

Optimierte Integration von Pufferspeichern

Nicht nur die Größe von Pufferspeichern sondern auch deren hydraulische und regelungstechnische Einbindung beeinflussen deren effektiv speicherbare Wärmemenge maßgeblich

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß, Dipl. Ing. (FH) Christian Dietrich
Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach

Einleitung

In hydraulischen Systemen spielen Pufferspeicher, in denen Wasser als Speichermedium verwendet wird, eine große Rolle. Sie werden eingesetzt, wenn die Gleichzeitigkeit von Wärmebedarf und Wärmeangebot nicht gegeben ist. Hierzu zählt der Anwendungsbereich der Solarthermie genauso wie die Reduzierung der Takthäufigkeit von Wärmeerzeugern (Heizungskessel, BHKW's), deren Heizleistung sich nur eingeschränkt oder stark verlustbehaftet an den aktuellen Verbrauch anpassen lässt. Damit haben Pufferspeicher einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamteffizienz von Thermischen Energiesystemen. Die Aufgabe der Pufferspeicher ist hierbei, möglichst viel Wärme aufzunehmen, sie weitgehend verlustfrei aufzubewahren und dem Verbraucher bei Bedarf auf dem geforderten Temperaturniveau zur Verfügung zu stellen. Die Effizienz solcher hydraulischer Pufferspeicher kann durch die effektive (an den Verbraucher übergebene) volumenspezifische Wärmespeicherung pro Arbeitszyklus beschrieben werden. Bei Pufferspeichern, in denen Wasser als Speichermedium verwendet wird, spielt neben der Wärmedämmung die Temperaturspreizung zwischen Be- und Entladung eine wichtige Rolle. Aber auch der speicherinterne Temperatúrausgleich infolge von Mischvorgängen, Wärmeleitung und Konvektion hat großen Einfluss auf die effektive Speichermenge, was im Bereich der Schichtenspeicher ständig optimiert wird.

Untersuchungen

Ausgangspunkt der vorliegenden Veröffentlichung waren Arbeiten am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach, bei denen im bestehenden Heizungssystem eines Mehrfamilienhauses das Taktverhalten des Block-Heiz-Kraft-Werkes (BHKW) in Abhängigkeit von der hydraulischen Einbindung eines konventionellen Pufferspeichers untersucht wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass die hydraulische Einbindung das Schichtverhalten in konventionellen Pufferspeichern maßgeblich beeinflusst, was sich direkt auf deren Effizienz auswirkt. Wie Abbildung 1 aufzeigt, konnte bei vergleichbaren Randbedingungen die Takthäufigkeit des BHKW's halbiert werden.

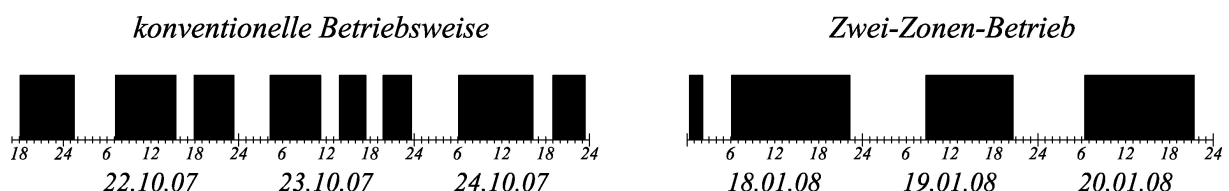


Abb. 1: Taktverhalten des BHKW's im konventionellen- bzw. Zwei-Zonen-Betrieb

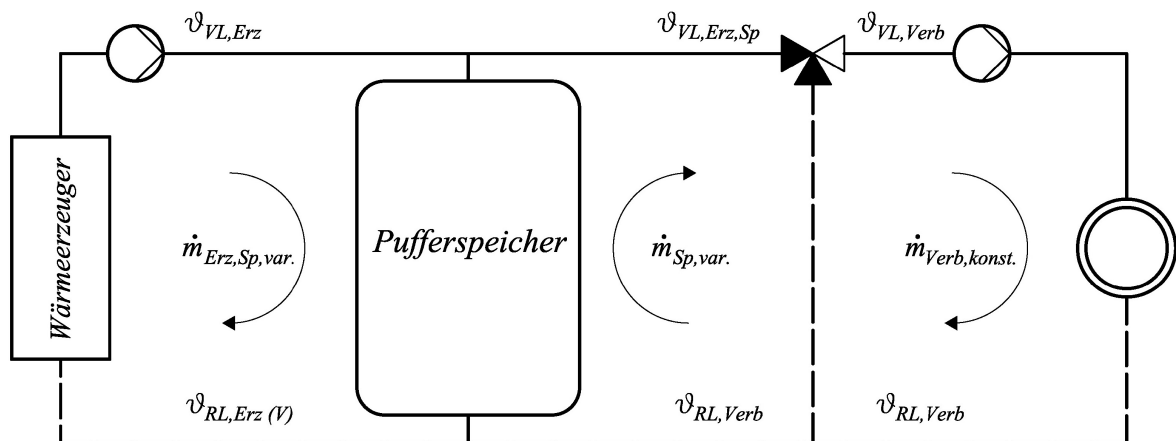
Die effektive Speicherkapazität eines Pufferspeichers lässt sich durch die Positionierung der Temperaturfühler weiter optimieren.

Um diese Zusammenhänge zu erklären, wurde eine graphische Methode entwickelt. Die Speichereffizienz wird hierbei durch Auftragen der Temperatur über die Speicherhöhe ermittelt und anschaulich dargestellt (Speichereffizienzdarstellung nach Dietrich).

Pufferspeicher

Die hier durchgeführten Untersuchungen wurden an einem konventionellen Heizungswasserpufferspeicher ohne Einbauten mit 1.000 Liter Speichervolumen durchgeführt. Die Überlegungen lassen sich auf andere Pufferspeicher - insbesondere Brauchwarmwasserspeicher, aber auch Kältespeicher - übertragen.

Die dem Pufferspeicher zugeführte bzw. abgeführte Energie kann, wie in Abbildung 2 dargestellt, durch das zeitliche Integral aus dem Produkt von Massenstrom, spezifischer Wärmekapazität und Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf auf der Erzeuger- bzw. Verbraucherseite bestimmt werden.



$$Q = \int \dot{m} c_p (v_{VL,Erz} - v_{RL,Erz}) dt$$

$$Q = \int \dot{m} c_p (v_{VL,Verb} - v_{RL,Verb}) dt$$

Abb. 2: Be- und Entladung eines Heizwasserspeichers

Die Effizienz solcher hydraulischer Pufferspeicher kann durch die effektive (an den Verbraucher übergebene) volumenspezifische Wärmespeicherung pro Arbeitszyklus beschrieben werden. Sie ist maßgeblich vom benötigten Vorlauftemperaturniveau des Verbrauchers und von dessen Rücklauftemperatur abhängig, aber auch von der Temperaturverteilung im Pufferspeicher.

Speichereffizienzdarstellung nach Dietrich

Die Speichereffizienzdarstellung nach Dietrich berücksichtigt das Vor- und Rücklauftemperaturniveau des Verbrauchers genauso wie die Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers und die Temperaturverteilung im Speicher. Hierzu wird der Speicher über seine Höhe in horizontale Schichten unterteilt. Die Temperatur in einem Schichtelement wird als konstant angenommen. Der vom Verbraucher theoretisch nutzbare Wärmeinhalt einer solchen Speicherschicht kann nach Gleichung 1 zu

$$dQ_{sp}/dh = Q_{sp,Schicht} = V_{sp,Schicht} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{sp,Schicht} - T_{Rl,Verb})$$

berechnet werden.

Werden für eine erste Betrachtung sowohl die Dichte ρ als auch die spezifische Wärmekapazität c_p als konstant angenommen und ist der Querschnitt des Pufferspeichers über die Höhe konstant, ergibt sich eine konstante Wärmekapazität ($V_{\text{Sp, Schicht}} \cdot \rho \cdot c_p$) über die Speicherhöhe. Die maximal nutzbare Wärmemenge ist damit proportional zur Differenz aus Speichertemperatur der jeweiligen Schicht ($T_{\text{Sp, Schicht}}$) und Rücklauf­temperatur vom Verbraucher ($T_{\text{Rl, Verb}}$). Wird, wie in Abbildung 3 dargestellt, die Höhen­koordinate der Speicherschicht auf der Ordinate und die Temperatur der jeweiligen Speicherschicht auf der Abszisse (mit der Rücklauf­temperatur als Nullpunkt) aufgetragen, so ergibt sich der Wärmeinhalt des Speichers als Fläche links oben neben dem Temperaturprofil, was dem Integral des Produktes aus Wärmekapazität ($V_{\text{Sp, Schicht}} \cdot \rho \cdot c_p$) und Temperatur­differenz ($T_{\text{Sp, Schicht}} - T_{\text{Rl, Verb}}$) über die Speicher­höhe entspricht.

Die effektiv nutzbare Speicherkapazität wird aber durch weitere Parameter eingeschränkt. Bei der Be- und Entladung wird Wasser auf unterschiedlichen Temperaturniveaus in den Speicher eingebracht bzw. entnommen. Hierbei kommt es abhängig von der Speicherkon-

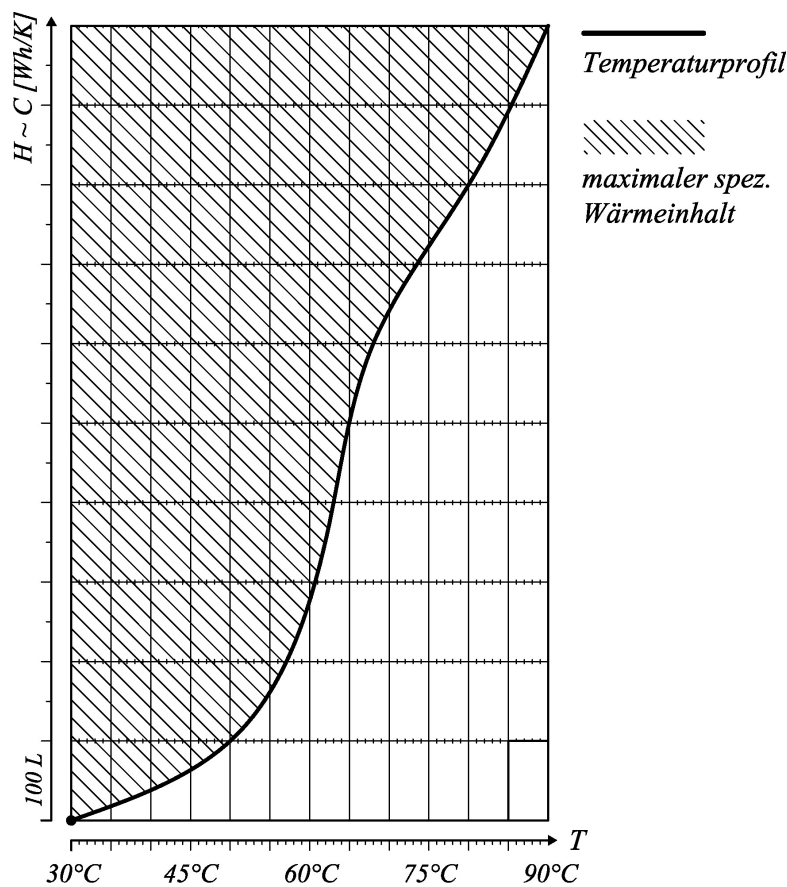


Abb. 3: Maximaler spezifischer Wärmeinhalt in Abhängigkeit von Temperaturprofil im Speicher und der Verbraucher Rücklauf­temperatur

struktion zu einer mehr oder minder starken Durchmischung und damit zu einer Veränderung des Temperatur­profils gegenüber der Kolben­strömung im Speicher. Bei Anlagen­stillstand führen hauptsächlich die vertikale Wärme­leitung und die freie Konvektion zu einer Änderung der Temperatur­verteilung. Darüber hinaus muss die Entladung abgebrochen werden, wenn die Temperatur an der Speicher­entnahme bzw. am Mess­fühler unter die notwendige Versorgungs­temperatur des Verbrauchers fällt.

Idealisierte Pufferspeicher

Um die Einflüsse der Temperaturverteilung im Speicher auf dessen Effizienz weiter zu vertiefen, werden drei idealisierte Speichermodelle eingeführt. Abbildung 4 zeigt die Temperaturverteilung in einem ideal durchmischten, einem ideal geschichteten sowie in einem linear geschichteten Speicher. Der ideal durchmischte wie auch der ideal geschichtete Speicher sind Idealfälle, die in der Realität nicht vorkommen. Je nach Konstruktion und Betriebsweise lassen sich diese idealisierten Zustände aber mehr oder minder gut erreichen. Zusammen mit dem Modell des linear geschichteten Speichers lässt sich die Speicherproblematik gut darstellen und es können entsprechende Strategien zur Prozessverbesserung ergriffen werden.

Der durchmischte (auch ideal gerührte) Speicher besitzt an jeder Stelle dieselbe Temperatur, wohingegen der ideal geschichtete Speicher zwei Temperaturzonen konstanter Temperatur aufweist. Das Temperaturprofil im linear geschichteten Speicher nimmt, wie der Name schon vermuten lässt, von oben nach unten linear ab.

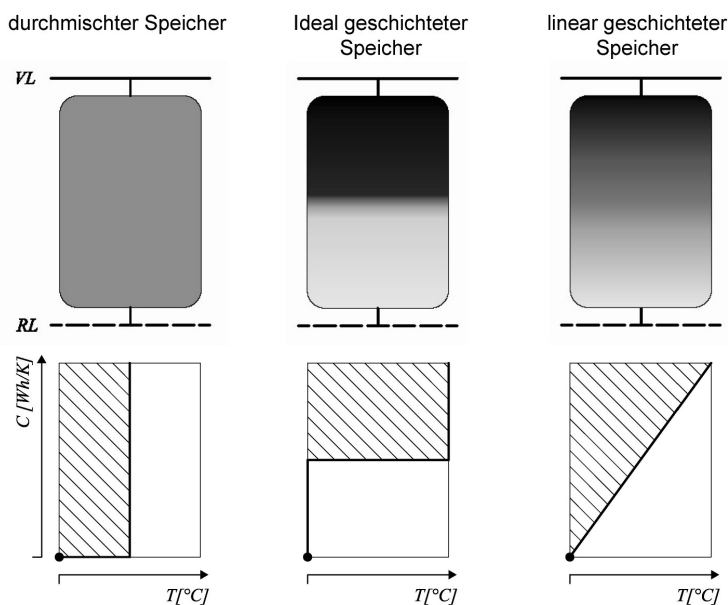


Abb. 4: Idealisierte Speichermodelle samt Temperaturverteilung

Die Be- und Entladung der idealisierten Pufferspeicher

Das unter 2.2 eingeführte Gedankenmodell nach Dietrich zur Darstellung der gespeicherten Wärme von Pufferspeichern (vgl. Abbildung 3) soll jetzt für jeweils einen vollen Zyklus bestehend aus Be- und Entladung auf die drei oben vorgestellten idealen Speicher angewendet werden.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, stellt der Wärmeerzeuger eine Temperatur von 90°C zur Verfügung. Während der Speicher bis auf 80°C aufgeladen werden soll, reicht dem Verbraucher eine Vorlauftemperatur von 70°C bei einer Rücklauftemperatur von 50°C. Die mit Schraffur I gekennzeichnete Fläche stellt die maximal nutzbare gespeicherte Wärmemenge des auf 80°C erwärmten, ideal durchmischten Speichers dar. Während der Entladung durch einen Verbraucher nimmt die im gesamten Speicher örtlich konstante Temperatur ab (Verschiebung der Temperaturlinie nach links). Die Speicherentladung muss beendet werden, wenn die Speichertemperatur unter die vom Verbraucher benötigte Vorlauftemperatur (hier 70°C) abfällt.

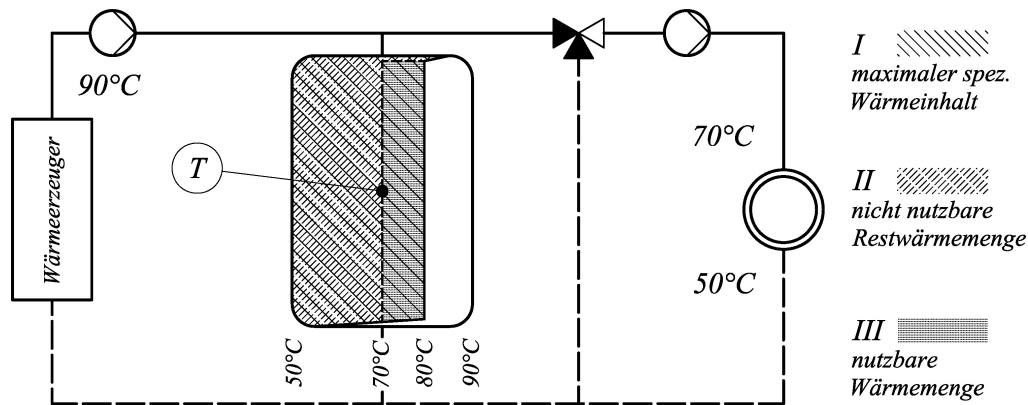


Abb. 5: Effektive spezifische Wärmemenge eines ideal durchmischten Speichers

Die nun im Pufferspeicher verbleibende Restwärmemenge (Fläche mit Schraffur II) kann nicht mehr genutzt werden. Bei der Beladung mit einer Vorlauftemperatur des Erzeugers von $T_{v,Erz} = 90^\circ\text{C}$ verschiebt sich die Temperaturlinie wieder bis zur Abschalttemperatur von 80°C . Die mit Schraffur III gekennzeichnete Fläche zwischen der Beladung bei 80°C und der Entladung bei 70°C kennzeichnet die effektive volumenspezifische Speicherkapazität eines Be- und Entladezyklus. Ihre Größe ist lediglich von den gewählten Ein- und Ausschalttemperaturen für die Beladung, der somit eine besondere Bedeutung zukommt, nicht aber von der Positionierung des Temperaturfühlers abhängig.

Der beladene Zustand eines unter gleichen Bedingungen eingebauten ideal geschichteten Pufferspeichers ist in Abbildung 6 dargestellt. Bei der Entladung schiebt sich die kalte Front nach oben, bis die Sollwert-Temperatur am oberen Temperaturfühler T_1 unterschritten wird.

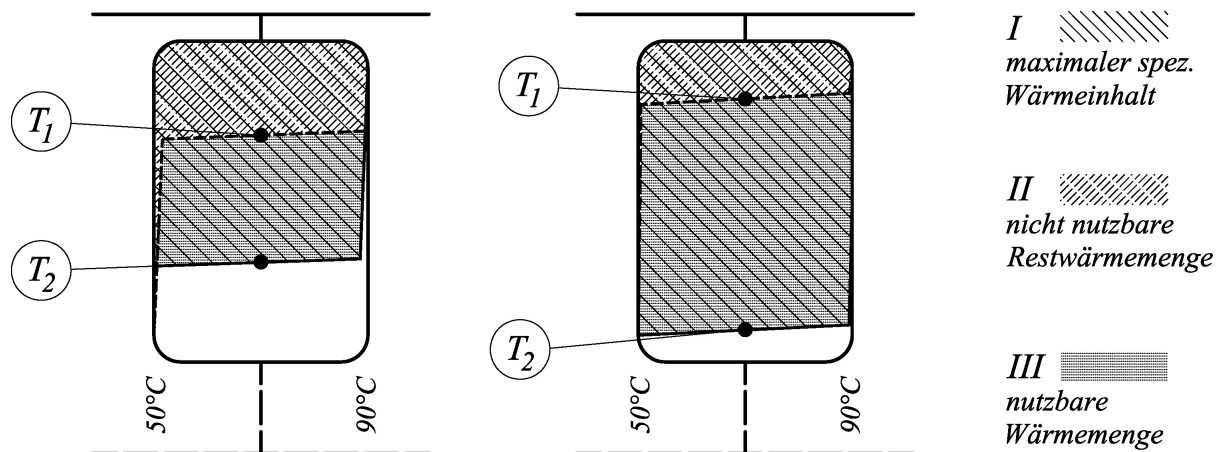


Abb. 6: Effektive spezifische Wärmemenge eines ideal geschichteten Speichers

Die daraufhin eingeleitete Beladung führt zu einem Verschieben der Temperaturfront nach unten, bis die Sollwerttemperatur am unteren Temperaturreger T_2 überschritten wird. Auch in dieser Abbildung ist die effektive spezifische Wärmemenge mit Schraffur III gekennzeichnet. Ihre Größe hängt im Idealfall nur von der Positionierung der beiden zwingend notwendigen Temperaturfühler ab. Der Höhenabstand dieser Fühler sollte maximal gewählt werden. Die eingestellten Sollwerte für das Ein- und Ausschalten der Beladung sind hingegen zweitrangig, da die Temperatur aufgrund der zwei Temperaturzonen nur „warm“ oder „kalt“ sein kann. Der Einsatz von Schichtenspeichern nimmt in der Praxis einen immer größer werdenden

Stellenwert ein. Vor dem Hintergrund oben angestellter Überlegungen ist es völlig unverständlich, dass ein Großteil dieser Schichtenspeicher in der Praxis nur mit einem Temperaturfühler ausgestattet ist, über dessen Temperaturhysterese man die Be- und Entladung zu regeln versucht.

Wie bereits erwähnt sind sowohl der ideal durchmischte als auch der ideal geschichtete Speicher Idealfälle, die so in der Praxis nicht vorkommen. Die Praxis kann aber mit dem Modell des linear geschichteten Speichers recht gut beschrieben werden. Je nach Neigung der Temperaturlinie kann der Schichtenspeicher (flache Temperaturlinie) oder der Mischspeicher (steile Temperaturlinie) modelliert werden. In Abbildung 7 wird die Ent- und Beladung eines linear geschichteten Speichers beschrieben; bei dieser ersten theoretischen Betrachtung soll es zu keinen Durchmischungen beim Be- und Entladen kommen. Der Speicher ist hydraulisch auf die gleiche Weise in die Anlage eingebunden wie die beiden Vorgänger.

Die Neigung der Temperaturlinie hängt von der Konstruktion des Speichers und von der Art der Beladung ab. Sie hat aber auf die prinzipiellen Überlegungen keinen Einfluss. Der Speicher ist vollständig beladen, wenn die Temperatur am unteren Fühler $T_2=80^\circ\text{C}$ beträgt. Bei der Entladung ohne Durchmischung verschiebt sich die Temperaturlinie parallel nach oben. Unterschreitet die Temperatur am Fühler T_1 die Vorlauftemperatur des Verbrauchers von hier 70°C , muss die Beladung wieder eingeleitet werden. Wie in den vorangegangenen

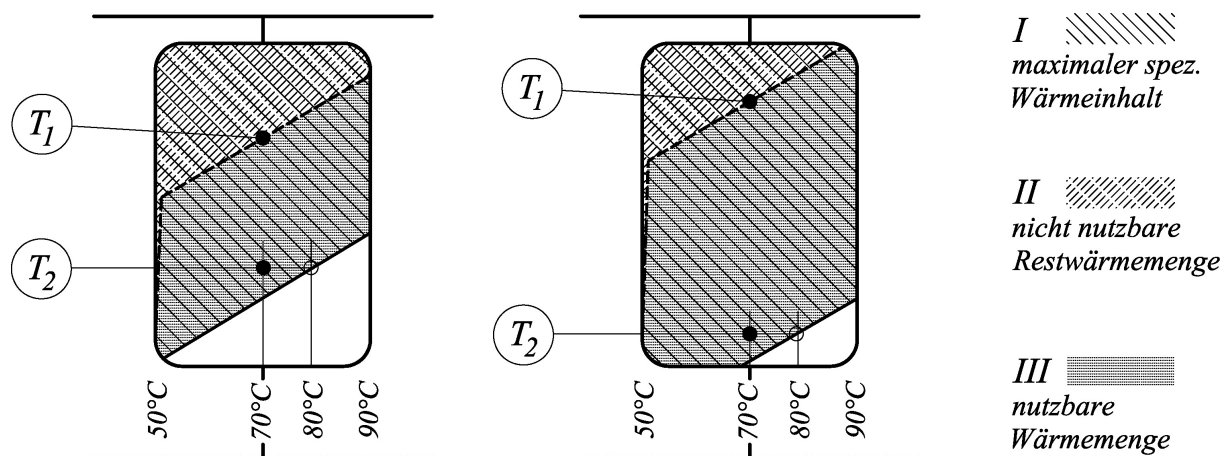


Abb. 7: Effektive spezifische Wärmemenge eines linear geschichteten Speichers

Abbildungen dargestellt, beschreibt auch hier die mit Schraffur III gekennzeichnete Fläche die effektiv nutzbare spezifische Wärmemenge des Pufferspeichers, die sowohl von der Positionierung der Fühler als auch von den gewählten Ein- und Ausschalttemperaturen für die Beladung abhängig ist. Die in der Praxis auftretenden Durchmischungen im Pufferspeicher während der Be- und Entladung führen dazu, dass die Temperaturlinie steiler wird. Das bedeutet, dass die Temperatur im unteren Speicherbereich angehoben wird (schlechte Entladung) und die Temperatur im oberen Speicherbereich absinkt (frühzeitiges Wiederaufladen wird erforderlich). Beide Effekte können durch die im folgenden beschriebene Zwei-Zonen-Entladung wesentlich verringert werden.

Zwei-Zonen-Entladung

Die Zwei-Zonen-Entladung bietet die Möglichkeit, Energie aus dem Pufferspeicher zu nutzen, die unterhalb des Temperaturniveaus der benötigten Vorlauftemperatur des Verbrauchers liegt. Abbildung 8 zeigt die hydraulische Einbindung einer Zwei-Zonen-Entladung.

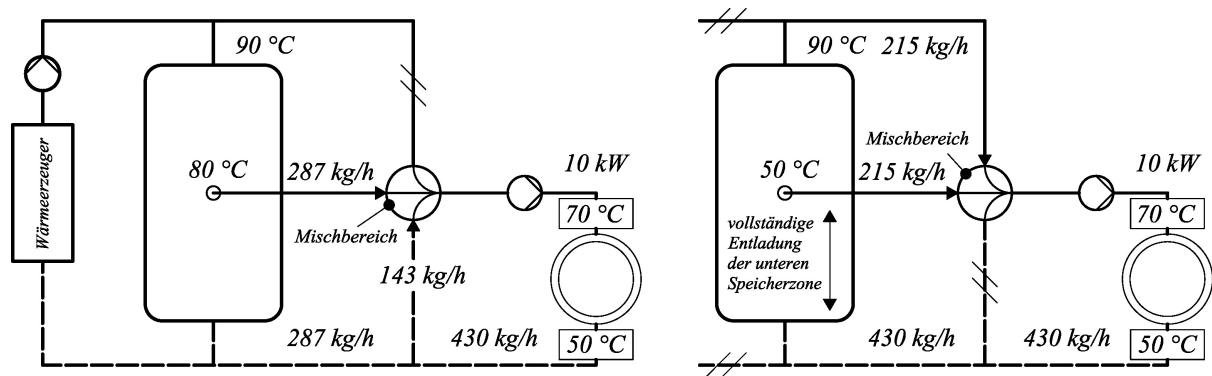


Abb. 8: Zwei-Zonen-Entladung

Liegt die Temperatur in Speichermitte oberhalb der Vorlauftemperatur des Verbrauchers, wird das Wasser dem Pufferspeicher am mittleren Anschluss entnommen und mit dem Rücklaufwasser vom Verbraucher auf das gewünschte Temperaturniveau gemischt. Sinkt die Temperatur am mittleren Speicheranschluss im Laufe der Entladung unter die Vorlauftemperatur des Verbrauchers, wird die Temperatur durch Beimischen von wärmerem Wasser aus dem oberen Speicherbereich angehoben. Das Rücklaufwasser vom Verbraucher wird jetzt komplett unten in den Speicher geleitet. Auf diese Weise ist es möglich, den unteren Bereich des Speichers nahezu vollständig auf Rücklauftemperatur zu entladen. Aufgrund der geringeren Zapfrate am oberen Speicheranschluss sind die Durchmischungen in diesem Speicherbereich geringer. Die bessere Schichtung hilft auch hier, den Speicher weiter zu entladen.

Praktische Untersuchungen an einer bestehenden Heizungsanlage

Das Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach hat Untersuchungen an einem bestehenden Heizungssystem eines Mehrfamilienhauses durchgeführt. Für die Wärmeerzeugung stand ein BHKW zur Verfügung. Wärmeabnehmer waren Heizkörper mit einer Standardauslegung 70/55/20. Der 1000 Liter Pufferspeicher war zunächst konventionell als hydraulische Weiche eingebaut. Nach eingehenden Untersuchungen wurde das System auf eine Zwei-Zonen-Entladung umgerüstet und untersucht. Es ist anzumerken, dass der Pufferspeicher selbst nicht verändert wurde. Die in Abbildung 9 dargestellten und unter vergleichbaren Bedingungen gemessenen Temperaturen über die Speicherhöhe (bei konventioneller- und Zwei-Zonen-Entladung) verweisen auf eine deutlich höhere (hier Faktor 1,6) effektiv speicherbare Wärmemenge bei der Zwei-Zonen-Entladung. Je nach Randbedingung ergab sich durch die Zwei-Zonen-Entladung eine Erhöhung der Speicherkapazität um den Faktor 1 bis 2. Zur Absicherung der Untersuchungen wurden die Wärmemengen bei der Be- und Entladung zusätzlich mit einem mobilen Ultraschall-Messgerät aufgezeichnet. Die Abweichung zur graphischen Speichereffizienzermittlung nach Dietrich lag im Bereich $< 10\%$.

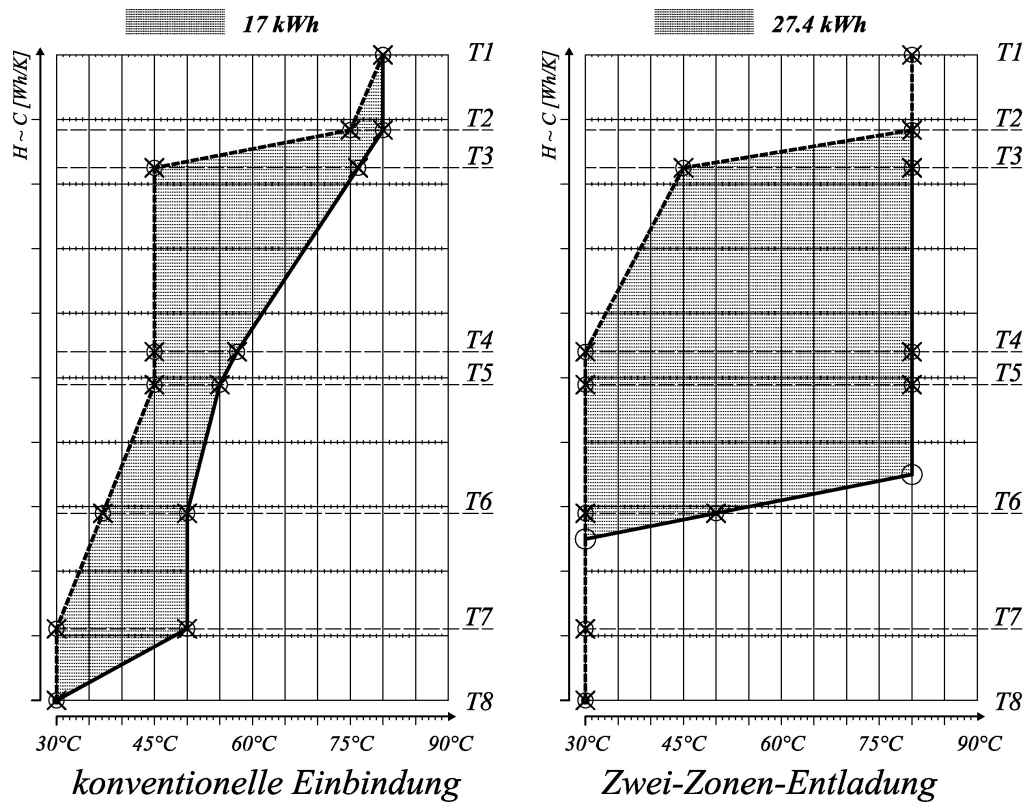


Abb. 9: Effektive spezifische Wärmemenge eines real vermessenen Pufferspeichers

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren zur Effizienzbestimmung von Pufferspeichern nach Dietrich kann die Effizienz von Pufferspeichern leicht festgestellt und analysiert werden. Das Verfahren ist damit auch bei der Beurteilung Effizienz verbessernder Maßnahmen hilfreich. Durch die Kombination verschiedener Maßnahmen (abhängig von den Randbedingungen), wie z.B. Zwei-Zonen-Entladung und Fühlerpositionierung, kann die Speicherkapazität in bestehenden Systemen leicht erhöht werden, sogar um den Faktor zwei bis drei.