanteile der Mischzone ermittelt (Abb. 4). Das beste Resultat wird mit der Prallplatte erzielt.

Eine stark reduzierte Einströmgeschwindigkeit und eine letztendlich horizontale Einströmung in den Speicher haben sich als wichtigste Parameter erwiesen. Ein hoher Temperaturunterschied zwischen Speicherinhalt und dem zuströmenden Medium unterstützt die thermische Schichtung. Die vertikale Wärmeleitung in Speichermedium und Behälterwand ist nicht zu vernachlässigen und kann die Vorteile einer sehr guten Schichtbeladung bei kleinen Speicherbehältern zunichte machen.

Weiterhin wurden die Details der Wärmeverluste bei Stillstand studiert. Negative Auswirkungen auf die Temperaturschichtung sind beim Nachladen von geschichtet teilentladenen Speichern mit innenliegenden Wärmeübertragern festgestellt worden. Im nachzuladenden Speicherbereich bildet sich eine freie Konvektionsbewegung aus. Der Bereich oberhalb des Wärmeübertragers bis hin zur

bestehenden Mischzone durchmischt sich dabei vollständig. In diesen Mischvorgang wird auch ein Teil der Mischzone mit einbezogen und auf eine niedrigere Temperatur abgemischt.

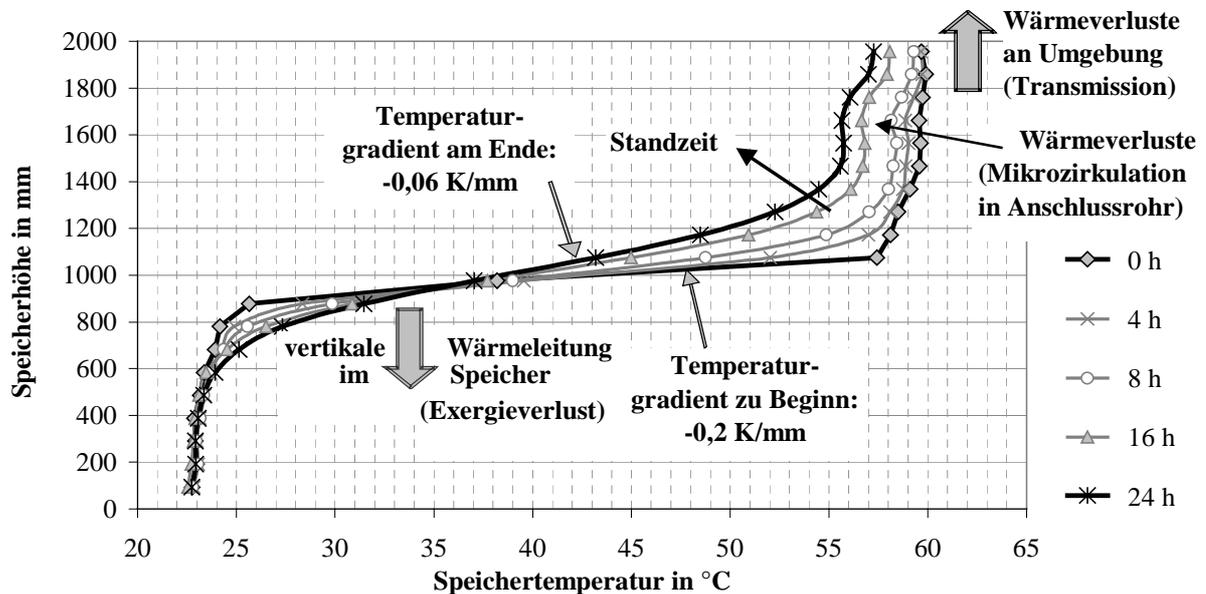


Abb. 5: Temperaturverlauf im 1000 l-Speicherwassererwärmer bei 24 h Stillstand, zu Beginn geschichtet halb entladen – Details der Wärmeverluste und der inneren Verluste.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass innere und äußere Verluste in Warmwasserspeichern von derselben Größenordnung sein können. Der Anteil der inneren Verluste hängt von Speicherkonstruktion, Volumenströmen, Nachladestrategie sowie Dauer und Anzahl von Stillstandsperioden ab. Die Wärmeverluste an die Umgebung machen heute immer noch einen großen Teil der Gesamtverluste in der Praxis aus. Im folgenden einige Empfehlungen, zur Senkung der Speicherverluste und zur Verbesserung der thermischen Schichtung:

1. Sehr gute Isolierung des Speicherbehälters und der Anschlussleitungen
2. Geeignete Anschlussleitungen [4] oder besser alle Leitungen durch Behälterboden führen (Mikrozirkulation vermeiden)
3. Hoher Einströmquerschnitt für niedrige Einströmgeschwindigkeit (1 cm/s erwies sich als günstig bei Speichertests)
4. Dünne Behälterwand aus Material mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (Edelstahl, Kunststoff), Vermeidung von Einbauten mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Verluste durch vertikale Wärmeleitung)
5. Niedrige Wärmespeicherkapazität in Behälterwand und Einbauten (Temperaturschichtungsverluste)
6. Nachladung von teilentladenen Speichern mit internem Wärmeübertrager so spät wie möglich zur Reduzierung von Mischverlusten in der wärmeren Speicherschicht (induzierte Konvektion)

Das vorgeschlagene Prüfverfahren ist in Prüflabors ausführbar. Die Bewertungsmethode ermöglicht Aussagen über innere Verluste, Gesamtverluste und Merkmale der thermischen Schichtung im Speicher.

Die Berücksichtigung der Warmwasserzirkulation und einer optimierten Regelstrategie (mit Beachtung hygienischer Forderungen) sowie eine detailliertere Modellierung der inneren Speicherverluste könnten Themen zukünftiger Untersuchungen sein.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt [3] - eine Kooperation von TU Dresden und Fernwärmeforschungsinstitut in Hannover e.V. – wurde finanziell vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) unterstützt - AiF Projektnr. 12588 B.

Der Abschlussbericht dieses Forschungsthemas ist über die Autoren an beiden Forschungsstellen erhältlich.

Literatur

- [1] Rosengarten, G.; Morrison, G.; Behnia, M.: A Second Law Approach to Characterising Thermally Stratified Hot Water Storage With Application to Solar Water Heaters. *Journal of Solar Energy Engineering* Nov.1999, S. 194-200
- [2] Chen, Yang: Numerische Untersuchung des Strömungs- und Wärmeübertragungsverhaltens in zylindrischen Warmwasserspeichern / vorgelegt von Yang Chen – Clausthal-Zellerfeld : Papierflieger, 1999.
- [3] Zurigat, Y. H.; Maloney, K. J.; Ghajar, A. J.: A Comparison Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tanks. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 111, pp. 204-210, 1989.
- [4] Dr. rer. nat. Rolf Meißner, Dipl.-Ing. Andreas Siegemund, Dr.-Ing. Ulrich Leibfried: Mehrtagespeicher für Solaranlagen – Ein Gemeinschaftsprojekt von Consolar und Paradigma. Quelle: Presseberichte Frankfurt/M, 06/2001 und <http://www.consolar.de/aktuell.html>.
- [5] Huhn, R.: Evaluation of design and operation of hot water storage tanks. - Proceedings of The 8th International Symposium on District Heating and Cooling, Trondheim 2002.
- [6] Drück, H; Hahne, E.; Heidemann, W.: Thermische Prüfung und Vergleich von Kombispeichern; 10. Symposium Thermische Solarenergie S. 440-444.
- [7] Huhn, R., Tödter, J.: Evaluierung der konstruktiven Gestaltung und Betriebsführung von Wärmespeichern nach einem einheitlichen Kennziffersystem. AiF-Projekt Nr. 12588 BG, Abschlussbericht. TU Dresden/FFI Hannover, Dezember 2002.