

Neuartige Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffe für Anwendungen im Bereich des thermischen Managements

Kalinichenka, S.; Weidmüller, H.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (1)

Die stetige Zunahme der Leistungsdichte elektronischer Bauteile, die durch Miniaturisierung und Systemintegration hervorgerufen wird, erfordert neue Werkstoffe für das thermische Management. Ideale Materialien sollten daher für die Anwendungen als Wärmesenke zum einen hohe Wärmeleitfähigkeiten aber auch gleichzeitig große kapazitive thermische Eigenschaften besitzen. Verbundwerkstoffe aus einer sehr gut wärmeleitenden Kupfermatrix und Phasenübergangsmaterialien (PCM – phase change materials) ermöglichen die gewünschten Eigenschaftskombinationen, denn die Speicherwerkstoffe wie Paraffine und salzartige Verbindungen sind in der Lage, enorm große Mengen an latenter Wärme (150–250 kJ/kg) innerhalb ihres Fest-Flüssig-Phasenübergangs aufzunehmen und bei Abkühlung wieder reversibel abzugeben. Daher sind PCM neben den Anwendungen als Wärmespeicher von industrieller Abwärme oder solarthermischer Energie auch für das Kühlen und Temperieren von elektronischen Komponenten interessant. Der vorliegende Betrag beinhaltet Ergebnisse, die im Rahmen eines einjährigen durch die ICA (International Copper Association) geförderten Projektes am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Dresden erzielt wurden. Neben grundlegenden Informationen über Phasenübergangsmaterialien und deren Verwendung im thermischen Management wird zunächst der erarbeitete pulvermetallurgische Herstellungsprozess der PCM-gefüllten Kupferverbundwerkstoffe vorgestellt. Anschließend werden die Beziehungen zwischen dem ausgebildeten Gefüge, der thermischen Werkstoffeigenschaften sowie die Charakteristik der zeitabhängigen thermischen Be- und Entladeprozesse diskutiert.

Phase change materials

Unter PCM (Phase Change Materials) versteht man Substanzen, die während ihres Phasenübergangs bei einer definierten Temperatur große Mengen an thermischer Energie aufnehmen oder abgeben. Dabei wird aufgrund

einer größeren latenten Wärme vorwiegend der Fest-Flüssig-Phasenübergang genutzt.

Es existieren mehr als 500 bekannte PCM [1], die einen sehr breiten Temperaturbereich von -80 °C bis 900 °C abdecken (Bild 1). Aus der Vielzahl der Phasenübergangsmaterialien werden jedoch nur einige für kommerzielle Anwendungen genutzt.

Generell wird zwischen organischen und anorganischen PCM unterschieden. Zu den bedeutendsten organischen PCM gehören vor allem Alkane, Wachse und Paraffine. Die Vorteile der organischen Substanzen liegen in ihrer chemischen und thermischen Stabilität. Auch zeigen sie keine korrosive Wirkung hinsichtlich einer Vielzahl von Metallen. Eine kleinere Schmelzenthalpie, eine geringere Wärmeleitfähigkeit und eine Entzündbarkeit bei geringen Temperaturen sind jedoch Nachteile der organischen PCM.

Vertreter von anorganischen PCM sind Salzhydrate, Wasser, Nitrate, Chloride, Hydroxide sowie deren eutektische Mischungen. Im Vergleich zu organischen PCM weisen anorganische in der Regel viel größere Schmelzenthalpien auf. Anwendungsprobleme der anorga-

nischen Verbindungen können sich jedoch durch ihre meist starke korrosive Wirkung gegenüber Metallen, durch ihr Unterkühlungsverhalten sowie durch die zum Teil fehlende thermische Stabilität ergeben [3].

Momentan sind mehrere kommerzielle latentwärmespeichernde Werkstoffe (vor allem die eutektischen Mischungen aus Salzhydraten und Paraffine) bekannt. Die bedeutendsten Anbieter sind: Mitsubishi Chemical, Climator, Rubitherm GmbH, Merck KGaA und BASF.

Anwendung von PCM im thermischen Management

Seit einigen Jahren finden PCM eine breite Anwendung in verschiedenen Bereichen, wie Raumklimatisierung, Pufferspeicherung der Wärme in Solar-Anlagen, Funktionsbekleidung, Transport von temperaturempfindlichen Stoffen und Automobilindustrie [3]. Der Schutz vor thermischer Überbelastung aber auch die Speicherung von thermischer Energie sind somit die Hauptaufgaben der PCM innerhalb dieser Anwendungen.

Auch im Bereich des thermischen Managements von elektronischen Komponenten mit Hilfe von Phasenübergangsmaterialien übernehmen dieselben die oben erwähnten Aufgaben. Dabei sollte jedoch ein Wärmesenkenwerkstoff neben einer hohen „Wärmekapazität“, die durch das PCM hervorgerufen wird, ebenfalls eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Da die thermischen Speicherwerkstoffe generell sehr niedrige Wärmeleitfähigkeiten ($0,2\text{ W/(mK)}$ bis $0,7\text{ W/(mK)}$) aufweisen [4], ist eine Kombination mit hochwärmeleitfähigen Metallen (z.B. Kupfer) sinnvoll, um in Form eines Metall-Matrix-Verbundwerkstoffes die gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Diese neuartigen Verbundwerkstoffe dienen

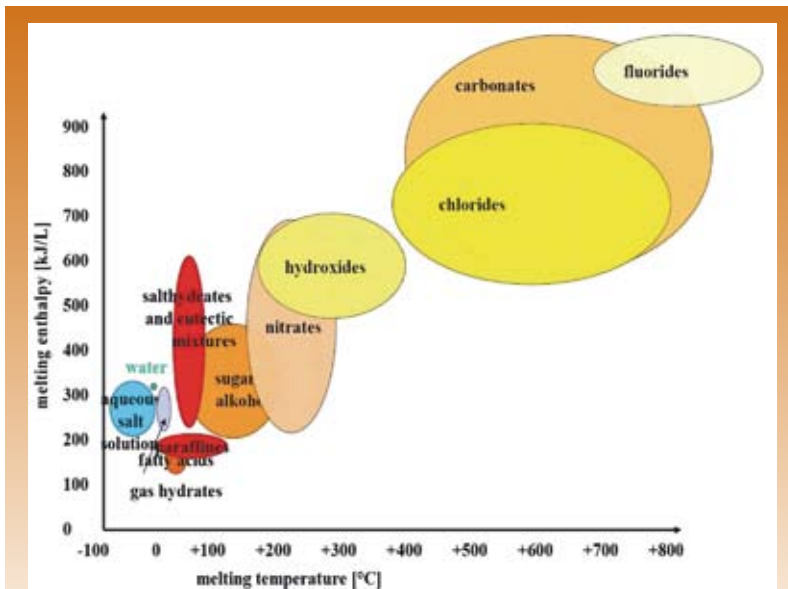


Bild 1: Die Schmelztemperaturen und die Schmelzenthalpien von unterschiedlichen PCM [2]

zum einen der Glättung von bzw. dem Schutz vor auftretenden Temperaturspitzen, die durch zyklische Schaltvorgänge z. B. von Leistungselektronik verursacht werden. Zum anderen verhindern diese Werkstoffe durch ihre kapazitiven Eigenschaften starke Temperaturschwankungen der zu schützenden elektronischen Komponente. Die dadurch realisierte konstante Betriebstemperatur beugt zusätzlich thermischen Spannungen zwischen den elektronischen Bauteilen und der Wärmesenke vor. Derartige Verbundwerkstoffe bieten gegenüber traditionellen Wärmesenken weitere Vorteile wie eine kompakte und zuverlässige Kühlung. Des Weiteren sind keine zusätzlichen elektrischen Verbraucher wie z. B. Lüfter notwendig. Daher können diese Wärmesenken geräuschlos, energieeffizient aber auch autark unter extremen Bedingungen arbeiten.

Herstellung von Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffen

Der im Rahmen der Untersuchungen verwendete pulvermetallurgische Herstellungsprozess der Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffe ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Er beinhaltet als wesentliche Prozessschritte die Herstellung eines porösen, dünnwandigen

Kupfergerüsts und die anschließende Infiltration der erzeugten Kupfermatrix mit zwei verschiedenen PCM. Für die Einstellung von erwünschten Porositäten der Kupfermatrices wurden spezielle organische Verbindungen (Abstandshalter) dem Kupferpulver Typ FFL der Firma ECKA Granules zugemischt. Im Anschluss des Pressvorgangs der Pulvermischungen wurden die Abstandshalter im Laufe eines Entbinderungsschrittes entfernt, so dass nach der Sinterung Kupfermatrices mit definierten Porositäten vorlagen.

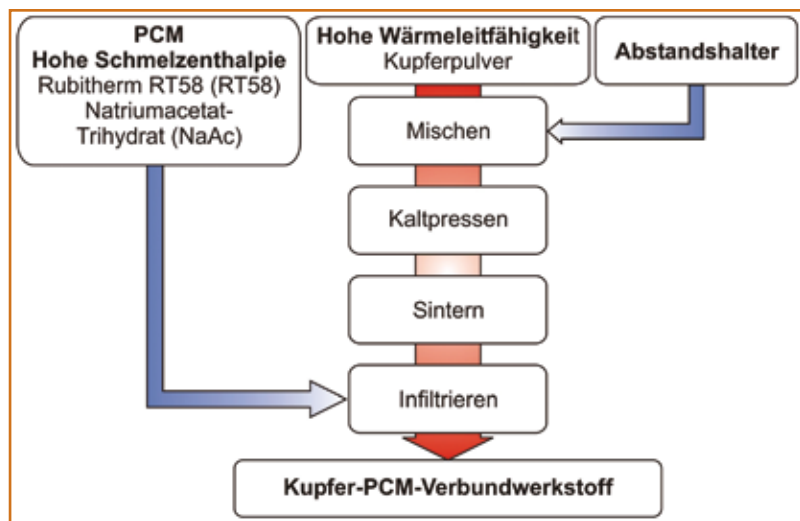


Bild 2: Fließschema der Herstellung von Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffen

Für die Infiltration wurden als Phasenübergangsmaterialien das Salzhydrat Natriumacetat-Trihydrat und das Paraffin Rubitherm RT 58 ausgewählt, da beide PCM ähnliche Schmelztemperaturen besitzen. Natriumacetat-Trihydrat ($\text{NaCH}_3\text{COO}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) weist beim Schmelzpunkt $58\text{ }^\circ\text{C}$ eine Schmelzenthalpie von 264 kJ/kg auf. Das Salzhydrat ist farb- und geruchlos, nicht toxisch, leicht löslich in Wasser und löst sich bei $58\text{ }^\circ\text{C}$ inkongruent im eigenen Kristallwasser. Die Abspaltung des Kristallwassers selbst erfolgt erst bei $120\text{ }^\circ\text{C}$. Das dabei entstehende Natriumacetat-Anhydrid besitzt eine Schmelztemperatur von $324\text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Für die Untersuchungen wurde weiterhin das kommerzielle Produkt der Firma Rubitherm Technologies GmbH auf Paraffin-Basis ausgewählt. Das Gemisch aus Alkanen ($\text{C}_{n}\text{H}_{2n+2}$ - gesättigte Kohlenwasserstoffe) mit der Bezeichnung Rubitherm RT 58 ist ein ungebundenes Wärmespeichermaterial, das bei einem Schmelzpunkt von $59\text{ }^\circ\text{C}$ eine im Vergleich zum Natriumacetat-Trihydrat kleinere Schmelzenthalpie von 181 kJ/kg besitzt [6]. Der besondere Vorteil des oben beschriebenen Prozesses ist die Ausbildung von festen mit offener Porosität versehenen Kupfermatrices. In Folge dessen weisen die späteren Verbundwerkstoffe hohe Wärmeleitfähigkeiten und genügend hohe mechanische Eigenschaften auf.

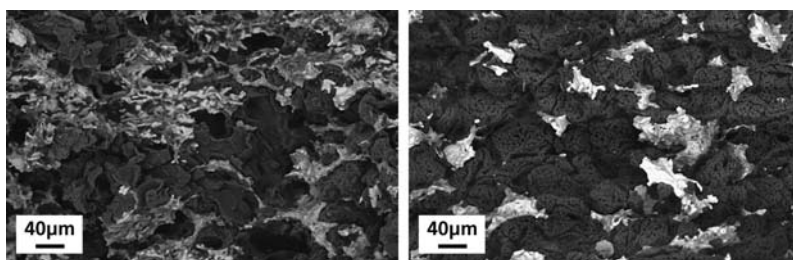


Bild 3: REM-Aufnahmen von Bruchflächen der Proben Cu/RT58/60 und Cu/NaAc/60 im BSE-Modus

Die Infiltration der porösen Kupfermatrices erfolgte 25 K oberhalb der Schmelztemperatur. Beim Erstarren bilden sich infolge der Volumenabnahme des PCM Poren, so dass nach dem Infiltrieren theoretisch nur 86,7 % Poren mit Rubitherm RT 58 bzw. 88,3 % mit Natriumacetat-Trihydrat gefüllt sind. Somit ist über die gewählte Infiltrationsmethode nur eine nahezu vollständige Befüllung der Poren mit PCM im flüssigen Zustand möglich.

Gefüge und thermische Eigenschaften

Durch die Infiltrierung der porösen Kupferproben mit Natriumacetat-Trihydrat bzw. Rubitherm RT 58 wird eine homogene Verteilung beider PCM in der Kupfermatrix erzielt. Das Bild 3 zeigt die rastermikroskopischen Aufnahmen von Bruchflächen der aus Kupferpulver Typ FFL hergestellten Proben mit 60 vol.-% Rubitherm RT 58 bzw. Natriumacetat-Trihydrat. Innerhalb der im BSE-Modus aufgenommenen Bilder (Ordnungszahlkontrast) können die hell erscheinenden Bereiche den Kupfermatrices sowie die dunklen Bereiche dem jeweiligen PCM zugeordnet werden.

Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten (WLF) von infiltrierten bzw. uninfiltrierten Kupfermatrices mit analogen Volumenanteilen liefert kaum Unterschiede (Bild 4). Ursache dafür sind die äußerst geringen Wärmeleitfähigkeiten der PCM (NaAc: 0,7 W/(mK) und RT58: 0,2 W/(mK)). Gleichzeitig kann jedoch festgestellt werden, dass die mit Natriumacetat-Trihydrat infiltrierten Proben stets geringfügig größere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen als die mit Rubitherm RT 58

infiltrierten. Dies ist durch die etwas größere Wärmeleitfähigkeit aber auch durch die größere spezifische Wärmekapazität des NaAc im Vergleich zu RT58 zu erklären.

Charakterisierung des Wärmespeichervermögens von PCM-Verbundwerkstoffen

Das Wärmespeichervermögen der hergestellten Proben mit Volumenanteilen von 40 vol.-% und 60 vol.-% des jeweiligen PCM wurde mittels einer eigens entwickelten Messmethode charakterisiert (Bild 5). Die Methode basiert auf einem Vergleich des thermischen Verhaltens der zu untersuchenden Probe und einer Referenzsubstanz mit bekannten thermischen Eigenschaften. Dabei werden die beiden Proben unter gleichen Bedingungen erwärmt bzw. abgekühlt. Simultan erfolgt zeitabhängig die Registrierung der Temperaturverläufe an zwei verschiedenen Seiten der Messproben mit Hilfe

von Thermoelementen. Diese befinden sich an der Unterseite der Proben im Bereich der Ausgleichsplatte aus Kupfer und an der oberen Seite der Probenverkapselung. Ziel der zusätzlichen Kupferverkapselung ist es, unerwünschte Effekte wie Reaktionen der PCM mit angrenzenden Materialien zu unterbinden. Insbesondere bei Verbundwerkstoffen mit Natriumacetat-Trihydrat ist es auch wichtig, eine hermetisch geschlossene Verkapselung zu realisieren, um die Verdampfung des Kristallwassers bei höheren Temperaturen zu vermeiden. Neben den Einflüssen von Art und Volumengehalt der verwendeten PCM wurde auch die Abhängigkeit der Heizelementleistung auf die Lade- bzw. Entladevorgänge der hergestellten Verbundwerkstoffe untersucht.

Unter der Annahme, dass die gesamte Wärme, die der Heizer produziert, von der Probe aufgenommen wird, kann bereits im Vorfeld die für die Temperaturänderung der Proben von 26,5 °C auf 80 °C notwendige Wärmemenge theoretisch berechnet werden (Bild 6). Für die Berechnung wurde sowohl die unvollständige Befüllung der Kupfermatrices im festen Zustand der PCM als auch die Änderung der spezifischen Wärmekapazität beim Fest-Flüssig-Phasenübergang berücksichtigt. Ein konstantes Volumen wurde für alle Proben vorausgesetzt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass alle betrachteten PCM-Verbundwerkstoffe im Vergleich zu

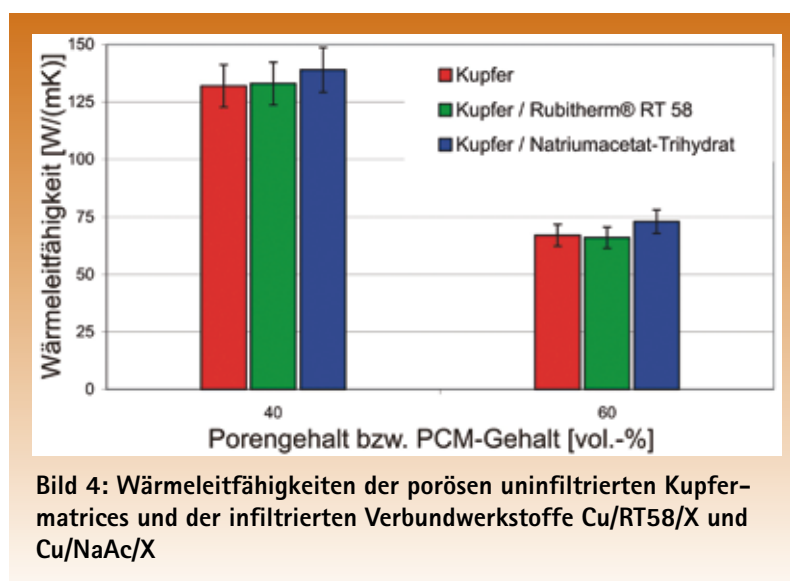


Bild 4: Wärmeleitfähigkeiten der porösen uninfiltrierten Kupfermatrices und der infiltrierten Verbundwerkstoffe Cu/RT58/X und Cu/NaAc/X

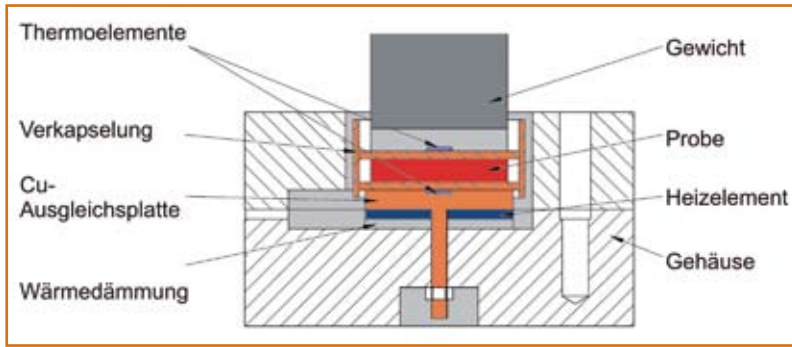


Bild 5: Aufbau der Messanordnung zur Charakterisierung des Wärmespeichervermögens von PCM-Verbundwerkstoffen

reinem Kupfer mehr Wärme aufnehmen können. Dabei spielt vor allem die latente Wärme eine entscheidende Rolle. Somit sollten die Verbundwerkstoffe mit Natriumacetat-Trihydrat aufgrund der größeren Schmelzenthalpie des PCM im Vergleich zu den Rubitherm infiltrierten Proben eine deutlichere Verzögerung im zeitlichen Temperaturverhalten aufweisen. Wie bereits erwähnt, ist für das thermische Management von elektronischen Komponenten nicht nur die von dem Werkstoff aufgenommene Wärme, sondern auch die durch den Werkstoff transportierte Wärmemenge von Bedeutung. Denn nur durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Verbundwerkstoffes wird eine schnelle Energieabfuhr von dem zu schützenden Bauteil gewährleistet.

Die mit Hilfe der Messmethode bestimmten zeitabhängigen Temperaturverläufe beider Thermolemente sind in Bild 7 sowohl für reines Kupfer als auch für die mit Rubitherm RT 58 infiltrierten Verbundwerkstoffe mit PCM-Volumenanteilen von 40 vol.-% bzw. 60 vol.-% dargestellt. Die Messungen erfolgten bei einer konstanten Leistung des Heizelementes von 15 W.

Der oberhalb der Probenverkapselung aufgezeichnete Temperaturverlauf zeigt für den Verbundwerkstoff mit 40 vol.-% Rubitherm RT 58 (Cu/RT58/40) im Bereich des Schmelzpunktes des PCM bei 59 °C nur geringe Änderungen im Vergleich zu reinem Kupfer. Bei der Temperaturmessung der Probe mit 60 vol.-% Rubitherm RT 58 ist dagegen eine

größere Abweichung vom kontinuierlichen Verlauf festzustellen, die durch den Phasenübergang des PCM verursacht wird. Diese Probe erreicht dadurch die Temperatur von 90 °C an der Seite der Ausgleichsplatte mit einer Verzögerung von ca. 70 s im Vergleich zur reinen Kupferprobe.

Idealisiert betrachtet, müsste die Temperatur der mit Rubitherm RT 58 infiltrierten Kupfermatrix ab 59 °C für längere Zeit konstant bleiben, da die zugefügte Wärme zunächst für das Schmelzen des Paraffins verbraucht wird. Stattdessen ist der Schmelzvorgang anhand der gemessenen Temperaturverläufe beider Verbundwerkstoffe nicht deutlich sichtbar. Dies bedeutet, dass die vom Heizelement produzierte Wärme sowohl für die Temperaturänderung des Werkstoffs als auch für das Schmelzen des Paraffins verbraucht wird. Die Ursache hierfür ist offensichtlich ein breiterer Schmelzbereich um 59 °C sowie die geringe Schmelzenthalpie des PCM. Auf den Einfluss der geringeren Schmelzenthalpie von RT58 wurde bereits innerhalb der theoretischen Vorbetrachtungen eingegangen (Bild 6).

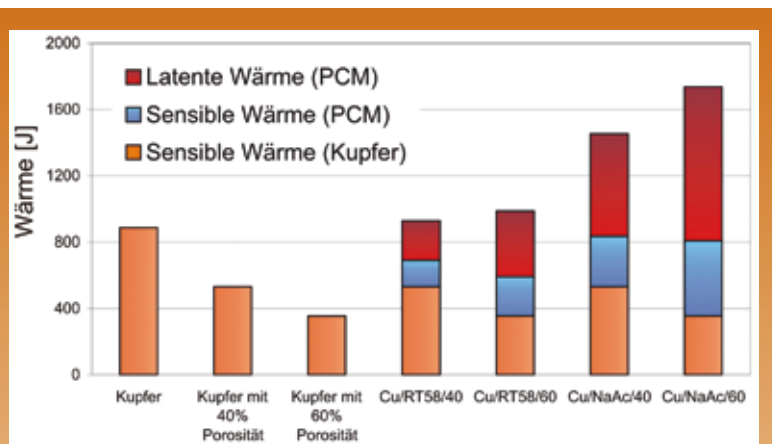


Bild 6: Die für die Temperaturänderung der Proben von 26,5 °C auf 80 °C notwendige Wärmemenge

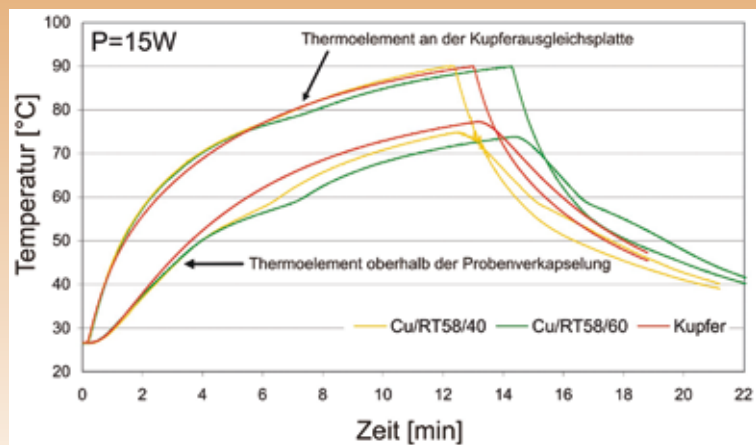
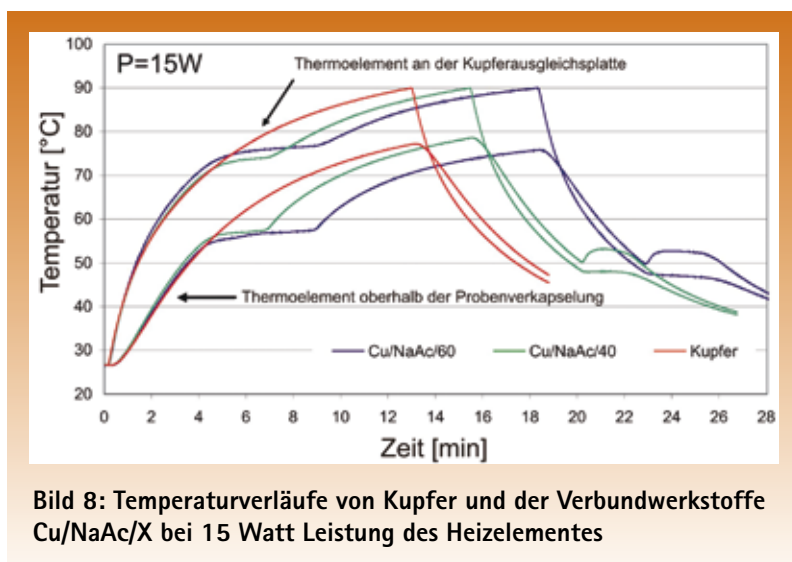


Bild 7: Temperaturverläufe von Kupfer und der Verbundwerkstoffe Cu/RT58/X bei 15 Watt Leistung des Heizelementes



Analoge Untersuchungen zum Wärmespeichervermögen wurden ebenfalls an den Kupfer-Verbundwerkstoffen mit Natriumacetat-Trihydrat durchgeführt. In Bild 8 sind die zeitabhängigen Temperaturverläufe der reinen Kupferreferenz und die der Verbundwerkstoffe mit 40 vol.-% bzw. 60 vol.-% Natriumacetat-Trihydrat dargestellt. Diese Messungen erfolgten ebenfalls bei einer konstanten Leistung des Heizelementes von 15 Watt.

Aus dem Bild 8 geht hervor, dass die Temperaturen an der Ausgleichsplatte und an der Oberseite der Verkapselung während des Schmelzvorgangs von NaAc sowohl bei 40 vol.-% als auch bei 60 vol.-% PCM nahezu konstant bleiben. Dies bedeutet, dass die zugefügte Wärme ausschließlich für das Schmelzen des PCM verbraucht wird. Dabei beträgt die Temperatur an der Oberfläche der Verkapselung in beiden Fällen ca. 57 °C. Diese Temperatur entspricht annähernd dem Schmelzpunkt des Natriumacetat-Trihydrates von 58 °C. Aufgrund des Temperaturgradienten sind die Temperaturen an der Ausgleichsplatte während des Schmelzvorgangs des PCM für beide Verbundwerkstoffe deutlich größer und liegen im Bereich von 74 - 76 °C.

Weiterhin ist auffällig, dass die durch das Schmelzen des Natriumacetat-Trihydrates verursachten Temperaturänderungen gleichzeitig sowohl an der Kupferausgleichsplatte als auch

an der oberen Verkapselung registriert werden. Dies bestätigt, dass die auftretende Wärme durch die gut leitenden Kupfermatrices homogen in der Probe verteilt wird.

Aufgrund des Schmelzvorgangs von NaAc verzögert sich die Erwärmung der Verbundwerkstoffe erheblich, so dass eine kritische Temperatur von 90 °C im Fall von 40 vol.-% PCM 150 s und im Fall von 60 vol.-% PCM 300 s später erreicht wird als im Vergleich zu reinem Kupfer. Die deutlich größeren Zeitverzögerungen im Gegensatz zu den Proben mit RT58 sind sowohl durch die größere Schmelzenthalpie als auch durch die höhere Dichte von NaAc erklärbar. Während des Abkühlvorgangs ist für beide Verbundwerkstoffe die reversible Kristallisation des Salzhydrates bei ca. 50 °C nachweisbar. Dadurch nimmt die Temperatur an der Oberseite der Verkapselung zu. Die Temperatur der Ausgleichsplatte, die offensichtlich schneller abgekühlt wird, bleibt dabei nahezu konstant. Das Unterkühlungsverhalten von NaAc wurde von vielen Autoren untersucht [7,8]. So wird in [8] beispielsweise ein Kristallisationsbereich von 50 °C bis 30 °C angegeben, der maßgeblich von der Abkühlgeschwindigkeit, dem Probenvolumen und der Probenreinheit beeinflusst wird. Dies deckt sich mit dem beobachteten Unterkühlungsverhalten des Salzhydrates.

Es wurden zusätzlich die Temperaturverläufe der oben beschriebenen Ver-

bundwerkstoffe bei einer konstanten Leistung von 20 W aufgenommen. Durch die höhere Leistung laufen die Prozesse wie die Temperaturänderung der Proben und das Schmelzen des PCM erwartungsgemäß schneller ab. Im Vergleich zu den Temperaturverläufen bei geringerer Leistung von 15 W wurden vor allem höhere Temperaturen an der Kupferausgleichsplatte und nur geringfügig niedrigere Temperaturen an der oberen Seite der Verkapselung während des Schmelzvorgangs des PCM festgestellt. Dies kann durch einen größeren Temperaturgradienten erklärt werden, da die zugefügte Wärme nicht schnell genug von der heißen zur kalten Seite transportiert wird.

Zusammenfassung

Durch die stetige Zunahme von integrierten Schaltkreisen, höheren Stromdichten und Taktraten sowie höheren Kontaktierungsdichten entwickelt sich das thermische Management von elektronischen Komponenten zunehmend zur zentralen Aufgabe innerhalb der Systementwicklung. Seit einigen Jahren werden PCM als eine alternative Methode zum Kühlen von CPU (central processing unit) und tragbaren elektronischen Geräten sehr intensiv erforscht [9]. Der Einsatz von PCM im passiven thermischen Management kann erfolgreich genutzt werden, wenn die beim Betrieb der Komponenten entstehende Wärme periodisch auftritt.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen, die im Rahmen eines durch die International Copper Association (ICA) geförderten Projektes durchgeführt wurden, war es, Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffe auf pulvermetallurgischem Wege herzustellen und umfassend hinsichtlich ihrer Gefüge und thermischen Eigenschaften zu charakterisieren. Dabei dienen Natriumacetat-Trihydrat sowie das Paraffin Rubitherm RT 58 als Phasenübergangsmaterialien.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Phasenübergänge der PCM an den mit Rubitherm RT 58 und an den mit Natriumacetat-Trihydrat infiltrierten Kupfermatrices in unter-

schiedlicher Form und Stärke dokumentierbar sind. Die gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe korrelieren dabei sehr gut mit den theoretischen Abschätzungen.

Vor allem zeigten die Verbundwerkstoffe mit Natriumacetat-Trihydrat vielversprechende Ergebnisse, um zukünftig als Kühl- bzw. Temperierwerkstoffe im thermischen Management von elektrischen und elektronischen Komponenten Anwendung zu finden. Für künftige Anwendungen, um z. B. periodisch auftretende Übertemperaturen zu vermeiden, ist es daher notwendig, entsprechend der gewünschten Arbeitstemperatur des Bauteils ein geeignetes Phasenübergangsmaterial auszuwählen sowie dessen Anteil und die geometrischen Parameter der Wärmesenke hinsicht-

lich der thermischen Verlustleistung der elektrischen bzw. elektronischen Komponenten zu optimieren.

Literatur:

- [1] D.V. Hale, M.J. Hoover, M.J. O'Neil; Phase Change. Materials Handbook, NASA CR 61363, (1975)
- [2] H. Mehling, Überblick Leitprojekt: „Innovative PCM-Technologie“; ZAE-Symposium, (2004)
- [3] B. Zalba, J.B. Marin, L.F. Cabeza and H. Mehling; Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, heat Transfer Analysis and Applications; Applied Thermal Engineering, 23, Pages. 251-283, (2003)
- [4] O. Öttinger; PCM/Graphitverbund-Produkte für Hochleistungswärmespeicher; ZAE Symposium, Wärme und Kältespeicherung mit Phasenwechselmaterialien (PCM), München, 4. - 5. März, 04 (2004)
- [5] J. Falbe, M. Regitz; Römpf chemie lexikon 9. Auflage, Band 4, (1995)

- [6] <http://www.rubitherm.com/deutsch/index.htm>
- [7] C. Rudolph; Entwicklung einer Methode zur Suche nach Kristallisationsinitiatoren für Salzhydratschmelzen mittels High-Throughput-Screening; Dissertation, Technische Universität BA Freiburg, (2002)
- [8] T. Wada, F. Kimura, Studies on Salt Hydrates for Latent Heat Storage II., Bul. Chem. Soc. Jpn. 56, (1983)
- [9] S. V. Garimella; Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics; Microelectronics Journal 37, Pages. 1165-1185, (2006)

(1) *Siarhei Kalinichenka, Hendrik Weidmüller, Thomas Weißgärber, Bernd Kieback, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Winterbergstr. 28, D-01277 Dresden*

Kupfer – Ein Werkstoff für Raketenbrennkammern

Kirchberger, C.; Kau, H.-P. (1)

Raumfahrttransportsysteme, wie die europäische Ariane 5-Trägerfamilie, stellen seit jeher Prestigeprojekte der Hochtechnologie dar.

Dabei ist der Antrieb das zentrale Subsystem eines solchen Trägers und somit von größter Bedeutung. Zu berücksichtigen ist dabei, dass in einem Raketenantrieb die Leistungsdichten die der meisten anderen technischen Anwendungen bei weitem übertreffen und daher eine große Herausforderung darstellen. Die Beherrschung der hohen Temperaturen und Drücke, die in einer Raketenbrennkammer entstehen, bedarf einerseits der detaillierten Kenntnis der komplexen Vorgänge im Antriebssystem und andererseits spezieller Materialien und Produktionsmethoden. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften kommen in den thermisch höchstbelasteten Bereichen überwiegend Kupfer oder Kupferlegierungen zum Einsatz.

Der Lehrstuhl für Flugantriebe an der Technischen Universität München betreibt seit mehreren Jahren einen Prüfstand, an dem eine Vielzahl unter-

schiedlicher Aspekte einer Raketenbrennkammer näher untersucht wird. Derzeitige

Forschungsarbeiten befassen sich unter Verwendung eines Sauerstoff/Kerosin-Treibstoffgemisches einerseits mit der Treibstoffeinspritzung und der damit verbundenen Auswirkungen auf Wärmefreisetzung und Betriebsverhalten der Brennkammer und andererseits mit der Untersuchung unterschiedlicher Materialien und Kühlmethoden. Die verwendete Brennkammer aus sauerstofffreiem Kupfer wird konvektiv mit Wasser gekühlt. Druck- und Temperaturmessungen entlang der Brennkammerachse erlauben eine Bestimmung der übertragenen Wärmeleistung und somit Rückschlüsse über Wärmefreisetzung, Wärmeübergang und Wärmetransport in der Brennkammer. Die modulare Bauweise erlaubt zudem eine Erweiterung mit anderen Segmenten, in denen z.B. neuartige Werkstoffe, Bauweisen und spezielle Kühlkonzepte wie Film- oder Transpirationskühlung untersucht werden können.

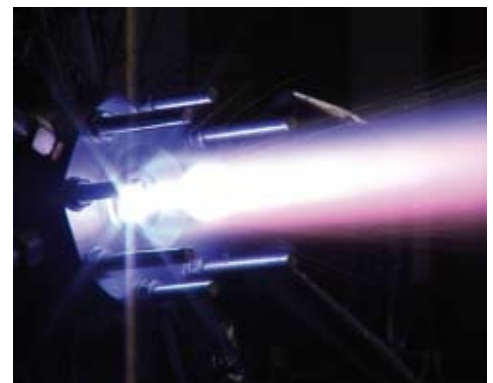


Foto: TU München

Alle Experimente werden durch umfangreiche numerische Untersuchungen sowohl vorbereitet als auch ausgewertet. Neben kommerziellen Lösungen werden dabei hauptsächlich selbst entwickelte Werkzeuge verwendet, die auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse stetig verbessert werden.

(1) *Dipl.-Ing. Christoph Kirchberger, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Kau; Lehrstuhl für Flugantriebe, Technische Universität München*