



ZELLULARE METALLE UND VERBUNDWERKSTOFFE ZUR OPTIMIERUNG DES BE- UND ENTLADEVERHALTENS THERMISCHER ENERGIESPEICHER

J. Meinert¹

¹ Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Institutsteil Dresden, Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden

Tel.: ++49 (0)351/2537-357, Fax ++49 (0)351/2554-494,

Mail: Jens.Meinert@ifam-dd.fraunhofer.de

MOTIVATION

Thermische Energiespeicher besitzen in der Energietechnik bereits einen hohen Stellenwert und erfahren insbesondere durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energiequellen eine entsprechende Aufwertung. Dabei lässt sich entsprechend des Einsatzgebietes und des damit im Zusammenhang stehenden Be- und Entladeverhaltens eine sinnvolle Einteilung in Wärmespeicher und Wärmepuffer treffen.

Wärmespeicher dienen der Überbrückung zeitlicher Differenzen zwischen der Bereitstellung von Wärme und deren Bedarf. Hier ist mit Bezug auf regenerative Energiequellen insbesondere die Solarthermie im Eigenheimbereich zu nennen, bei der die höchste Energieausbeute in den Mittagsstunden auftritt, während sich der Wärmebedarf im Haushalt eher auf die Morgen- und Abendstunden konzentriert.

Auch im Bereich energieeffizienter Technologien spielen Wärmespeicher eine große Rolle, da die Umwandlung von Abwärme in andere Energieformen exergetisch ineffizient ist. Deren Speicherung – einen späteren Wärmebedarf vorausgesetzt – ist dagegen wesentlich wirkungsvoller. Denkbar ist die Speicherung von Abwärme eines Verbrennungsmotors zur Kaltstartvermeidung oder die Nutzung der Abwärme exothermer Reaktionen für sich anschließende endotherme. Die Be- und Entladeszenarien der Speicher richten sich nach den speziellen Anwendungen.

Das Wärmespeichervermögen von **Wärmepuffern** wird dagegen im Wesentlichen zur Dämpfung thermischer Lastspitzen bei der Kühlung Wärme erzeugender Bauteile eingesetzt. Als Beispiele können Baugruppen der Leistungselektronik sowie schnell ladende Batterien zur Bremsenergiespeicherung genannt werden. Hier sind in der Regel kurze Lade- und Entladezeiten unter schwierigen thermischen Randbedingungen (zyklische Wärmelasten) zu realisieren.

Thermische Speicher mit großen volumenbezogenen Energiedichten lassen sich nur mit **Phasenwechselmaterialien** (PCM – Wasser, Paraffine, Salzhydrate) realisieren. Die Wärmespeicherung erfolgt dann als „latente Wärme“ in Form der Schmelzenthalpie des jeweiligen Stoffes bei einer nahezu konstanten Temperatur – der Schmelztemperatur. Liegt diese oberhalb der Umgebungstemperatur, so spricht man von Wärme-, unterhalb der Umgebungstemperatur von Kältespeicherung. Thermodynamisch ist der Vorgang selbstverständlich identisch.

Zur Erzielung einer maßgeschneiderten Dynamik des Ladens/Entladens müssen in einem Speicher zwei Parameter optimiert werden: die Kontaktfläche zwischen PCM und Wärmeträger und die Wärmeleitfähigkeit des PCM. Dazu bieten die am Fraunhofer IFAM in Dresden entwickelten zellularen Metalle bzw. Verbundwerkstoffe intelligente Lösungsansätze.

LÖSUNGSANSATZ

Die **Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit** eines PCM gelingt in optimaler Weise durch Einbringen einer Metallmatrix. Dazu können mit PCM infiltrierte metallische Schäume sowie Faser- oder Drahtstrukturen ebenso dienen wie direkte Metall-PCM-Verbundwerkstoffe. Je geringer die Porosität (PCM-Volumen bezogen auf Gesamtvolumen) der Materialien, desto größer deren effektive Wärmeleitfähigkeit, desto geringer jedoch die verbleibende Speicherkapazität.

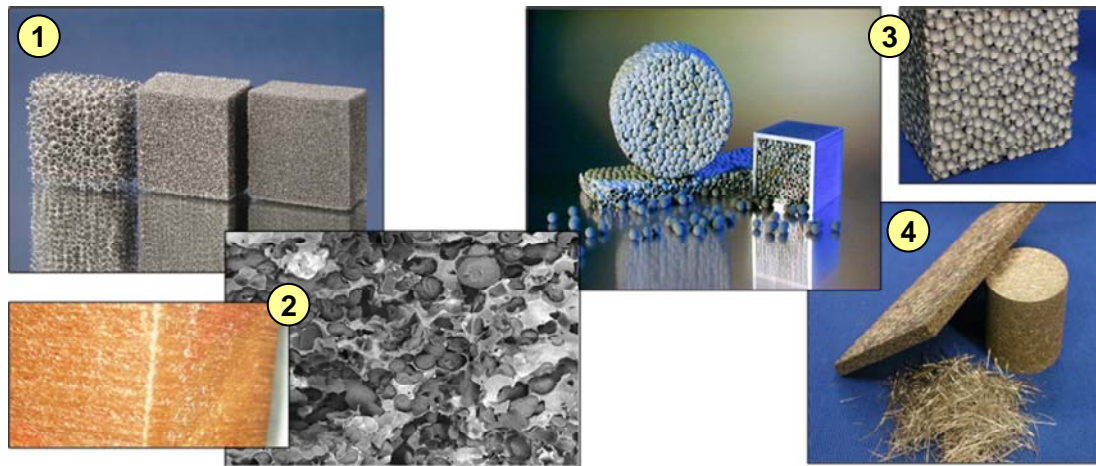


Bild 1 Zellulare Metalle und Verbundwerkstoffe u. a. für die Energiespeicherung

Eine Auswahl der als **Wärmeleitmatrix** geeigneten, am Fraunhofer IFAM in Dresden gefertigten Werkstoffe zeigt Bild 1. Schaum- (1), Faser- (4) und Drahtstrukturen können aus verschiedenen Werkstoffen (Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Legierungen) mit offenen Porositäten von bis zu 97 Vol.-% hergestellt werden. Dagegen verfügen Verbundwerkstoffe [Kupfer-PCM (2)] nur über Porositäten zwischen 40 und 60 Vol.-%, erreichen jedoch unter Umständen 25 % der Wärmeleitfähigkeit des Vollmetalls. Der Vorteil insbesondere von Faser- und Verbundwerkstoffen liegt in der Fixierung auch des flüssigen PCM durch Kapillarkräfte.

Eine Vergrößerung der **Kontaktfläche** zwischen Wärmeträger und PCM kann bei Verkleinerung der Speicherkapselgröße erreicht werden. Die volumenbezogene innere Oberfläche einer Kugelschüttung ist bei konstanter Porosität umgekehrt proportional dem Kugeldurchmesser. Metallische Hohlkugeln [(3) in Bild 1] können mit Wandstärken im Mikrometerbereich hergestellt und anschließend – durch die poröse Kugelschale – mit einem PCM gefüllt werden. Eine Abdichtung der Kugelschale ist durch nachträgliches Beschichten möglich, jedoch in der Regel nicht erforderlich. PCM-gefüllte Hohlkugeln lassen sich in loser Form (als „schwimmende Wärmekapazitäten“) in Wärmeträgerflüssigkeiten oder als wärmeträgerdurchströmter Strukturverbund verwenden.

Das Fraunhofer IFAM in Dresden verfügt neben der werkstofftechnischen Kompetenz zur Herstellung zellulärer Metalle und von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen mit maßgeschneiderten Eigenschaften mit dem Geschäftsfeld Energie und Thermisches Management auch über das wissenschaftliche Know-how zur **wärme- und strömungstechnischen Auslegung** thermischer Speichersysteme.

TRANSPORTKOEFFIZIENTEN

Grundlegend für die Durchführung zuverlässiger Auslegungsrechnungen ist die Kenntnis der für den – wie auch immer im Detail strukturierten – Metall-PCM-Verbund resultierenden **Zustandsgrößen** und **Transportkoeffizienten**. Das thermische Speichervermögen lässt sich anhand tabellierter Werte für die Metalle und das PCM bei bekannter oder messbarer Porosität leicht berechnen. Dies schließt die Modellierung des Phasenüberganges ein. Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit eines Metall-PCM-Verbundes

oder – falls ein offenzelliger Werkstoff vom Wärmeträger durchströmt wird – die Bestimmung von Druckverlustbeiwerten und Wärmeübergangskoeffizienten. Diese Transportkoeffizienten können nur auf experimentellem Wege erfasst und unter Zuhilfenahme von Strukturparametern der Werkstoffe empirisch modelliert werden. Dazu existieren im wärmetechnischen Labor des IFAM Dresden beste Voraussetzungen.

Zur Messung der **Wärmeleitfähigkeit** sind stationäre und instationäre Verfahren bekannt. Bei der verwendeten Hot-Disk-Methode wird ein flacher Sensor zwischen zwei identischen Proben platziert und definiert beheizt. Aus der Messung des zeitlichen Temperaturverlaufs des Sensors kann die Wärmeleitfähigkeit der Sensorumgebung (= Probe) errechnet werden. Das Verfahren ist explizit auch für zellulare Werkstoffe geeignet, die einzige Bedingung an die Probenoberfläche mit Sensorkontakt ist deren Ebenheit (Herstellung z. B. durch Drahterodieren). In Bild 2 werden der Probenhalter des Hot-Disk-Gerätes (1) mit eingespannten Faserwürfeln, einer der Sensoren positioniert auf einer Hohlkugelstrukturprobe (2, oben) und eine Anordnung zwischen zwei Kupfer-PCM-Verbundproben (2, unten) gezeigt.

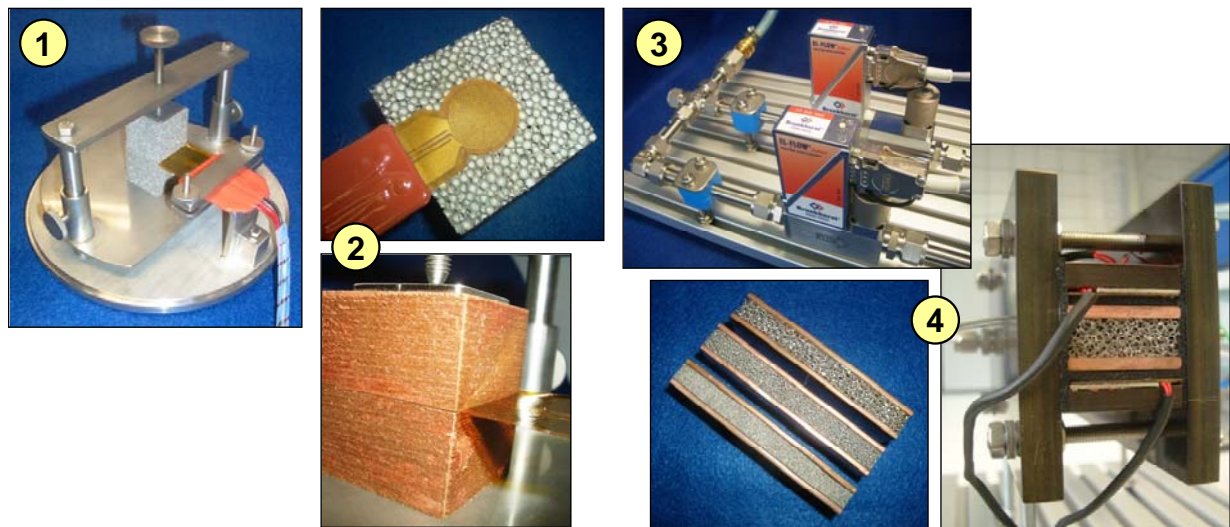


Bild 2 Messverfahren zur Bestimmung von Transportkoeffizienten zellularer Metalle oder Verbundwerkstoffe

Die anisotrope Wärmeleitfähigkeit von Faserstrukturen kann durch ein spezielles Auswerteverfahren in einem Messgang bestimmt werden. Die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit (meist ohne PCM) sind mit Hilfe thermischer Widerstandsmodelle in Abhängigkeit von der Porosität empirisch modellierbar und damit für Optimierungsrechnungen verwertbar.

Zusätzlich lassen sich thermische **Kontaktwiderstände** zwischen einem zellularen Werkstoff und einer Wand quantifizieren. Dazu wird eine Probe in Sandwichform [(4, links) in Bild 2] hergestellt und deren Gesamtwärmeleitwiderstand mittels einer stationären Plattenmethode bestimmt. Aus einem Reihenschaltungsmodell können mit den bekannten Widerständen des Metallschaums (aus dem Hot-Disk-Verfahren) und der Deckplatten (im Bild Kupfer) die gesuchten Kontaktwiderstände herausgerechnet werden.

Wird ein zellulärer Werkstoff zur Verbesserung des Wärmetransportes zwischen Wärmeträger und Kapseloberfläche verwendet, so sind **Druckverlustbeiwerte** und **Wärmeübergangskoeffizienten** zu ermitteln. Dazu werden definierte Strömungszustände erzeugt, die eine spätere Übertragung der Messwerte in dimensionslose Größen gestatten. In Bild 2 sind Sandwich-Metallschaumproben (4, links) gezeigt, die in einen ebenfalls abgebildeten Strömungskanal (4, rechts) implementiert und von einem Gas [Massendurchflussregler (3)] durchströmt werden. Druckverluste sind direkt, Wärmeübergangskoeffizienten indirekt aus einer Energiebilanz messbar. Neben Gasen können im Labor auch Flüssigkeiten verwendet werden, wobei reproduzierbare, variable Temperaturniveaus und damit Strömungszustände eingestellt werden können.

OPTIMIERUNGSBEISPIELE

Das Ziel der Optimierung eines thermischen Speichers besteht in der Anpassung des dynamischen **Be-/Entladeverhaltens** an die Erfordernisse des energietechnischen Systems bei gleichzeitiger Maximierung der volumenbezogenen **Speicherdichte**. Mit Hilfe zellulärer Metalle bzw. von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen lassen sich diesbezüglich maßgeschneiderte Eigenschaften von Wärmespeichern oder Wärmepuffern erzeugen.

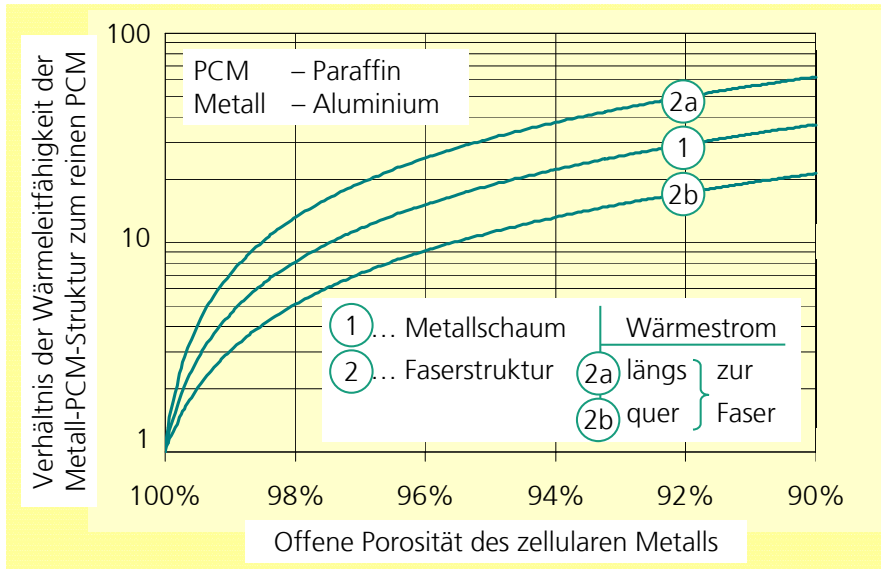


Bild 3 Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit eines Metall-PCM-Verbundes zu der des reinen PCM abhängig von der Porosität des zellulären Werkstoffes

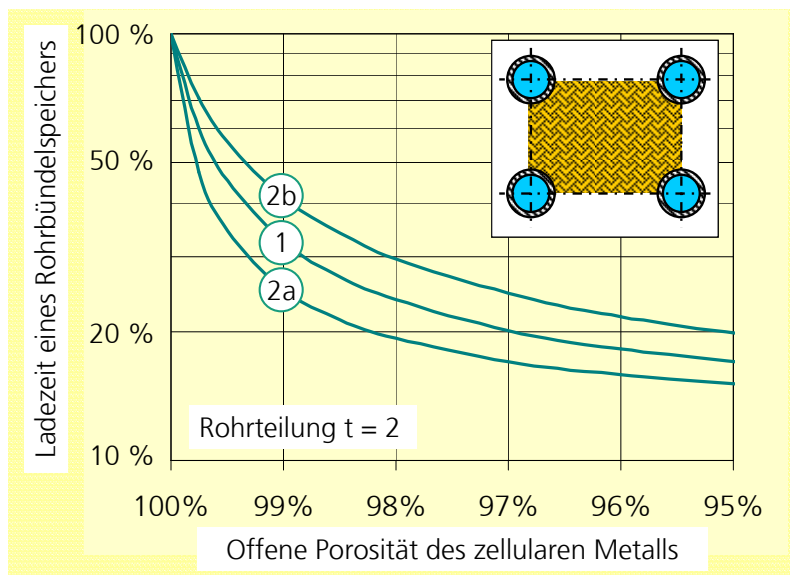


Bild 4 Verminderung der Ladezeit eines thermischen Rohrbündel-Speichers aufgrund der oben veranschaulichten Wärmeleitfähigkeitserhöhung

Bilder 3 und 4 verdeutlichen, wie sich das Einbringen einer Metallstruktur in ein PCM auf die Steigerung der **effektiven Wärmeleitfähigkeit** auswirkt und welchen Effekt dies wiederum auf das zeitliche Beladeverhalten eines thermischen Speichers hat. Grundlage der Berechnungen in Bild 3 ist die Anwendung eines Widerstandsmodells mit variablen Überlagerungsfaktoren, die

sowohl aus der Literatur als auch teilweise aus eigenen Messungen gestützt werden. Die Kurven zeigen, dass sich die effektive Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum reinen PCM mit Werten zwischen 0,2 und 0,5 W/(mK) auch bei Porositäten über 90 % und damit Speicherkapazitätsverlusten unter 10 % auf das bis zu 70-fache steigern lässt. Dabei liegt die Wirksamkeit metallischer Schäume (1) etwa zwischen zwei Faserstrukturvarianten, bei denen unterschiedliche Winkel zwischen Faservorzugsrichtung und Wärmestrom realisiert sind [anisotropes Verhalten – gleiche Richtung (2a), Normalenrichtung 90°-Winkel (2b)].

In Bild 4 werden Berechnungsergebnisse zur **Dauer des vollständigen Phasenwandels** (Ladezeit) des PCM exemplarisch am Beispiel einer Speichergeometrie gezeigt, bei der der Wärmeträger (Wasser-Glykol-Gemisch) in einem Rohrbündel strömt und sich das Speichermedium inklusive der Metallmatrix im Außenraum befindet. Die Berechnungen wurden analytisch mit wenigen Vereinfachungen (STEFAN-Problem) durchgeführt. Man erkennt, dass sich bei wenig Einbuße an Speicherkapazität (Porosität größer 95 %) Ladezeitersparnisse von 80 % und mehr im Vergleich zum reinen PCM erreichen lassen (Kurvenbezeichnung siehe Bild 3).

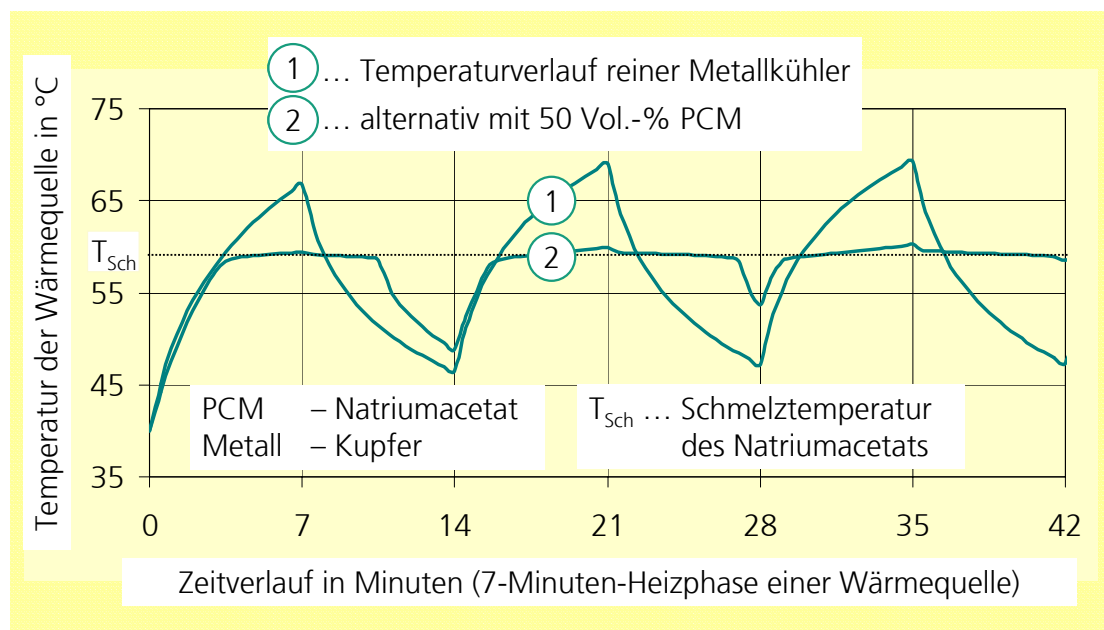


Bild 5 Zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperatur einer Wärmequelle mit zyklischer Wärmelast (7-Minuten-Takt) mit Vollmetall-Kühlkörper bzw. Metall-PCM-Verbund

Ergebnisse der Optimierung eines **Wärmepuffers** sind in Bild 5 dargestellt. Es handelt sich um die Kühlung eines leistungselektronischen Bauteils, welches mit einer Taktzeit von 7 Minuten eine konstante Wärmeleistung abgibt. Die Kühlung erfolgt mittels eines kontinuierlich luftüberströmten Metallkühlkörpers, wobei sich aufgrund der Randbedingungen an der Wärmequelle ein zeitlicher Temperaturverlauf in Form der „Sägezahnkurve“ (1) einstellt.

Die Spitzentemperatur kann deutlich gesenkt werden, wenn in den Kühlkörper im Bereich der Wärmequelle ein „Tasche“ bestehend aus einem Metall-PCM-Verbundwerkstoff eingesetzt wird. Im speziellen Berechnungsfall handelt es sich um einen Kupfer-Natriumacetat-Verbund mit einer Porosität von 50 % (PCM-Schmelztemperatur 59 °C), dessen Wärmeleitfähigkeit noch etwa 25 % der des reinen Kupfers [rund 100 W/(mK)] beträgt. Die Wirkung des PCM ist am Temperaturverlauf (2) anhand der Plateaus auf Schmelztemperaturniveau deutlich auszumachen. Bei der Auslegung ist unbedingt darauf zu achten, dass kein permanentes Aufschmelzen des PCM erreicht wird, da die verminderte Wärmeleitfähigkeit des Verbundwerkstoffes ansonsten zu wesentlich höheren Spitzentemperaturen an der Wärmequelle führt.

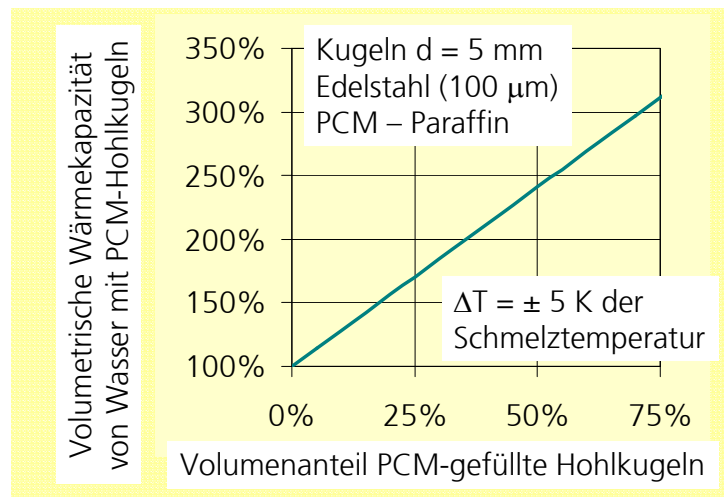


Bild 6 Erhöhung der volumetrischen Wärmekapazität eines Wärmeträgers durch Zugabe von PCM-gefüllten metallischen Hohlkugeln

Als letztes Beispiel zeigt Bild 6, wie die volumenbezogene **Wärmekapazität** eines flüssigen Wärmeträgers (hier Wasser) durch Einbringen variabler Volumenanteile PCM-gefüllter metallischer Hohlkugeln (Durchmesser 5 mm, Wandstärke 100 µm) vergrößert werden kann. Bei einem Volumenanteil von 50 % ist bereits eine Steigerung auf das etwa 2,5-fache ersichtlich. Bei der Berechnung wurden sowohl die sensible (einphasige) Speicherkapazität als auch die Schmelzwärme (latente Wärme) in einem Temperaturbereich von ± 5 K um die PCM-Schmelztemperatur berücksichtigt. Arbeitet ein Speicher mit geringerer Grädigkeit, so erhöht sich das Steigerungspotenzial weiter, da das Verhältnis zwischen latenter und sensibler Wärme ansteigt.

PCM-gefüllte Hohlkugeln lassen sich beispielsweise auch in Baumaterialien (Beton) verarbeiten, um bei Gebäuden mit geringer Masse der Wände (Leichtbauweise) das thermische Speichervermögen der Gebäudestruktur zu verbessern.