

# Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs offenporiger Metallschäume<sup>1</sup>

Autoren: Dr. rer. nat. D. Girlich,  
Dr.-Ing. K. Hackeschmidt,  
Dipl.-Ing. C. Kühn<sup>2</sup>

## Abstract

### **Determination of the convective heat transfer of open pore metal foams**

The metal foam (aluminium) affords good alternatives for components with multifunctional requirements. The simultaneous realisation of requirements of fluid mechanics, heat transfer and energy dynamics is possible in consideration of design.

In this publication a calculation of the convective heat transfer of metal foams is presented based on the non dimensional heat transfer coefficients. The influences of the proper design were quantified in addition to the way of the connection between the heat transfer plane and the metal foam, the height of the metal foam and the parameter of the structure. In [1] a calculation of the pressure drop in dependence of the flow trough was presented.

By the example of a heat pipe for cooling of electronic components the results of the metal foam application are described in comparison to another designs.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Wärmeübertrager hat zum Ziel bei geringer Temperaturdifferenz eine hohe thermische Leistung mit geringem Aufwand zu übertragen. Zur Steigerung der thermischen Leistung führt jede Einwirkung auf das strömende Fluid und die wärmeübertragenden Flächen. Offenporige Metallschäume bieten eine große innere Oberfläche und eine geringe Masse für den schnellen Wärmeübergang zwischen den beteiligten Medien.

Im folgenden Beitrag werden die experimentellen Ergebnisse aus Wärmeübergangsmessungen mit Luft und ein Berechnungsverfahren auf Basis der Kennzahlgleichung für die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs von offenzelligen Metallschaumstrukturen vorgestellt. Dabei werden die Einflüsse maßgebender Designkriterien, wie die Art und Weise der Anbindung des Metallschaums an die Wärmeübertragerfläche, die Metallschaumhöhe und die Strukturparameter quantifiziert. In einer früheren Veröffentlichung [1] wurde bereits ein Berechnungsverfahren für die Bestimmung des Druckverlustes infolge der Durchströmung der Struktur vorgestellt.

Am Beispiel eines Wärmerohres für die Kühlung elektronischer Bauteile werden die theoretischen Ergebnisse für den offenporigen Metallschaum praktisch umgesetzt und vergleichend zu anderen Konstruktionen dargestellt.

---

<sup>1</sup> Arbeit im Rahmen des Verbundprojektes „Grundsatzuntersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in der Luft- und Klimatechnik“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Förderkennzeichen:0327336B

<sup>2</sup> Partner des Verbundprojektes: Fa m-pore GmbH Dresden; ILK gem. GmbH Dresden; GEA GMW Bochum

## Einleitung

Unter dem Aspekt multifunktionaler Bauteile für die Anwendung in der Strömungs-, Wärme-, Klima- und Prozesstechnik verfügt offenporiger Metallschaum über ein beträchtliches Anwendungspotenzial. Mit ausreichender Kenntnis der thermischen und physikalischen Eigenschaften offenporiger Metallschäume einerseits und den zu erfüllenden technischen Anforderungen andererseits bieten sich Bauteilkonstruktionen aus Metallschaum zur Strömungsbeeinflussung auf kurzem Strömungswegen, zur Verbesserung der Wärmeübertragung und zur erhöhten Energieabsorption an [1], [2], [3].

Die Struktur der offenporigen Metallschäume gestattet praktisch die gleichzeitige Nutzung dieser Eigenschaften in unterschiedlicher Gewichtung. Für eine objektive Bewertung der praktikablen Anwendung von Metallschaumkomponenten und für deren Auslegung hinsichtlich Durchströmung und Wärmeübertragung sind folgende Werkzeuge und Bedingungen erforderlich:

- Modellbeschreibung der Geometrie von Metallschäumen
- Abschätzung zu erwartender Druckverluste in Abhängigkeit des Designs
- Bewertung der Wärmeübertragungseigenschaften

Zur Bestimmung des Wärmeübergangs untersuchten z.B. A. Bhattacharya/ R.L. Mahajan Metallschaumkonstruktionen mit so genannten Finns (Kühlrippen mit Metallschaumausfüllung) [4]. In Abhängigkeit der Anzahl der Finns ermittelten sie auf Basis experimentell gewonnener Daten für 1 bis 2 m/s Anströmgeschwindigkeit eine Kennzahlgleichung für Metallschäume mit einer Porendichte von 5 und 20 ppi. Einen analytischen Lösungsansatz für Metallschäume mit einer Porendichte von 20 ppi und 30 ppi geben A.-F. Bastawros/ A.G. Evans in [5] an. Die mit diesem Ansatz berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Daten nicht überein.

Der im Weiteren vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der Porendichte und der relativen Dichte des offenporigen Metallschaumes. Das Ziel ist eine Kennzahlgleichung, mit der auf Basis einfach bestimmbarer Strukturgrößen ausreichend genau der Wärmeübergang durchströmter Metallschäume bestimmt werden kann.

Die wesentlichen Vorgabeparameter für die Bestimmung des Wärmeübergangs durchströmter Metallschäume sind folgende:

Metallschaum:

- Porendichte  $\gamma$  in ppi (**p**ores **p**er **i**nch)
- relative Dichte  $\rho^* = \frac{\rho_{MS}}{\rho_M}$   
( $\rho_{MS}$  – Dichte des Metallschaums in kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_M$  – Dichte des Metalls in kg/m<sup>3</sup>)
- die Stegdicke  $d$  (mm) und der glw. Porendurchmesser  $d_{gl}$  (mm) (zu berechnen [1])
- Geometrie und Design der Wärmekontaktfläche

Vorgaben Fluid:

- Dichte  $\rho$  (m<sup>3</sup>/kg)
- kinematische Zähigkeit  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s)
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (W/ m K)
- freie Anströmgeschwindigkeit  $c$  (m/s)
- spezifische Wärmekapazität  $c_p$  (J/[kg K])
- Temperaturleitfähigkeit  $a$  in m<sup>2</sup>/s

Die daraus zu berechnenden Werte sind:

- die strukturbezogene Reynoldszahl  $Re_{MS}$
- die strukturbezogene Nusseltzahl  $Nu_{MS}$
- der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  in W/(m<sup>2</sup> K)

## Designkriterien

Die Verbindung zwischen Metallschaum und der Wärmeübertragerfläche beeinflusst den Wärmeübergang und die effektive Wärmeleitung in Metallschäumen maßgebend.

Entsprechend dieser Erfahrung werden Verbindungen zwischen der Wärmekontaktfläche und dem Metallschaum wie folgt klassifiziert (s. Bild 1) und bewertet.

- miteinander verlötet
- miteinander vergossen
- miteinander verklebt
- keine feste Verbindung

Weitere zu berücksichtigende Designmerkmale sind:

- die Metallschaumhöhe über der Wärmekontaktfläche ( $h_{MS}$  in m)
- das Material der Wärmekontaktfläche
- die Porendichte und relative Dichte des Metallschaums.



Bild 1: Metallschaumproben: Kupferplatte mit Aluminiumschaum verlötet (links) und Aluminiumplatte und Aluminiumschaum aus einem Guss (rechts) als Wärmeübertragerflächen.

## Modellbeschreibung zur Bestimmung des Wärmeübergangs

Gemäß der beschriebenen Designmerkmale wird eine Kennzahlgleichung zur Bestimmung der strukturbezogenen Nusselt-Zahl  $Nu_{MS}$  definiert. Das prinzipielle Modell zum Wärmeübergang durchströmter offenporiger Metallschäume skizziert Bild 2.

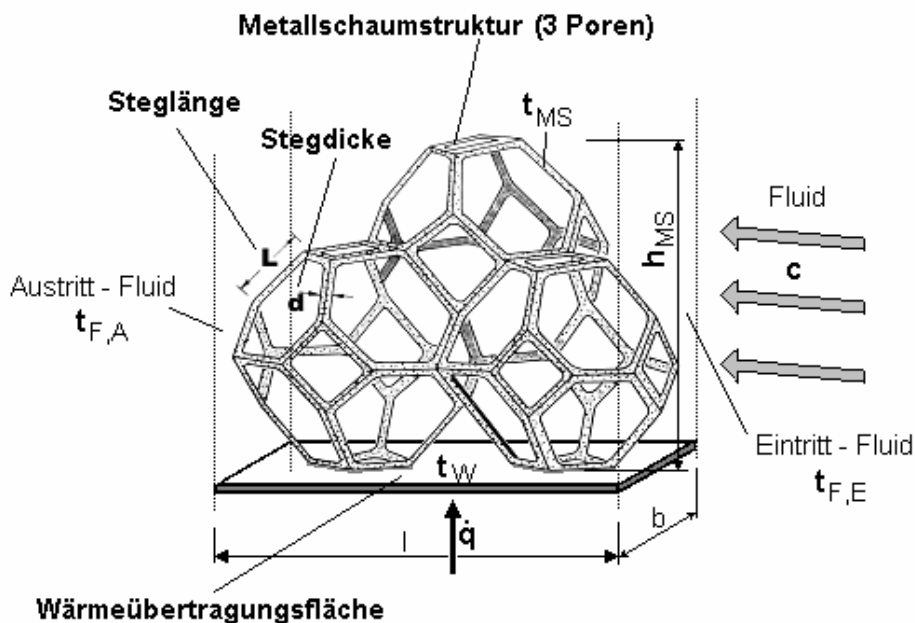


Bild 2: Wärmebilanz in der Metallschaumstruktur

Über die Wärmebilanz berechnet sich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  nach (1).

$$\alpha = \rho_{F,E} \cdot c \cdot c_{p,L} \cdot \frac{t_{F,A} - t_{F,E}}{\Delta\Theta_{\log}} \cdot \frac{A_{MS,Anstr.}}{A_{WÜ}} \quad (1)$$

Die logarithmische Temperaturdifferenz wird gemäß (2) definiert [6].

$$\Delta\Theta_{\log} = \frac{(t_W - t_{F,E}) - (t_W - t_{F,A})}{\ln\left(\frac{t_W - t_{F,E}}{t_W - t_{F,A}}\right)} \quad (2)$$

In Anlehnung der Bestimmung des Wärmeüberganges durchströmter Haufwerke kann folgender allgemeiner Ansatz für Metallschaumstrukturen formuliert werden.

$$Nu_{MS} = f_A \cdot f_h \cdot \sqrt{Nu_t^2 + Nu_l^2} \quad (3)$$

$$\text{mit: } Nu_t = \frac{0,037 \cdot Re_{MS}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_{MS}^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

$$Nu_l = 0,644 \cdot Re_{MS}^{0,5} \cdot Pr^{(1/3)} \quad (5)$$

$$f_A = \frac{1}{C_1 \cdot Pe_{MS}^{C_2} + C_3} \quad (6)$$

$$f_h = \left(1 - \frac{|h_{MS} - 0,02|}{h_{MS}}\right)^{0,5 \cdot \rho^*} \quad \text{gültig für } h_{MS} > 0,01 \text{ m; } h_{MS} \text{ in m} \quad (7)$$

Der Ansatz nach (3) ist gemäß [6] allgemeiner Standard für durchströmte Systeme. Die Faktoren  $f_A$  und  $f_h$  sind spezifisch für den Aluminiummetallschaum und berücksichtigen die maßgebenden konstruktiven Einflussgrößen. Die Kennzahlen Nusselt-, Reynolds-, Prandtl- und Péclet-Zahl für den Metallschaum werden wie folgt berechnet.

$$Nu_{MS} = \frac{\alpha \cdot d_{gl,MS}}{\lambda} \quad (\text{Strukturbezogen}) \quad (8)$$

$$Re_{MS} = \frac{c \cdot d_{gl,MS}}{(1 - \rho^*) \cdot \nu} \quad (\text{Strukturbezogen}) \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{Fluidbezogen}) \quad (10)$$

$$Pe = Re_{MS} \cdot Pr \quad (11)$$

Die Kennzahlen erfassen die Wechselwirkung zwischen der Metallschaumstruktur und dem durchströmenden Fluid. Die wesentlichen Strukturparameter Porendichte und relative Dichte sind über die Definition des gleichwertigen Durchmessers nach (12) [1] in der Nusselt- und Reynoldszahl in Verbindung mit den Stoffwerten des Fluids enthalten. Die Prandtl-Zahl ist eine reine Stoffgröße. Mit der Nutzung der Péclet-Zahl vereinigen sich alle maßgebenden Stoffwerte des Fluids mit den kinematischen Gegebenheiten und den Strukturparametern des Metallschaums in einer Kennzahl.

$$d_{gl,MS} \approx \left(\frac{1}{\rho^*} - 1\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,0254 \text{ m}}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{\rho^* \cdot 2,244}{\pi}} \quad (12)$$

Die Faktor  $f_A$  berücksichtigt den Einfluss der Art und Weise der Anbindung der Wärmekontaktfläche an den Metallschaum. Er wird im Weiteren Anbindungsfaktor genannt.

Diese Einflussgröße ist im Falle einer festen Anbindung nahezu unabhängig von der Porendichte.

Der Anbindungsfaktor kann als Funktion der Péclet-Zahl beschrieben werden (s. Diagramm 1). Für die Konstanten  $C_1$  bis  $C_3$  gelten die Werte gemäß Tabelle 1. Die Wahl dieser Konstanten gestattet eine allgemeine mathematische Beschreibung für alle untersuchten Anbindungsarten der WÜ-Fläche an den Metallschaum. Das gilt sowohl für die nahezu lineare Abhängigkeit sobald eine WÜ-Fläche fest mit dem Metallschaum verbunden ist ( $C_2 = 1$ ) als auch für die potentielle Abhängigkeit bei Metallschäumen ohne feste Anbindung ( $C_2 \neq 1$ ). Allgemein gilt, je besser die Anbindungsform für die wärmetechnische Nutzung ist, um so kleiner wird die Konstante  $C_1$ .

Für die festen Anbindungsformen ist noch ein Grenzwert zu berücksichtigen, welcher von der Metallschaumhöhe abhängt. Für  $Pe < Pe_{Grenz}$  beeinflusst der Metallschaum mit seiner Eigenwärme (Strahlung) die Temperaturzustände des Fluids in der Zu- und Abströmebene, weil der Fluidstrom durch den Metallschaum zu klein ist. Diese Eigenheit wird um so wirksamer, je kleiner die Anströmfläche bzw. die Höhe des Metallschaums ist. Der Grenzwert liegt bei Metallschaum mit 10 und 20ppi bei ca. 10 – 15mm.

Diagramm 2 zeigt den Verlauf von  $Pe_{Grenz}$  in Abhängigkeit der Metallschaumhöhe. Abgeleitet aus Messungen, kann der Grenzwert der Péclet-Zahl mit der Beziehung (13) abgeschätzt werden.

Diese Aussage gilt ausschließlich für die Durchströmung von Metallschaumstrukturen. Bei der Umströmung der Struktur sind Metallschaumhöhen kleiner 10 mm über der Wärmekontaktfläche zur Verbesserung des Wärmeüberganges im allgemeinen vorteilhaft.

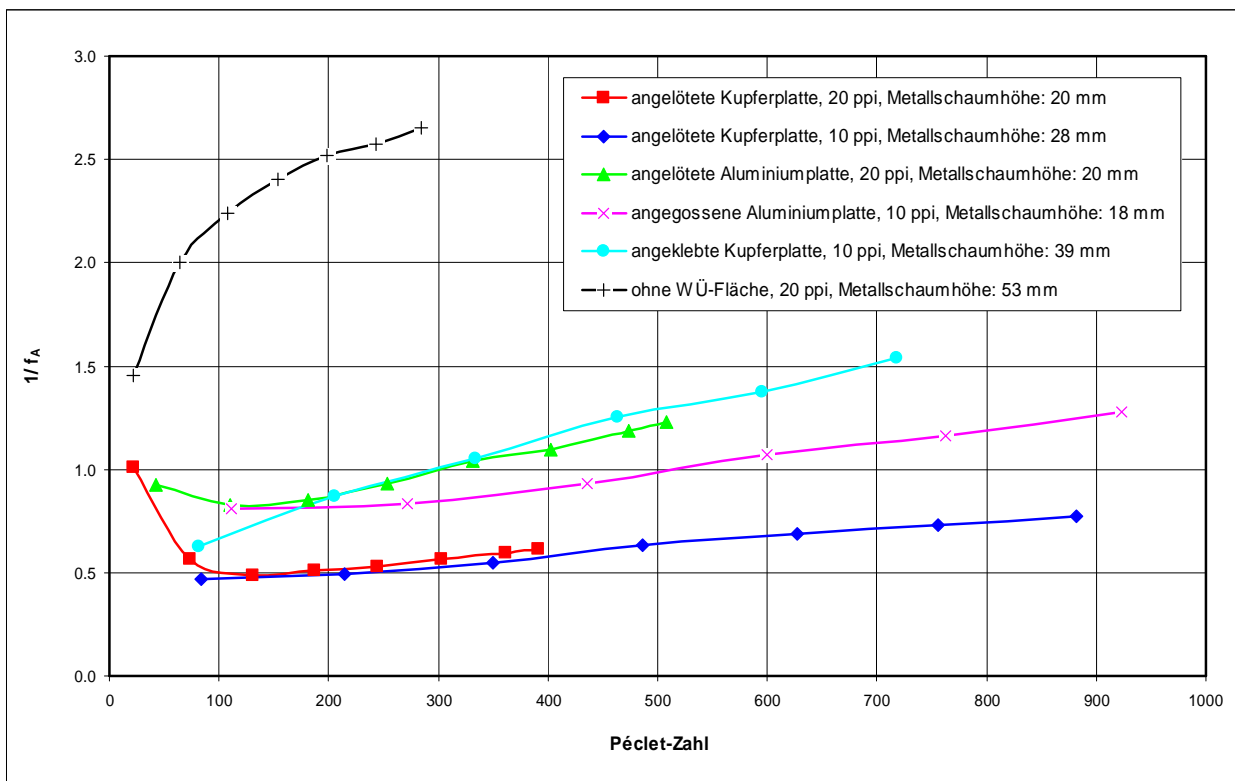


Diagramm 1: Abhängigkeit des so genannten Anbindungsfaktors von der Péclet-Zahl für verschiedene Anbindungen von WÜ-Flächen an den Metallschaum.

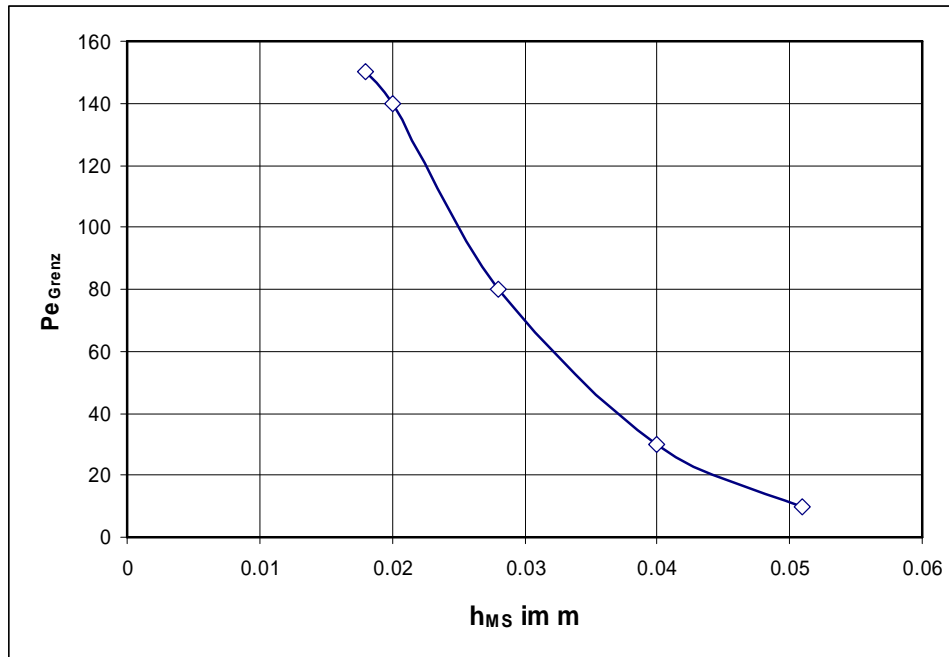


Diagramm 2: Die Grenz-Péclet-Zahl  $Pe_{Grenz}$  als Funktion der Metallschaumhöhe  $h_{MS}$ .

$$Pe_{Grenz} \approx 725 \cdot e^{-82 \cdot h_{MS}} \quad h_{MS} \text{ in m} \quad (13)$$

Anbindung	$C_1$		$C_2$		$C_3$		Bemerkung
	$Pe < Pe_{Grenz}$	$Pe \geq Pe_{Grenz}$	$Pe < Pe_{Grenz}$	$Pe \geq Pe_{Grenz}$	$Pe < Pe_{Grenz}$	$Pe \geq Pe_{Grenz}$	
Verlötet mit Kupferplatte	3,5	0,0004	-0,40	1,0	0	0,42	Kupferplatte bis zu 3 mm dick
Verlötet mit Aluminiumplatte	3,5	0,0012	-0,32	1,0	0	0,65	Aluminiumplatte 3 mm dick
Vergossen (Aluminiumplatte)	3,5	0,0007	-0,32	1,0	0	0,65	Aluminiumplatte 3 mm dick
Verklebt mit Kupferplatte	3,5	0,0014	-0,35	1,0	0	0,50	keine geschlossene wärmeleitende Kleberschicht zw. Fläche und Metallschaum (Lufteinschlüsse!)
ohne Verbindung (20 ppi)	0,72		0,23		0		
ohne Verbindung (10 ppi)	0,15		0,45		0		

Tabelle 1: Konstanten für die Bestimmung des so genannten Anbindungsfaktors  $f_A$  (6).

Der Faktor  $f_h$  erfasst den Einfluss der Metallschaumhöhe über der Wärmeübertragerfläche. Diese im Weiteren als Höhenfaktor bezeichnete Größe berücksichtigt die Erfahrung, dass mit ca. 20 mm hohen Metallschäumen die besten Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden. Deren Berechnung nach (7) ist gültig für eine Metallschaumhöhe größer als 10 mm. Für kleinere Metallschaumhöhen beträgt dieser Faktor 0,8.

## Vergleich mit Messergebnissen und Schlussfolgerungen

Je dichter der Metallschaum (steigende Porendichte) um so besser werden die Wärmeleiteigenschaften aber um so höher wird auch der Druckverlust. Ein gutes Optimum sind Metallschäume mit einer Porendichte bis zu 20 ppi, die mit einer maximalen Geschwindigkeit von 3 m/s angeströmt werden.

Im Weiteren werden Probenbezeichnungen genutzt, aus denen die markanten Bewertungsgrößen direkt abgelesen werden können. Die allgemeine Bezeichnung „Pr\_a\_b\_c\_d“ hat folgende Bedeutung:

- a – Abkürzung für die Anbindung der Wärmekontaktfläche
  - oA: ohne Anbindung, kK: verklebte Kupferplatte, gA: gegossene Aluminiumplatte
  - IA: verlötete Aluminiumplatte, IK: verlötete Kupferplatte
- b – Angabe für die Porendichte in ppi
- c – Angabe der Metallschaumhöhe in mm
- d – Angabe der relative Dichte in %

Diagramm 3 zeigt eine ausreichend gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten strukturbezogenen Nusselt –Zahlen. Die Abweichungen der berechneten Werte (durchgezogene Linien) liegen praktisch im Messfehlerbereich der gemessene Werte (Symbole mit Fehlerband).

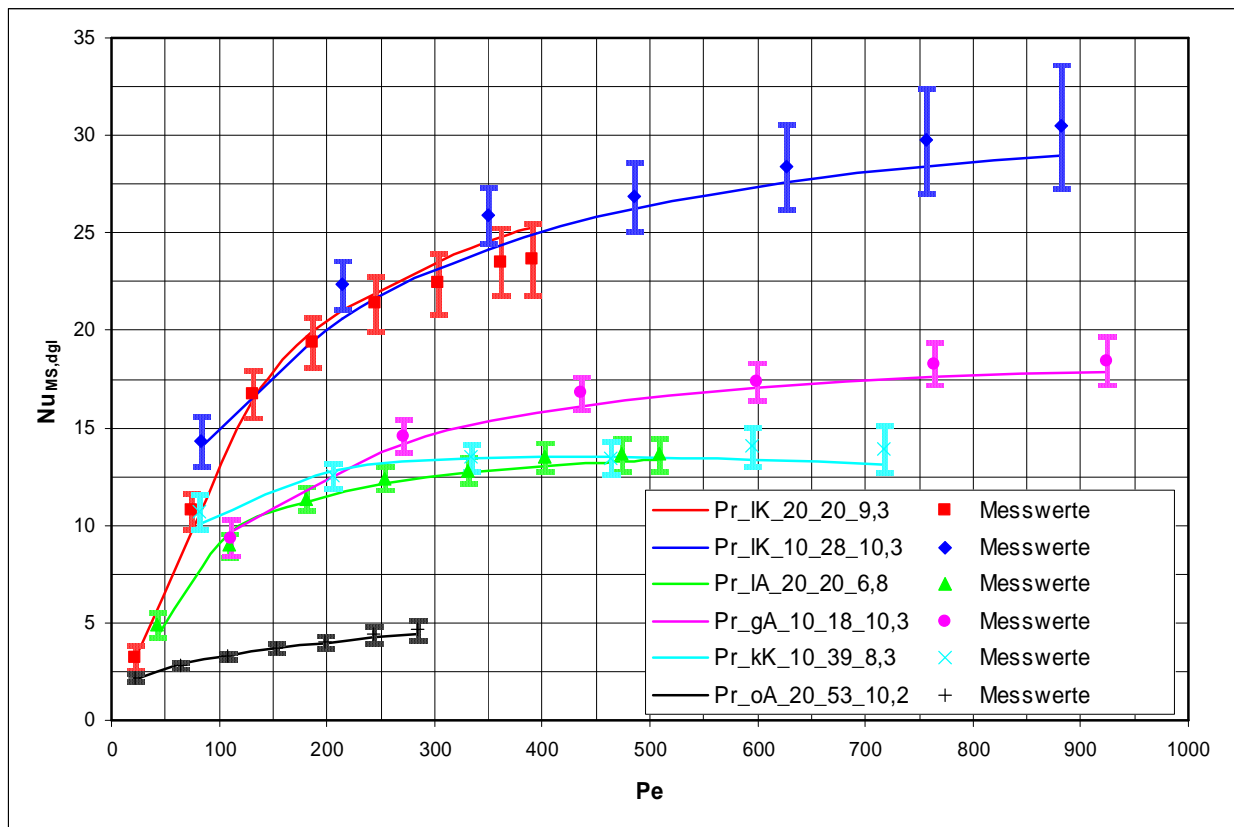


Diagramm 3: Gemessene und mittels Kennzahlgleichung berechnete Nusselt Zahlen (strukturbezogen) für verschiedene Metallschäume in Abhängigkeit der Péclet-Zahl.

Die Bewertung der Wärmeübergangseigenschaften in Abhängigkeit konstruktiver Vorgaben ermöglicht das folgende Diagramm 4. Mit einem Aluminiummetallschaum mit einer Porendichte von 20 ppi, einer Metallschaumhöhe von 18 mm und einer relativen Dichte von ca. 10 % werden hier die besten Werte erreicht, wenn eine Lötverbindung mit einer 3 mm starken Kupferplatte realisiert wird.

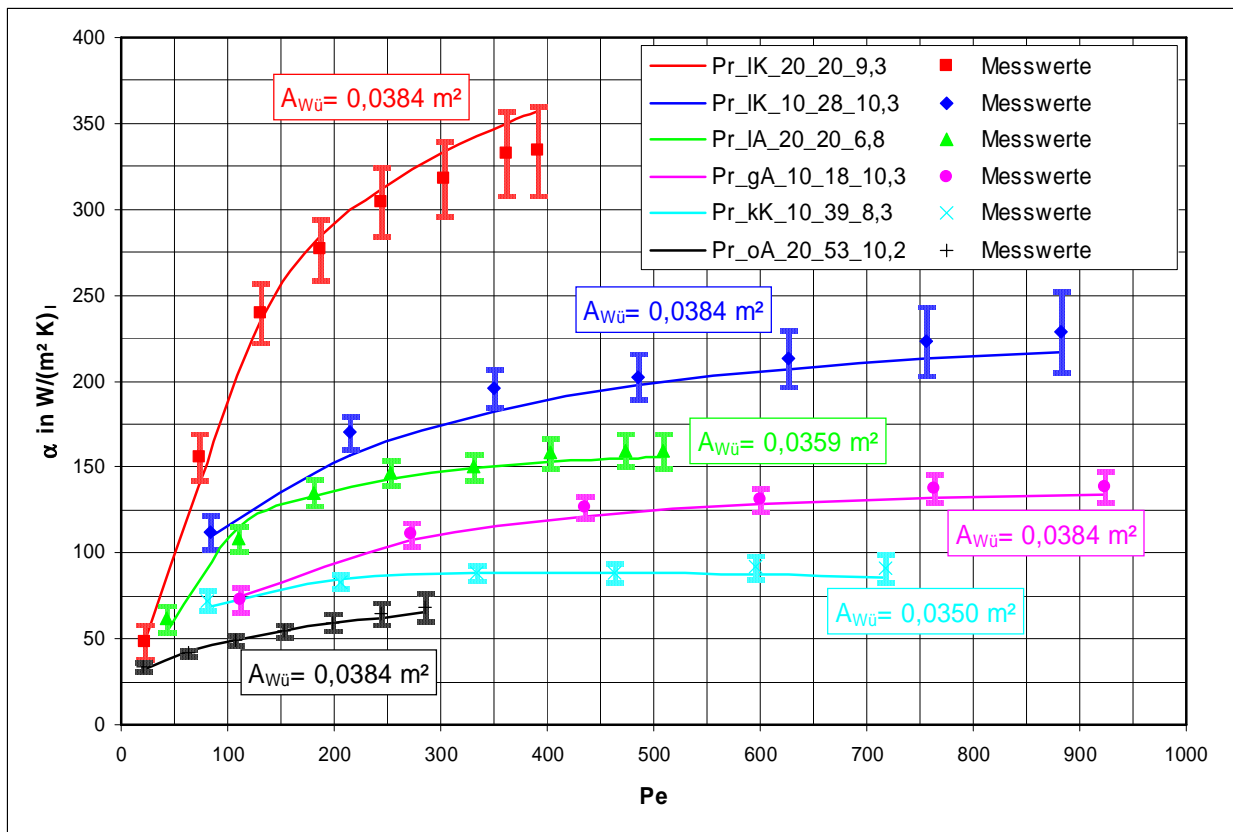


Diagramm 4: Gemessene und berechnete mittlere Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Metallschäume in Abhängigkeit der Péclet-Zahl.

### Metallschaumanwendung für die Kühlung mittels Wärmerohr

Im Bild 3 sind drei verschiedene Ausführungen eines PC-Wärmerohres („Igel“-; „Metallschaum“- und „Bügel“-Konstruktion) abgebildet. Am Fuß der Wärmerohre wird die abzuführende Wärme mit Hilfe einer Heizung simuliert. Die Fußtemperatur unterhalb dieser Wärmerohre ist ein Maß für die Kühlwirkung bei verschiedenen Heizleistungen. Die Wärmerohre wurden mit einer Geschwindigkeit von ca. 1,5 m/s angeströmt.



Bild 3: Konstruktionen von Wärmerohren;  
Links: Igelkonstruktion; Mitte: Metallschaumkonstruktion; Rechts: Bügelkonstruktion

Die Metallschaumkonstruktion verfügt in beiden Messungen über die beste Kühlleistung (s. Diagramm 5). Die Ergebnisse der 1. Messung der Metallschaumkonstruktion wurden mit ca.

30% mehr Kältemittelfüllung als bei den Vergleichswärmerohren erreicht. Nach Reduzierung der Füllmenge auf das Niveau der Vergleichswärmerohre verbesserte sich die Kühlleistung in Form geringerer Fußtemperaturen gemäß der 2. Messung.

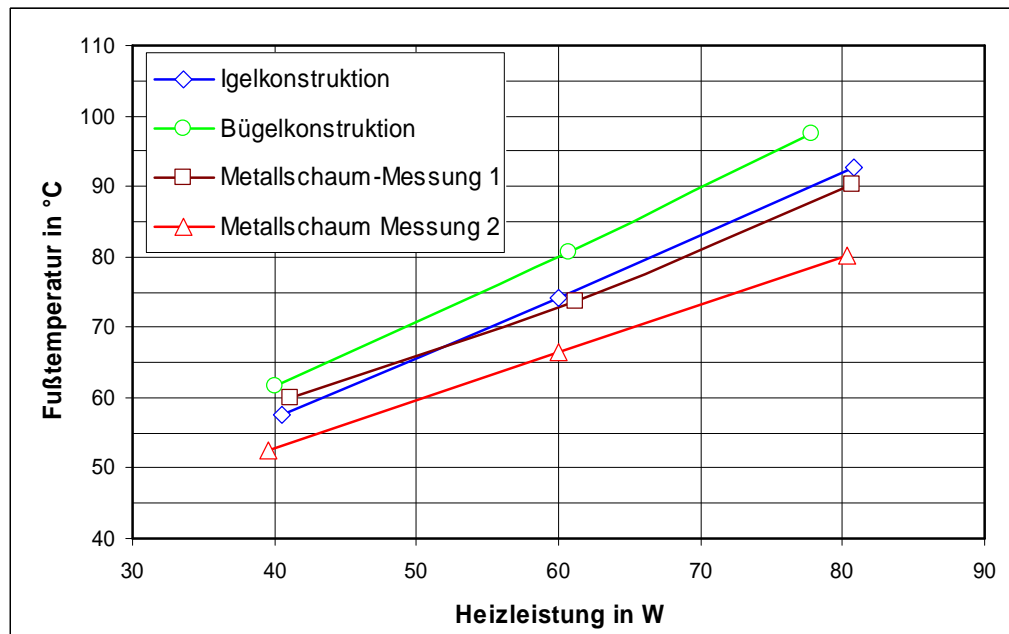


Diagramm 5: Fußtemperaturen für Wärmerohre verschiedener Konstruktionen als Funktion der Heizleistung.

### Zusammenfassung

Der Wärmeübergang durchströmter Metallschaumstrukturen ist in Abhängigkeit der maßgebenden Parameter mit ausreichender Genauigkeit auf Basis der Kennzahlgleichung für die Nusselt-Zahl berechenbar. Die dabei zu berücksichtigenden Einflussparameter sind die Art und Weise der Anbindung des Metallschaums an die Wärmekontaktfläche, die Metallschaumhöhe über der Wärmekontaktfläche und die Strukturparameter Porendichte und relative Dichte. Mit Einführung der so genannten Anbindungs- und Höhenfaktoren können diese Parameter mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden.

Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene untersuchte Metallschaumkonfigurationen mit einer Porendichte von 10 und 20 ppi führen zu guten Übereinstimmungen im Rahmen der Messgenauigkeit. Die Beste Konfiguration im Sinne der Wärmeübertragung ist ein mit einer 3 mm starken Kupferplatte verlöteter Metallschaum mit einer Porendichte von 20 ppi.

Mit dem hier vorgestellten Lösungsalgorithmus zur Bestimmung des Wärmeüberganges durchströmter Metallschäume und dem in [1] beschriebenen Lösungsansatz zur Berechnung des Druckverlustes stehen nunmehr die maßgebenden Werkzeuge zur wärme- und strömungstechnischen Auslegung solcher Bauteile für den praktischen Einsatz zur Verfügung.

Vergleichende Untersuchungen mit möglichen Konstruktionen von Wärmerohren für die Kühlung elektronischer Bauteile geringer Abmessung zeigen, dass der Metallschaum als oberflächenvergrößernde Struktur eine vorteilhafte Alternative ist.

## Literaturen

- [1] Dr. rer. nat. D. Girlich, Dr.-Ing. K. Hackeschmidt, Dipl.-Ing. C. Kühn  
Berechnung des Druckverlustes für offenporige Metallschäume  
Zeitschrift Konstruktion 4-2004, S. 79-82
- [2] Dr. Ing. K. Hackeschmidt  
Grundsatzuntersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in Luft- und  
Kältetechnik  
Zwischenbericht des ILK Dresden ILK-B-31/04-3043  
Februar 2004
- [3] Dr. rer. nat. D. Girlich, Dr.-Ing. K. Hackeschmidt, Dipl.-Ing. C. Kühn  
Mechanische Kenndaten offenporiger Aluminiumschäume  
Zeitschrift Konstruktion voraussichtlich 9-2004
- [4] A. Bhattacharya, R.L. Mahajan  
Finned Metal Foam Heat Sinks for Electronics Cooling in Forced Convection  
Journal of Electronic Packaging, September 2002, Vol. 124
- [5] A.-F. Bastawros; A.G. Evans  
Characterisation of open-cell Aluminium alloy foams as heat sinks for high power  
electronic devices  
EEP-Vol. 23/ HTD-Vol.356, CAE/Cad and Thermal Management Issues in Electric  
Systems ASME 1997
- [6] Verein deutsche Ingenieure  
VDI-Wärmeatlas  
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1988, 5. Auflage
- [7] Dr.-Ing. K. Hackeschmidt  
Grundsatzuntersuchungen zum Einsatz offenporiger Metallschäume in der Luft- und  
Kältetechnik  
Zwischenbericht des ILK Dresden ILK-B-31/03-3000  
Dresden August 2003
- [8] Prof. U. Franzke; Dr.-Ing. D. Girlich  
Advanced Engineering Materials 2001, 3, No. 6, 351, MetFoam Special
- [9] L. J. Gibson, M. F. Ashby,  
Cellular Solids, Structure and Properties  
Cambridge University Press 1999, 2. Auflage