

Dr. Karsten Hackeschmidt, Dr. Nouredine Khelifa, Dr. Dieter Girlich¹

Verbesserung der nutzbaren Wärmeleitung in Latentspeichern durch offenporige Metallschäume

Zusammenfassung

Für die Kälte- bzw. Wärmespeicherung gewinnen Latentspeicher zunehmend an Bedeutung. Mit der Nutzung so genannter PCM's (Phase Change Materials) können hohe Energiedichten in kompakten Bauformen realisiert werden. Die Auswahl des PCM erfolgt in erster Linie nach deren Phasenwechseltemperaturen. Bekanntlich haben die PCM schlechte Wärmeleiteigenschaften, die durch geeignete und z.T. komplizierte Wärmeübertrager-Konstruktionen je nach technischem Erfordernis kompensiert werden müssen. Als eine Alternative bieten hier offenporige Metallschäume ein beachtliches Einsatzpotential. Eine wesentliche relevante physikalische Eigenschaft für die Bewertung der Güte des Phasenwechsels in solchen Komponenten ist die so genannte nutzbare Wärmeleitfähigkeit.

1. Einleitung

Im Rahmen eines Kooperationsvorhabens zwischen der Webasto AG Stockdorf, der m.pore GmbH Dresden und dem ILK gGmbH Dresden wird das Potential für den Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern ermittelt. Deren zukünftige Anwendungen sollen in der Standklimatisierung von Räumen für mobile und stationäre Systeme liegen. Das Ergebnis des Einsatzes solcher Komponenten wird anhand der signifikanten Senkung des Verbrauchs von Primärenergie bewertet.

Offenporige Metallschäume sind aufgrund ihrer Struktur ideal für den Einsatz in Latentspeichern. Multifunktionale Eigenschaften ermöglichen einfache, kompakte und betreiberfreundliche Latentspeicherkonstruktionen als Komponente für mobile und stationäre Klimasysteme. Das sind

- die signifikante Erhöhung der nutzbaren Wärmeleitfähigkeit der Metallschaum-PCM-Verbindung,
- eine minimale Vereinnahmung des Gesamtvolumens durch den Metallschaum selbst,

¹ Arbeit im Rahmen des Verbundprojektes „Untersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern zur Klimatisierung von Räumen“, Förderkennzeichen: 0327336D; Partner des Verbundprojektes: ILK gem. GmbH Dresden, Fa WEBASTO AG Stockdorf, Fa. m.pore GmbH Dresden

- das Designen beliebiger Formen und Geometrien durch den Metallschaum und somit die universelle Anpassung an gegebene Einbaubedingungen,
- die Potentiale zur Vereinfachung von Technologien in der Herstellung von Latentspeichern und
- die Nutzung einfacher technischer Möglichkeiten für ein ganzjähriges wirtschaftliches Betreiben solcher Speicher.

Insbesondere der letztgenannte Sachverhalt eröffnet ein erhebliches Einsparpotential in mobilen Klimasystemen. Das PCM (zumeist Wasser) kann während der Wintermonate einfach abgelassen werden, weil in dieser Zeit ein Kältespeicher nicht benötigt wird. Diese Gewichtersparnis hilft nachweisbar Dieselmotoren und damit verbundene Kosten einzusparen. Die bisher im Einsatz befindlichen Systeme bieten diese Möglichkeit nicht.

Die mit dem Einsatz offenporiger Metallschäume zu berücksichtigenden technologischen, konstruktiven, ökologischen und wirtschaftlichen Erfordernisse werden in diesem Projekt analysiert, untersucht, bewertet und praxistauglich umgesetzt. Den bisher erreichten Erkenntnisstand bezüglich der nutzbaren physikalischen Eigenschaften von Metallschaum-PCM-Verbindungen sind ein wesentlicher Projektinhalt.

Die dabei zu Grunde liegende prinzipielle Konstruktionsidee veranschaulicht **Bild 1**.

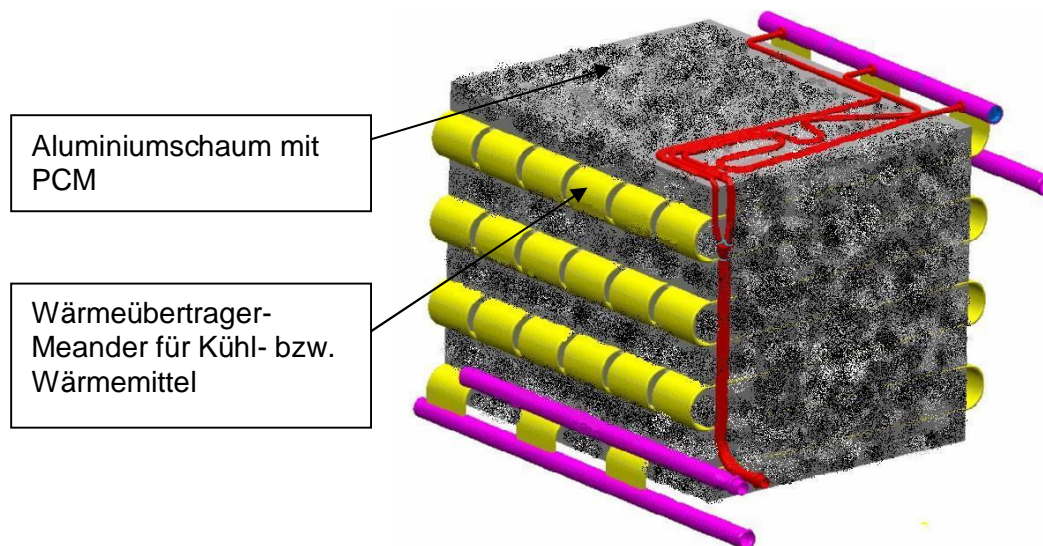


Bild 1 Der prinzipieller Aufbau des Kernmoduls eines Metallschaum-Latentspeichers [6], [7].

2. Das Trägermaterial offenporiger Metallschaum

Mit dem Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern wird der Begriff des so genannten Trägermaterials definiert. Seine Funktionen sind die Integration des PCM in seiner Struktur und die Wärmeübertragung im Volumen mit dem PCM selbst. Es ist demnach zu ermitteln, welche physikalischen Grundeigenschaften für das wirtschaftliche Betreiben eines Latentspeichers praktisch relevant bzw. nutzbar sind.

Die Bezeichnung „Metallschaum“ beschreibt nicht das Herstellverfahren an sich. Die offenporige Metallstruktur selbst wird hier mittels Giesverfahren hergestellt. Das Ausgangsmaterial ist ein Kunststoff, welcher die Hauptmerkmale des Endproduktes bestimmt. Prinzipiell können fast alle Metalle gegossen werden, aber das Aluminium ist in der klimatechnischen Anwendung dominant, weil es neben den guten Herstelleigenschaften auch über eine sehr gute Wärmeleitung verfügt. Diese Eigenschaft, das geringe Gewicht und die Stabilität der Struktur selbst macht den Aluminiumschaum für die Latentspeicheranwendung sehr interessant.

Die für den Einsatz in Latentspeichern relevanten Parameter für die Beschreibung des Metallschaums sind

- die Porendichte p_d in ppi (**p**ores **p**er **i**nch)
- die Masse $m_{MS,ges}$ (kg) bzw. die relative Dichte $\rho^* = \frac{\rho_{MS}}{\rho_M} \cdot 100$ (%)
- die Wärmeleitfähigkeit λ_{MS} (W/m K)
- die Form der Metallstege (zylinder- oder kreuzförmig)
- die Gießrichtung

Mit sehr guter Genauigkeit können über einem Modellansatz (z.B. die Stege bilden ein Tetrakaidecahedron) die Modellgrößen Stegdicke d und Steglänge L berechnet werden (s. **Bild 2**) [1]. Die relative Dichte des Schaums ist ein Maß für das in der Struktur zur Verfügung stehende PCM-Volumen. Mit der Variation der Stegform wird deren Oberfläche beeinflusst. Bei der Kreuzform wird die Oberfläche durch 4 zusätzliche „Rippen“ gegenüber der Zylinderform vergrößert. Das dann zur Verfügung stehende Volumen für das PCM verringert sich geringfügig.

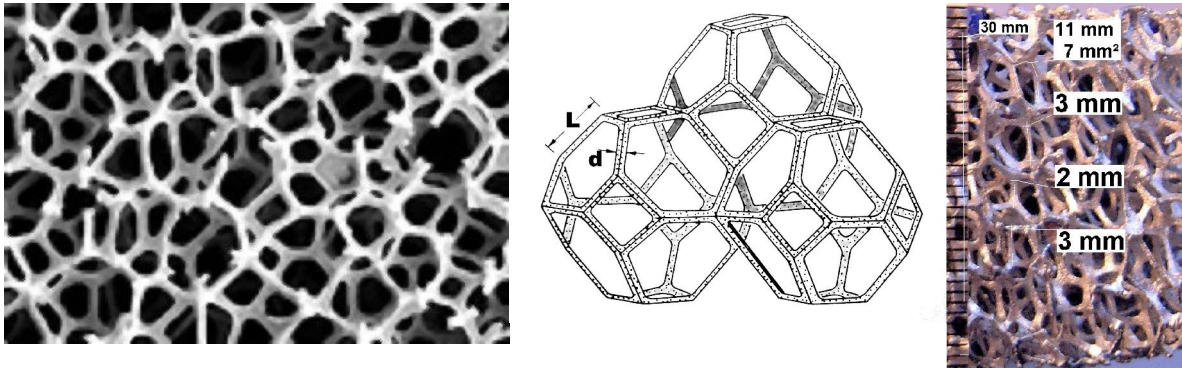


Bild 2 Die Metallschaumstruktur (links und rechts); das Modell des Metallschaums (mitte) [3]

Diese Struktur reduziert die für den Phasenwechsel zu versorgenden Volumina des PCM derart, dass deren mehr oder weniger schlechte Wärmeleitfähigkeit technisch an Bedeutung verliert. Für die wärmetechnische Nutzung dieses Potentials ist die Gestaltung der Kontaktierung zwischen Metallschaum und der wirksamen Wärmeübertragerfläche zum temperaturbestimmenden Fluid (für die Be- und Entladung) sehr wichtig.

3. Versuchsaufbau für die Messung der nutzbaren Wärmeleitung

Jedes Material für sich hat eine spezielle Wärmeleitfähigkeit. Aufgrund der Umsetzung konstruktiver und technologischer Zwänge wird diese Stoffeigenschaft in der technischen Anwendung in der Regel durch ein Verbund- bzw. Mischmaterial bestimmt. Deshalb definiert sich der Begriff der so genannten „nutzbaren Wärmeleitung“, die maßgebend von der speziell umzusetzenden Konstruktion abhängig ist. Die nutzbare Wärmeleitung bestimmt einerseits entscheidend die Leistungsfähigkeit von Latentspeichern und andererseits die Qualität der Auslegung solcher Komponenten mit Hilfe von Berechnungsprogrammen.

Für die Messung der nutzbaren Wärmeleitung im Labor des ILK Dresden ist ein Versuchsaufbau in Anlehnung der Norm DIN EN 12667 „Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät“ ausgelegt, gebaut und in Betrieb genommen worden [4], [5].

Die grundlegende Konzeption basiert auf folgenden Sachverhalten.

- direkte Messung der Wärmestromdichte über Temperaturdifferenzen über die Dicke eines geeigneten Werkstoffs (hier Teflon) mit bekannter Wärmeleitfähigkeit,
- Einstellmöglichkeit einer konstanten Temperaturdifferenz mittels Peltier-Elemente über die Probenhöhe und damit auch der relevanten Messprobentemperatur (= Mittelwert zwischen unterer und oberer Temperatur),

- Realisierung einer über die Fläche ausreichend konstanten Temperatur an den Temperieroberflächen,
- Realisierung einer ausreichend guten Kontaktierung zwischen Messprobe und Temperieroberflächen durch ebene plane Kupferplatten,
- Variationsbereich der Temperatur zwischen -10°C und 60°C ,
- Realisierung der Messmöglichkeit auch für flüssige Medien wie Wasser oder Paraffin und
- Variationsmöglichkeit für verschiedenen Messprobenhöhen.

Mit dem so realisierten Versuchsaufbau wird tatsächlich der stationäre Wärmedurchgang in den Messproben in Abhängigkeit der relevanten Parameter bestimmt. D.h. die Kontaktqualität zwischen den Flächen der Temperierung und der Messproben ist hier Bestandteil dieser Stoffeigenschaft, die in der Literatur auch als Ruhewärmeleitfähigkeit λ_R bezeichnet wird.

Die Hauptkomponenten der kompletten Versuchseinrichtung (s. Bild 3) sind:

1. ein isolierter Messcontainer
2. die Messwerterfassung
3. zwei Thermostate
4. zwei Gleichspannungsversorgungen
5. Temperaturfühler PT100 (mind. 16 Stück)
6. zwei Kühleinheiten (Direct-to-Liquid)

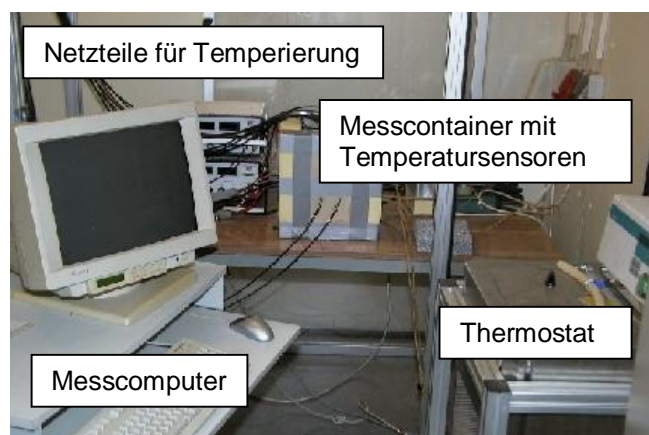
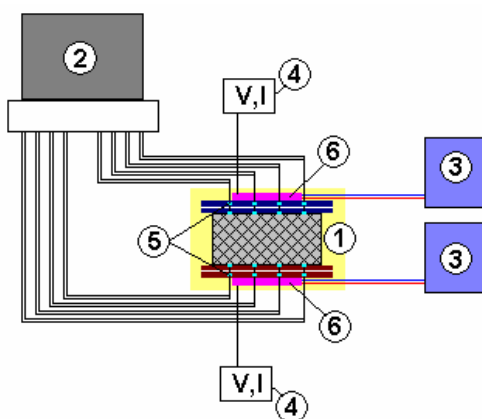


Bild 3: Versuchseinrichtung „Wärmedurchgang in Metallschäumen und anderer Medien“

Die Versuchseinheit ist derart konzipiert, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem Messprobenfuß und –kopf eingestellt wird. In Abhängigkeit der integrierten Messprobe stellt sich dann ein Wärmestrom ein. Der dafür gültige Wärmedurchgang berechnet sich wie folgt.

$$k = \frac{\bar{q}}{t_{MP,Fuß} - t_{MP,Kopf}}$$

mit k – Wärmedurchgang in $W/(m^2K)$
 $t_{Fuß}$ – Temperatur am Messprobenfuß in $^{\circ}C$
 t_{Kopf} – Temperatur am Messprobenkopf in $^{\circ}C$
 q - Wärmestromdichte in W/m^2

Das Messregime wird derart betrieben, dass die wärmere Seite an der Fuß- und die kältere an der Kopftemperierung entsteht. Die Wärmestromdichte berechnet sich über den Temperaturabfall einer 2 mm dicke Teflonplatte, die zwischen zwei Temperierplatten (Kupfer) integriert ist, gemäß folgender Beziehung (gültig für Kopftemperierung).

$$\bar{q}_{Kopf} = \left(\frac{1}{2 \cdot \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{Kupfer} + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{Teflon}} \right)_{Kopf} \cdot \Delta t_{Kopf}$$

mit $s_{Teflon} = 2,07 \text{ mm}$; $\lambda_{Teflon} = 0,255 \text{ W/(m K)}$ ($-20^{\circ}C \leq t \leq 100^{\circ}C$)
 $s_{Kupfer} = 10 \text{ mm}$; $\lambda_{kupfer} = 393 \text{ W/(m K)}$ [8]

Die Temperatursensoren werden mittig in dem 10 mm dicken Kupferplatten integriert. Entsprechend betragen die relevanten Kupferdicken am Fuß und am Kopf jeweils 5 mm. Es wird vorausgesetzt, dass die Fühler ohne Luftspalt straff im Kupfer sitzen. Damit berechnet sich die Wärmeleitfähigkeit für die Messprobe und seiner Kontaktqualität wie folgt.

$$\lambda_{MP} = \frac{s_{MP}}{\frac{\Delta t_{MP}}{\bar{q}_{MP}} - 2 \cdot \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{Kupfer}}$$

mit λ_{MP} – Ruhewärmeleitfähigkeit der Messprobe in $W/(m K)$
 s_{MP} – Messprobenhöhe zwischen Fuß und Kopf in m
 q_{MP} – Wärmestromdichte der Messprobe in $W/(m^2K)$

Die Wärmestromdichte durch die Messprobe wird mit Hilfe des gemessenen Wärmestroms über die Kopftemperierung ermittelt.

$$\bar{q}_{MP} = \bar{q}_{Kopf} \cdot \frac{A_{Kopf}}{A_{MP}} \cdot \eta_V$$

mit A_{Kopf} – Wärmeübertragungsfläche am Kopf in m^2
 A_{MP} – Wärmeübertragungsfläche der Messprobe (= Auflagefläche) in m^2
 η_V – Verlustanteil der Wärme über Versuchseinrichtung

4. Messergebnisse zur Wärmeleitung für Graphit-Module

Der Begriff „nutzbare Wärmeleitung“ wird zunächst am Beispiel einer Graphitprobe veranschaulicht. In den heute am Markt verfügbaren technischen Lösungen für Latentspeicher ist Graphit ein bewährtes Trägermaterial. Es verfügt selbst über eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit und bietet aufgrund seiner Porosität ausreichendes Potential für die Integration von PCM (Wasser).


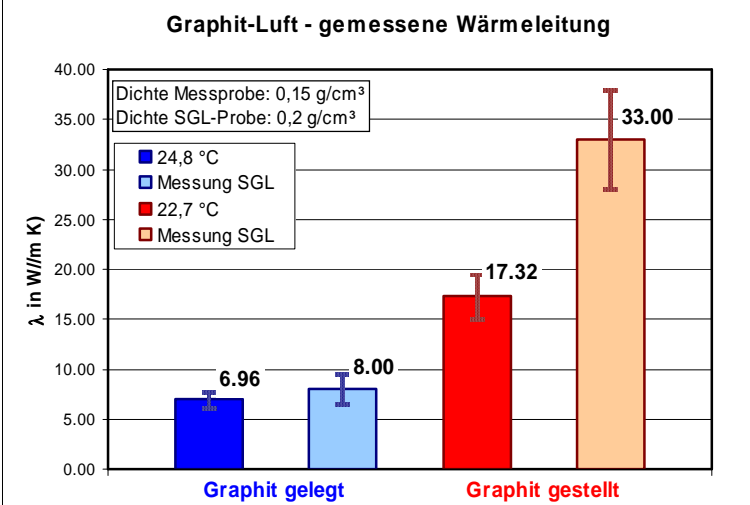

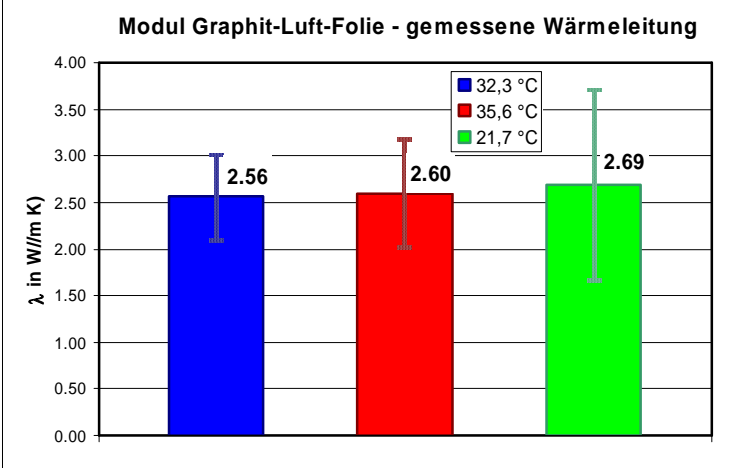

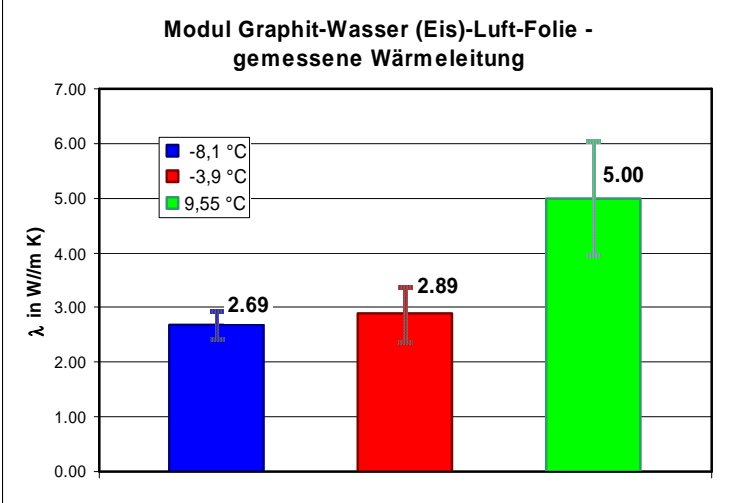
Für deren technische Anwendung sind aber konstruktive Erfordernisse umzusetzen, die die tatsächlich nutzbare Wärmeleitung erheblich verringert. Die Graphitplatten müssen durch eine Alu-Kunststoff-Folie ummantelt werden, damit zum Einen keine Korrosionspotential mit den aus Aluminium bestehende Rohrsystemen entsteht und zum Anderen dass mit Hilfe von Vakuum eingepresste Wasser trotz Phasenwechsel dauerhaft in der Graphitstruktur verbleibt.

Die Graphitplatten innerhalb der Folie sind senkrecht aneinander gestellt. Diese Konstruktion resultiert aus der gegebenen Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Graphitstruktur. Letztendlich ist die nutzbare Wärmeleitung dieser Konstruktion durch den Materialverbund Graphit-Wasser(Eis)-Luft-Folie und der Verbindungsqualität („angelegte Flächen“) zu den Wärmeübertragerflächen bestimmt.

Eine Zusammenstellung repräsentativer Messergebnisse für verschiedene Graphitmodule zeigt Tabelle 1. Die Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitung ist für die praktische Anwendung von erheblicher Bedeutung. Mit der „gestellten“ Graphitprobe werden signifikant bessere Werte für die bevorzugte Richtung erzielt, wobei hier die Werte aus der Literatur (Messungen von SGL Carbon) aufgrund unterschiedlicher Dichten nicht erreicht werden. Bei den „gelegten“ Proben ist die Übereinstimmung gut.

Sobald die erforderliche Folie die gestellten Graphitplatten ummantelt, reduzieren sich die nutzbaren Wärmeleitwerte um bis zu 80%. Dieser Sachverhalt ist nahezu unabhängig vom Befüllungszustand des Graphits. Bestenfalls sind für solche Module Wärmeleitwerte von $5 \text{ W}/(\text{m K})$ nutzbar, die aber für eine technische Umsetzung in Latentspeichern gut praktikabel sind.

Tabelle 1 gemessene Wärmeleitwerte für Graphit-Module

<p>Modul: Graphit – Luft</p> 	<p>Graphit-Luft - gemessene Wärmeleitung</p> 
<p>Modul: Graphit – Luft – Folie</p> 	<p>Modul Graphit-Luft-Folie - gemessene Wärmeleitung</p> 
<p>Modul: Graphit – Wasser(Eis) – Luft – Folie</p> 	<p>Modul Graphit-Wasser (Eis)-Luft-Folie - gemessene Wärmeleitung</p> 

5. Messergebnisse zur Wärmeleitung für Medien mit Metallschaum

Die in Bild 4 dargestellten Proben repräsentieren eine Reihe von Parametern, die für den Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern relevant sein können. Die dabei gewählten allgemeinen Abkürzungen in den Bezeichnungen „MSpd_rd_sf_aa_pf“ haben folgende Bedeutung.

- pp – Porendichte ppi
- dd – relative Dichte in %
- sf – Form der Stege; KS für Kreuzform und ZS für Zylinderform
- aa – Anbindungsart an die Wärmeübertragerfläche; „oA“ für ohne feste Anbindung und „kA“ für Klebeanbindung und „lA“ für Lötanbindung
- pf - Medium in den Poren des Metallschaums; „Luft“ wenn keine Angabe, „H2O“ für Wasser und „RT6“ für Paraffin mit dem Schmelzpunkt bei 6°C

Damit sind die wesentlichen Parameter Bestandteil in den Bezeichnungen der Messproben. Eine Auswahl der untersuchten Proben zeigt Bild 4. Die Proben mit den integrierten flüssigen Medien müssen ummantelt sein. Dieser Mantel besteht aus einem Kunststoff mit schlechten Wärmeleiteigenschaften. Zusätzlich wird der Mantel mit Armaflex während der Messungen isoliert.

Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen die Diagramme in Bild 5. Demnach können folgende wesentliche Sachverhalte formuliert werden.

1. Eine Temperaturabhängigkeit der gemessenen Wärmeleitung ist zwischen -10°C und 20°C im Rahmen der Messgenauigkeit nicht gegeben. Die eigentlichen Messwerte fallen mit zunehmender Temperatur nur geringfügig.
2. Es ist keine Richtungsabhängigkeit für die nutzbare Wärmeleitung bei offenporigen Metallschäumen messbar. Der Metallschaum ist hinsichtlich der Wärmeleitung isotrop (vgl. „MS10_5,9_ZS_oA-Richtung1“ und „MS10_5,9_ZS_oA-Richtung2“).
3. Die nutzbare Wärmeleitung steigt mit der relativen Dichte leicht an. Die Porendichte hat keinen wesentlichen Einfluss. Der Vorteil einer Verbesserung der Wärmeleitung verliert sich praktisch im Nachteil der Volumenabnahme für das potentielle PCM um ca. 4% (vgl. „MS10_5,9_ZS_oA“, „MS20_10,7_ZS_oA“ und „MS30_8,7_ZS_oA“). D.h. für den praktischen Einsatz ist ein Metallschaum mit einer Porendichte von 10 ppi und einer relativen Dichte von 6% zu empfehlen.
4. Mit einer geklebten Verbindung (wärmeleitender Kleber mit ca. 3,0 W/(m K) zwischen Metallschaum und Wärmeübertragerfläche kann die nutzbare Wärmeleitung um fast 50% verbessert werden (vgl. „MS10_5,9_ZS_oA“ und „MS10_5,9_ZS_kA“). Bezieht

Metallschaum in Latentspeichern

man in die Gesamtbeurteilung den Mehraufwand in der Herstellung ein, führt das nicht zwangsläufig zu einer generellen Empfehlung, eine Klebeanbindung zu nutzen. Auch eine Pressverbindung zwischen Metallschaum und Wärmekontaktfläche sollte in den meisten Anwendungen ausreichend sein.

5. Die Zylinderform der Metallschaumstege ist für die nutzbare Wärmeleitung die günstigere Konstruktion. In der praktischen Umsetzung lohnt es sich demnach nicht, durch ein zusätzliches „Aufwachsen“ der Kunststoffstruktur die „Kreuzform“ zu schaffen (vgl. „MS10_5,9_ZS_kA“ mit „MS10_6,5_KS_kA“).
6. Es sind Wärmeleitwerte von 3 bis 8 W/(m K) technisch nutzbar. Damit verbessert die Metallschaumstruktur verbessert die Wärmeleitfähigkeit von Medien mit diesbezüglich schlechten Eigenschaften signifikant (s. **Tabelle 2**)

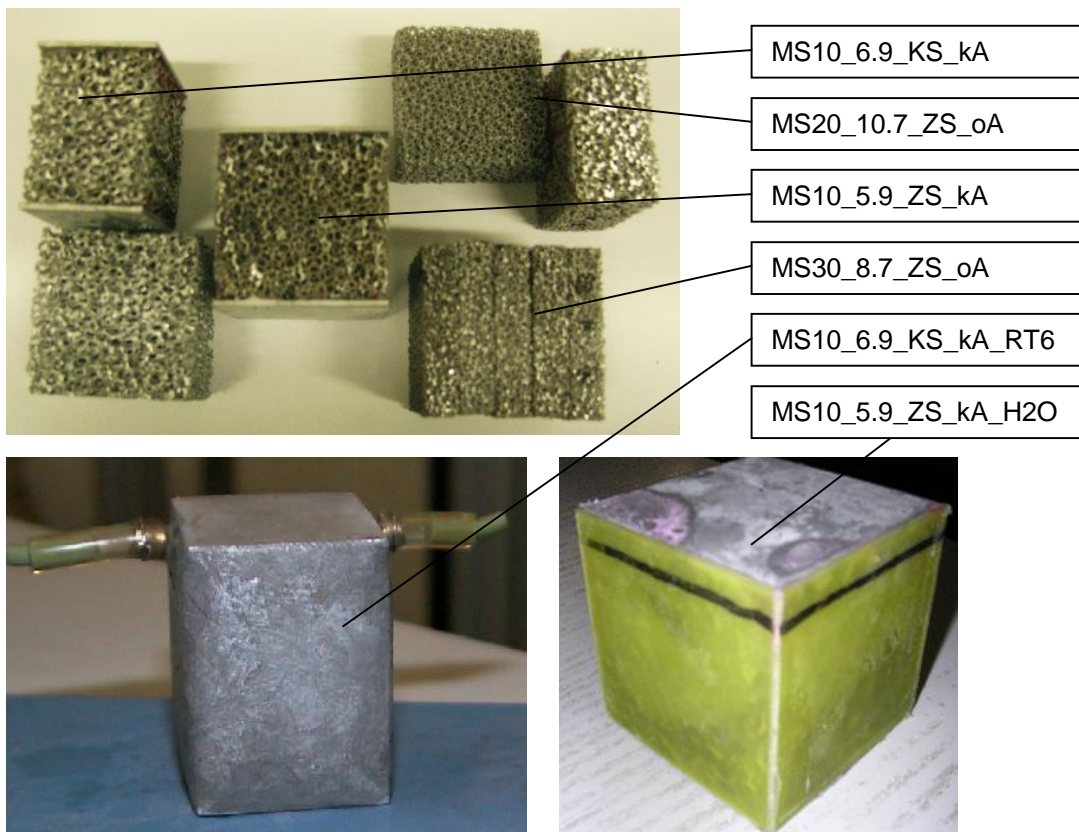


Bild 4 Metallschaum-Messproben für die Wärmeleitmessung

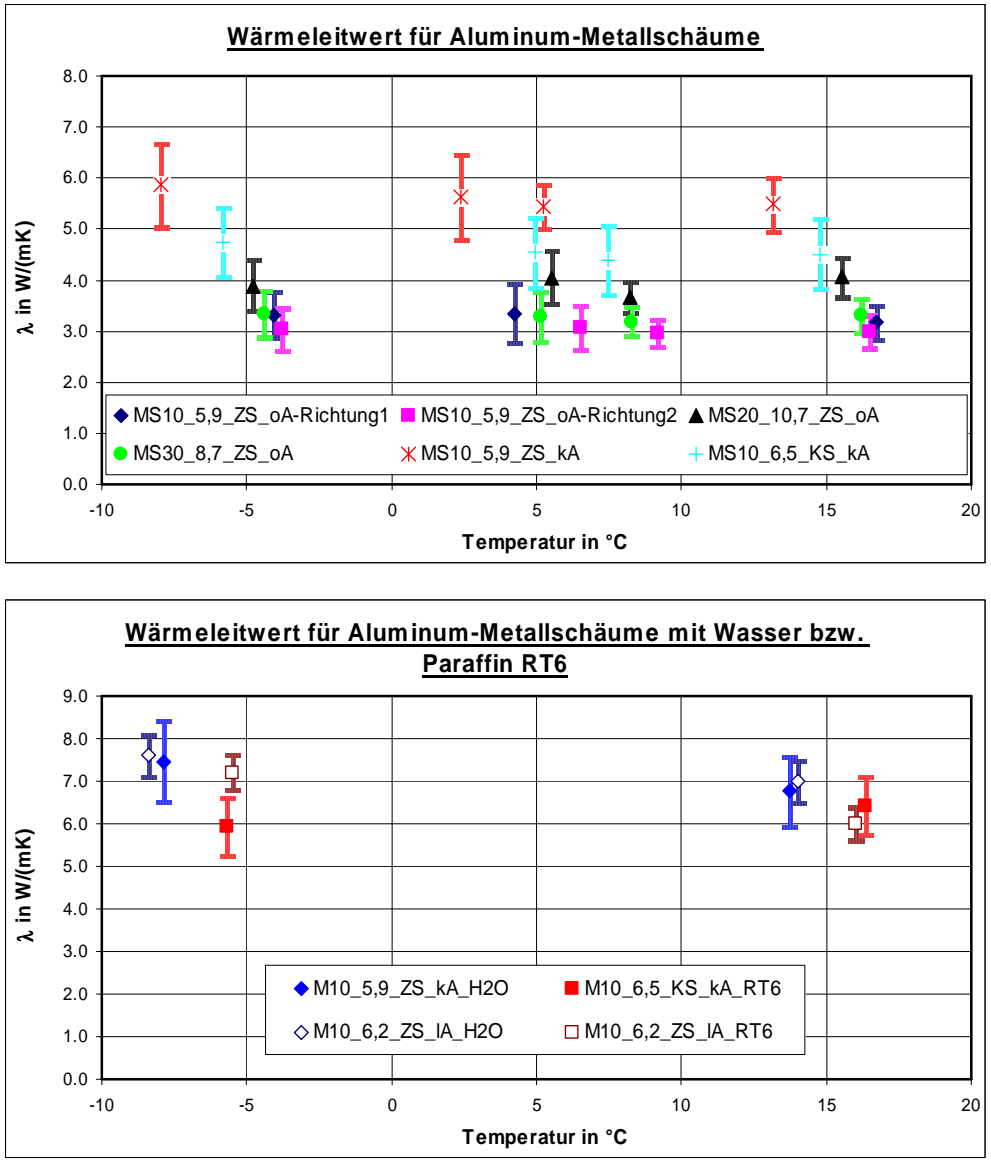


Bild 5 Gemessene Wärmeleitwerte (mit Fehlerwert) für Metallschaum-Luft- (oben) und Metallschaum-PCM-Module (unten)

Tabelle 2 Wärmeleitwerte ausgewählter Medien ohne und mit Metallschaumstruktur

Medium	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)		Verbesserungsfaktor
	Ohne MS	Mit MS	
Luft	ca. 0,024	bis zu 5,8	ca. 242
Wasser	ca. 0,57	bis zu 6,9	ca. 12
Eis	ca. 2,20	bis zu 7,4	ca. 3
Paraffin RT6, flüssig	ca. 0,20	bis zu 6,5	ca. 33
Paraffin RT6, fest	ca. 0,20	bis zu 7,0 *)	ca. 35

*) aus [9]

6. Zusammenfassung

Offenporige Metallschäume sind sehr gut geeignet für den Einsatz in Latentspeichern. Durch die Integration des PCM in ihre Struktur wird deren bekanntlich schlechte Wärmeleiteigenschaft signifikant verbessert und insbesondere für die technische Anwendung auch nutzbar. Insbesondere die Anbindung des Metallschaums an die relevante Wärmeübertragerfläche bestimmt maßgebend die nutzbare Wärmeleitung und damit die Betriebsdynamik von Latentspeichern in der Be- und Entladung.

Die wesentlichen Eigenschaften der Struktur selbst haben für sich nur einen geringen Einfluss auf die nutzbare Wärmeleitung. Damit ist relative Dichte die Haupteigenschaft für die Auswahl der Metallschäume. Je geringer diese ist, um so mehr PCM kann im vorgegebenen Gesamtvolumen des Metallschaumkerns integriert und Speicherpotential vorgehalten werden.

Diese Erkenntnisse werden aktuell in Prototypen für die mobile und stationäre Anwendung umgesetzt und getestet.

7. Literatur

- [1] D. Girlich, K. Hackeschmidt, C. Kühn
Berechnung des Druckverlustes für offenporige Metallschäume;
Zeitschrift Konstruktion, Heft 4-2004
- [2] D. Girlich, K. Hackeschmidt, C. Kühn, R. Riedel
Mechanische Kenndaten offenporiger Aluminiumschäume;
Zeitschrift Konstruktion, Heft 9-2004
- [3] D. Girlich, K. Hackeschmidt, C. Kühn
Bestimmung des Wärmeübergangs durchströmter offenporiger Metallschäume;
Zeitschrift Konstruktion, Heft 1/2-2005
- [4] Hackeschmidt, Karsten; Honke, Marcus
ILK Dresden, ILK-B-31/06-3260
1. Zwischenbericht des ILK Dresden zum Kooperationsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern zur Klimatisierung von Räumen“
Dresden, August 2006
- [5] Hackeschmidt, Karsten; Sabine Wagner; Thomas Birnbaum
ILK Dresden, ILK-B-31/07-3310
2. Zwischenbericht des ILK Dresden zum Kooperationsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern zur Klimatisierung von Räumen“
Dresden, Februar 2007
- [6] Khelifa, Noureddine
Webasto AG Stockdorf
2. Zwischenbericht der Webasto AG zum Kooperationsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern zur Klimatisierung von Räumen“
Stockdorf, Februar 2007
- [7] Girlich, Dieter
m.Pore GmbH Dresden
2. Zwischenbericht der m.pore GmbH zum Kooperationsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Latentspeichern zur Klimatisierung von Räumen“
Dresden, Februar 2007
- [8] Verein Deutscher Ingenieure
VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 5. Auflage
VDI-Verlag Düsseldorf 1988
- [9] Hackeschmidt, Karsten; Pinnau, Sebastian
Untersuchungen an Modellen für Metallschaum Wärmeübertrager
ILK Dresden, ILK-B-31/04 –3104
Dezember 2004