

Messtechnische Charakterisierung geschlossenzelliger Aluminiumschaumstrukturen

Rico Schmerler, Dr.-Ing. Jan Bräunig, Eric Hensel

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,

E-Mail: rico.schmerler@iwu.fraunhofer.de

Einleitung

In zahlreichen Baugruppen bis hin zu Gesamtfahrzeugen sind heutzutage zusätzliche Dämpfungselemente verbaut, um bspw. die akustische Güte zu verbessern. Unter diesem Aspekt sind gerade Metallschaumkomponenten prädestiniert, um bei geringer Masse und hoher Steifigkeit zusätzlich die Systemdämpfung zu erhöhen. Entsprechend gibt es bereits erste Anwendungen von Metallschaumkomponenten in Werkzeugmaschinen, wo solche Materialstrukturen sehr werkzeugnah eingesetzt werden. Durch die Infiltration von Phasenwechselmaterial (PCM, hier Paraffin) in diese Schaumstrukturen lassen sich zusätzlich einstellbare thermische Funktionalitäten abbilden, wie beispielsweise die Speicherung überschüssiger Wärmeenergie. Aus diesem Grund, den hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten, Gewichtsvorteilen sowie verbesserten Dämpfungseigenschaften stehen diese PCM-Aluminiumschaummaterialien aktuell im Fokus der Entwicklung von Elektrofahrzeugkomponenten, wie Batteriegehäusen und Unterbodenbauteilen. Für diese Baugruppen gelten besonders hohe Anforderungen hinsichtlich Crashesicherheit und Thermomanagement.

Aus diesen beiden Anwendungsfällen lässt sich bereits ableiten, dass es generell wünschenswert wäre, die Eigenschaften des Schaumwerkstoffs anwendungsgerecht einzustellen. Darauf basierend wurden am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Aluminiumschaumproben (Al-Schaumproben) unterschiedlicher Dichte, respektive Porosität, hergestellt, die zum einen aus reinem Schaum und zum anderen aus Schaumsandwiches mit metallischen Decklagen sowie Aluminiummassivmaterial (AAS) bestehen. Weiterhin wurden, mit dem Ziel deren modale Eigenschaften zu beeinflussen, Proben mit PCM infiltriert, um zusätzliche Einstellungsmöglichkeiten der Werkstoffparameter aufzuzeigen. Konkret wird in diesem Beitrag auf die modalen Untersuchungen an diesbezüglichen Proben eingegangen. Insbesondere die Messung und die Durchführung stehen im Fokus. Final werden die messtechnisch ermittelten Eigenschaften Ergebnissen erster Modellierungsstrategien gegenübergestellt.

Anwendungsbeispiele

Metallschäume weisen eine 5- bis 10-fach höhere Dämpfung auf als Massivmaterialien [1]. Der Einsatz von Al-Schaum zur Verbesserung akustischer Eigenschaften wurde in [2] an einem Motorblock sowie an einer Ölwanne nachgewiesen. Für diese Ölwanne konnte zugleich eine signifikante Massereduktion erzielt werden. Im industriellen Serieneinsatz werden Al-Schäume bereits in Werkzeugmaschinenschlitten, um durch deren Dämpfungswirkung in Kombination mit Leichtbaupotential die Produktivität und Bearbeitungsqualität zu steigern, angewendet [3]. Al-Schaum eignet sich besonders als Kernwerkstoff von Sandwichverbunden. Neben guten

Dämpfungseigenschaften zeichnen sich diese Werkstoffe durch eine hohe spezifische Steifigkeit und ein hohes Energieabsorptionsvermögen aus. Für Anwendungen, die ein hohes Maß an Funktionsintegration erfordern, sind AAS daher besonders prädestiniert. So wurde der Einsatz von AAS auch für Unterbodenstrukturen in Elektrofahrzeugen untersucht, bei denen zusätzlich zu bisher genannten Vorteilen von AAS ergänzend die guten Brandschutzeigenschaften und die elektromagnetischen Abschirmungseigenschaften anwendungsrelevant sind [4]. Bisher sind den Autoren keine akustischen Untersuchungen von mit PCM infiltriertem Aluminiumschaum in der Literatur bekannt.

Fertigungs- und Probenbeschreibung

Grundlegend können geschlossenzellige Al-Schäume schmelzmetallurgisch oder pulvermetallurgisch hergestellt werden [3]. Einzig pulvermetallurgisch hergestellte geschlossenzellige Schäume lassen sich mit Fluiden, wie flüssigem PCM, infiltrieren, weshalb im Folgenden nur hierauf näher eingegangen wird. In einer Kavität wird mit Treibmittel versetztes Aluminiummaterial unter Temperatur in einem Ofen aufgeschäumt. Thermisch getriggert zersetzt sich das Treibmittel Titanhydroxid unter Abspaltung von Wasserstoff, wodurch das schmelzflüssige Aluminiummaterial seine Porenstruktur erhält. Die Kavität bestimmt unter Berücksichtigung der thermischen Dehnung die Endkontur der Proben. An der Schnittstelle zur Kavität entsteht eine dünne Aluminiumschicht. Zur Herstellung von AAS, das in Abbildung 1 dargestellt ist, werden zwei Aluminiumbleche in einem definierten Abstand zueinander im Schäumwerkzeug positioniert. Während des Schäumvorgangs verbindet sich das Aluminiumkernmaterial metallisch mit den Decklagen.

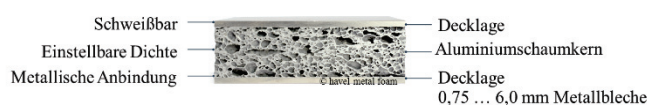


Abbildung 1: AAS-Sandwich

Die Infiltration der Poren mit PCM erfolgt mittels Druck, Vakuum oder Kombinationen aus beiden durch kleine Öffnungen in den Porenwandungen. Das verwendete PCM ist ein Paraffin mit einer Dichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$ im festen Aggregatzustand. Abbildung 2 zeigt eine nicht-infiltrierte und eine mit PCM infiltrierte AAS-Probe.

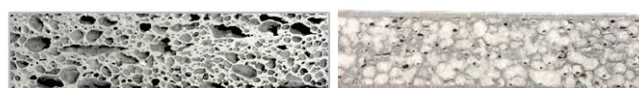


Abbildung 2: Aluminiumschaum (links) und mit PCM infiltriertes AAS-Sandwich (rechts)

Zur Variation des modalen Verhaltens wurden Al-Schaumproben unterschiedlicher Dichte erstellt, die zum einen aus reinem Schaum und zum anderen aus

Schaumsandwiches mit metallischen Decklagen von 2 mm Stärke bestehen. Die untersuchten Proben haben für beide Probentypen, Al-Schaum sowie AAS, die Dimensionen 300 x 200 mm² bei einer Tiefe von ca. 17 mm für Schaumproben und ca. 20 mm für AAS-Proben.

Die Probenbezeichnungen mit zugehöriger Probendichte finden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Probenbezeichnungen mit zugehöriger Probendichte und Infiltrationsgrad

Probentyp	Kurzbezeichnung	Dichte berechnet [g/cm ³]	Infiltrationsgrad [Masse-%]
Schaum	F1	0,50	40 ±2
	F2	0,50	
	F3	0,51	29
	F4	0,66	
AAS-Sandwich	A1	0,96	29 ±1
	A2	0,97	
	A3	0,97	12
	A4	1,19	

Für beide Probentypen wurden jeweils drei Proben für den Schaumdichtebereich um 0,5 g/cm³ und eine Probe im Schaumdichtebereich 0,7 g/cm³ hergestellt. Der Dichtebereich des AAS-Schaumkerns entspricht dabei dem der reinen Schaumproben. Der Infiltrationsgrad *I* errechnet sich nach Gleichung (1) aus dem Quotienten der infiltrierten Masse an PCM *m*_{PCM} und Probengesamtmasse *m*_{Probe}.

$$I = \frac{m_{PCM}}{m_{Probe}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

I ist in Masse-% angegeben und ist somit kein direktes Maß für den Anteil des infiltrierten Hohlraumvolumens. Bei gleicher Menge an PCM nimmt der Infiltrationsgrad nach Gleichung (1) mit zunehmender Schaumdichte und Decklagendicke ab. Das Hohlraumvolumen der Schäume sollte nicht über 85 Volumen-% mit PCM infiltriert werden, um eine thermische Ausdehnung des PCM beim Phasenwechsel zu ermöglichen.

Versuchsaufbau und experimentelle Ergebnisse

Die Erfassung der Systemantworten erfolgte im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen unter Verwendung eines 3D Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV). Für eine berührungslose und somit rückwirkungsfreie Erfassung von Oberflächenschwingschnellen einer Struktur in Kombination mit einer hohen Messpunktanzahl, welche in diesem Umfang mit Beschleunigungssensoren ohne Strukturbeeinflussung nicht erreicht werden kann (81 Scanpunkte), wurde das SLDV vom Typ PSV400-3D verwendet. Der grundlegende Testaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Proben wurden frei/frei mittels Federn in einem Hilfsrahmen gelagert. Um diese Randbedingung zu ermöglichen, wurden zuvor alle Proben mit Ø8 mm-Bohrungen in einem Abstand von jeweils 20 mm zum Probenrand versehen. Die Schwingungsanregung erfolgte mithilfe eines Modalhammers auf der

Probenrückseite an eigens ermittelter Stelle, um möglichst alle Schwingform im relevanten Frequenzbereich anzuregen.

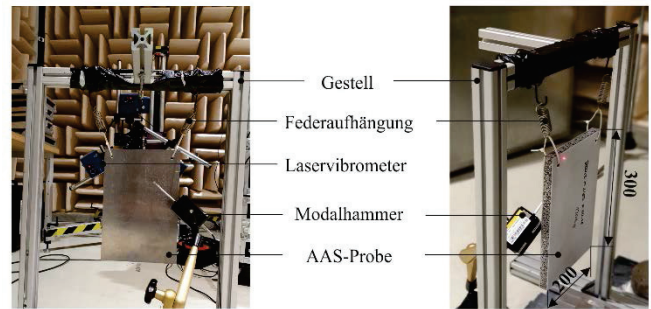


Abbildung 3: Versuchsaufbau an einer AAS-Probe

Die messtechnische Erfassung erfolgte im Halbfreifeldraum der Forschungsstelle IWU zur Minimierung externer Einflüsse. Um eine Vergleichbarkeit der Eigenfrequenzen (EF) verschiedener Proben zu ermöglichen, wurden die den EF-zugehörigen Schwingformen miteinander verglichen und zugewiesen, wobei die Ermittlung der Modalparameter mittels Curve-Fitting erfolgte. Als Maß bzgl. Probendämpfung wurden frequenzabhängig Verlustfaktoren bestimmt, die nachfolgend als Dämpfung bezeichnet werden. Für die folgenden Auswertungen wurden die EF 1 bis 8 des Schaumdichtebereichs 0,5 g/cm³ betrachtet. Die EF der AAS-Proben liegen deutlich über denen der Schaumproben, wie Abbildung 4 verdeutlicht. Dies entspricht den Erwartungen und ist in der höheren Steifigkeit der Sandwiches, bedingt durch die zusätzlichen Decklagen, begründet. Die Differenzen liegen in einem Bereich von 34 - 56 % mit leicht abfallender Tendenz für steigende Frequenzen. Signifikante Unterschiede in den EF zwischen infiltrierten und nicht-infiltrierten Proben sind innerhalb des Probentyps nicht erkennbar.

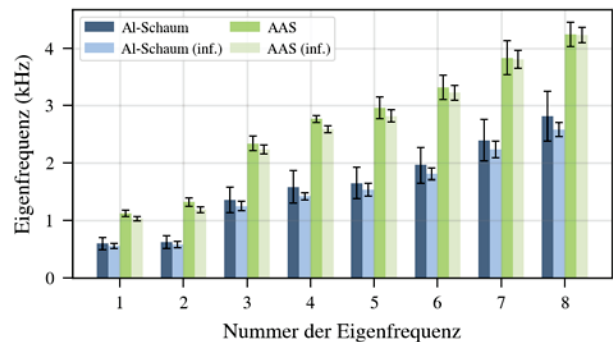


Abbildung 4: EF der Al-Schaum- und AAS-Proben in einem Schaumdichtebereich um 0,5 g/cm³ (vor und nach der Infiltration mit PCM)

Neben den EF liegt der Fokus nachfolgender Beschreibungen und Auswertungen auf den Dämpfungseigenschaften der Proben. In Abbildung 5 sind die Probendämpfungen im jeweiligen Frequenzbereich der EF 2-8 dargestellt. Für EF 1 konnte anhand der geringen Anzahl an Signalstützstellen des steilen Peaks im FFT-Spektrum keine verlässliche Kurvenanpassung erfolgen. Die EF und die zugehörige Schwingform konnten jedoch ermittelt werden. Ergänzende Untersuchungen mit einem Beschleunigungsaufnehmer und entsprechend längeren Messzeiten ermöglichen perspektivisch ebenfalls die Dämpfungsbestimmung von EF 1.

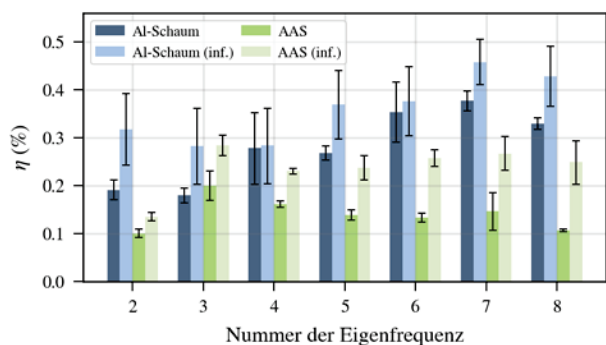


Abbildung 5: Verlustfaktoren von Aluminiumschäumen und AAS in einem Schaumdichtebereich um $0,5 \text{ g/cm}^3$ vor und nach der Infiltration mit PCM

Für den nicht-infiltrierten Zustand liegen die bestimmten Dämpfungswerte der Schäume über denen der AAS Proben, außer für EF 3. Die höhere Dämpfung metallischer Schäume gegenüber ihren Vollmaterialien wird in [5] vor allem mit dem Effekt der Mikroplastizität der Schäume erklärt. In [3] wird die erhöhte Energiedissipation mit der Reibung benachbarter Grenzflächen innerhalb der zahlreichen Risse der Schaumstruktur und der Vibration dünner Zellwände begründet, wobei die Dämpfung mit steigender Porosität linear ansteigt. Mit Ausnahme der EF 4 von Schäumen sind die Dämpfungen infiltrierter Proben deutlich höher, wobei der Unterschied mit zunehmender Frequenz tendenziell sinkt. Der Effekt abfallender Dämpfung von Al-Schaum mit zunehmender Frequenz wurde bereits in [6] beschrieben. Ergänzend ist zu erwähnen, dass die Dämpfung eine frequenzabhängige Größe ist und sich die EF von Schäumen und AAS stark unterscheiden. Aussagen zur Frequenzabhängigkeit der Dämpfungen anhand von Abbildung 5 sind daher nicht zulässig. Hierzu dienen Abbildungen 6-8, die zusätzlich Proben des Dichtebereichs $0,7 \text{ g/cm}^3$ und höhere EF berücksichtigen.

Abbildung 6 veranschaulicht, dass die Dämpfungen der Schaumproben für nahezu alle EF höher sind im Vergleich zu AAS. Dies kann mit dem größeren Schaumanteil an der Gesamtprobe begründet werden. Die Differenz der Dämpfungswerte ist für niedrige EF am größten und sinkt mit zunehmender Frequenz. Die Dämpfungswerte für Schäume sinken gegenüber den AAS-Probentypen tendenziell stärker ab. Der Einfluss unterschiedlichen Schaumdichten der Proben lässt sich dagegen nicht eindeutig bestimmen.

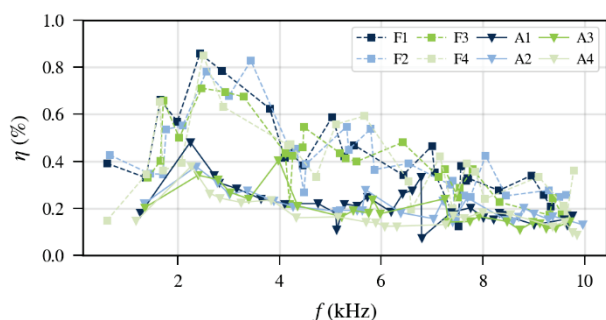


Abbildung 6: Verlustfaktoren von Aluminiumschaum- und AAS-Proben

Wie Abbildungen 7 und 8 zeigen, liegen die Dämpfungen für infiltrierte Schaumproben höher als bei infiltriertem AAS und nähern sich mit zunehmender Frequenz einander an. Die

Dämpfungen infiltrierter AAS-Proben liegen mit Ausnahme von A4 über denen der nicht-infiltrierten Proben, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Für die infiltrierten Proben A1 (inf) und A2 (inf) steigen die Dämpfungen tendenziell im betrachteten Bereich mit zunehmender Frequenz, wohingegen sie für nicht-infiltrierte Proben fallen. Probe A4 weist einen geringen Infiltrationsgrad auf, was die geringen Dämpfungsunterschiede begründet.

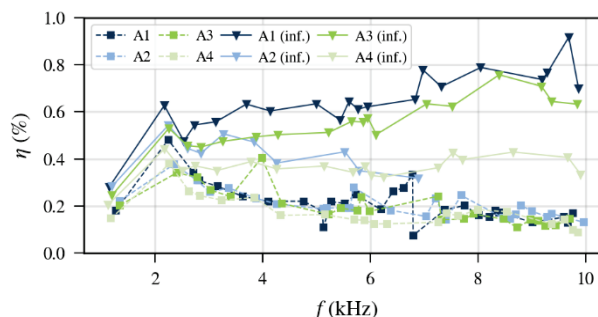


Abbildung 7: Verlustfaktoren nicht-infiltrierter und infiltrierter AAS-Proben

Infiltrierte Schaumproben weisen höhere Dämpfungswerte als nicht-infiltrierte auf; mit höheren Differenzen für zunehmende EF, siehe Abbildung 8.

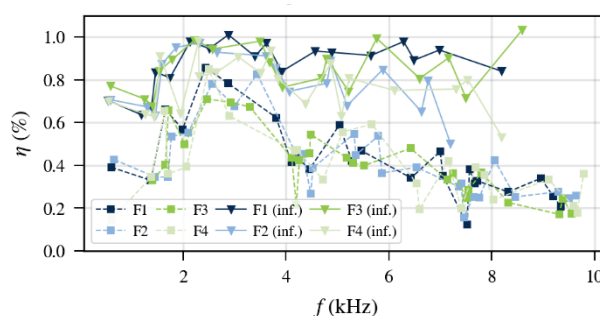


Abbildung 8: Verlustfaktoren nicht-infiltrierter und infiltrierter Aluminiumschaum-Proben

In pulvermetallurgisch hergestellten Schäumen sind Porenvolumina, Stegdicken und deren Position generell stochastisch verteilt. Für Proben gleicher Dichte, die eine gemittelte Größe über die gesamte Probe darstellt, können daher lokale Streuungen Unterschiede in modalen Parametern verursachen. Als zusätzliche Ursachen für streuende modale Eigenschaften sind die unterschiedlichen Infiltrationsgrade und die nicht definierte Verteilung des PCM in der Probe zu nennen. Ebenfalls untersucht wurden infiltrierte AAS-Proben mit PCM im flüssigen Aggregatzustand. Die hier nicht dargestellte Auswertung der Frequenzspektren deutet auf einen zeitinvarianten Zustand während der Messung hin. Die möglichen Ursachen sind die Aggregatzustandsänderung des PCM von flüssig auf fest und eine Änderung der PCM-Verteilung innerhalb der Proben. Ein aufgetretener Phasenwechsel während der Messung ist unwahrscheinlich, da die Proben durch einen Temperaturoffset von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ über der PCM-Schmelztemperatur entsprechend vorkonditioniert wurden und beim nachträglichen Entfernen der Isolierung schmelzflüssiges PCM ausgetreten ist. Wahrscheinlicher ist eine lokale Umverteilung des PCM innerhalb der Probe infolge von Gravitation und Diffusionsvorgängen. Die Temperierung der Proben erfolgte in horizontaler Position, während die Proben in vertikaler Position vermessen wurden.

Weitere Messungen zur Beurteilung des akustischen Verhaltens mit flüssigem PCM unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse werden angestrebt.

Gegenüberstellung von Messung und Simulation

Auf Basis der experimentellen Messdaten erfolgt anhand der bestimmten EF und ermittelten Schwingformen eine Gegenüberstellung mit der Simulation (Model-Updating). Aus dem Vergleich der Schwingformen resultiert, dass bei der Simulation der Al-Schaumproben die fertigungsbedingte Al-Haut, die sich an der Kavitätsoberfläche ausbildet, modelliert werden muss. Anderenfalls sind die Schwingformen teilweise vertauscht.

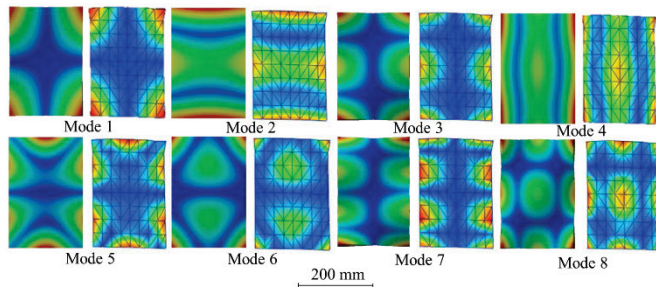


Abbildung 9: Vergleich der Schwingformen aus Simulation und experimentellen Untersuchungen (Messraster) für die Moden 1-8

Die numerische Bestimmung der Eigenfrequenzen sowie zugehöriger Schwingformen erfolgte unter Verwendung von ANSYS. Die folgenden Untersuchungen konzentrieren sich exemplarisch auf die Proben F2 und A2. Diese wurden jeweils entsprechend derer äußeren exakten geometrischen Abmessungen nachmodelliert. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden die Variablen E-Modul des Aluminiumschaums im infiltrierten sowie nicht infiltrierten Zustand, der Sandwichdecklagen und der dünnen Aluminiumschicht bei reinen Schäumen variiert. Der Schaum wurde als homogenisiertes und isotropes Vollmaterial modelliert.

Der Abgleich von Messung zu Simulation zwischen simulierten und experimentell ermittelten EF 1-8 von F2 und A2 für den mit PCM infiltrierten und nicht-infiltrierten Zustand aus Tabelle 2 zeigt gute Übereinstimmungen im Bereich von 0-5 %.

Tabelle 2: Vergleich zwischen simulierten und experimentell ermittelten EF 1-8 von F2 und A2 für den mit PCM infiltrierten und nicht-infiltrierten Zustand in %

Probenbez.	EF 1	EF 2	EF 3	EF 4	EF 5	EF 6	EF 7	EF 8
F2	0,4	7,8	-0,7	-6,6	2,8	-1,7	0,2	-3,8
F2 infiltriert	-0,1	5,3	0,2	-3,3	2,9	-1,4	0,5	-0,8
A2	0,5	-0,8	0,7	0,1	-1,0	-0,8	0,0	0,8
A2 infiltriert	-1,6	-3,5	-0,2	-1,8	-0,4	-1,1	1,4	2,0

Erhöhte Abweichungen zeigen sich probenübergreifend in EF2 und für Schaumproben. Als Ursachen hierfür sind die Annahme der Schaumhomogenität über das gesamte Schaumvolumen, die Decklagendickenkonstanz sowie die

simulativ nicht berücksichtigte Porosität in der dünnen Aluminiumhaut zu nennen. Porengrößen und Stegdicken sind über das Schaumvolumen statistisch verteilt und unterliegen fertigungsbedingt teilweise einer Gradierung.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Übertragungsfunktionen von Al-Schaum- und AAS-Proben im nicht infiltrierten und mit PCM infiltrierten Zustand wurden mittels SLDV gemessen. Anschließend erfolgte die Bestimmung der modalen Eigenschaften Dämpfung bzw. Verlustfaktor, EF und deren zugehörige Schwingformen durch Curve-Fitting sowie eine Gegenüberstellung experimenteller Ergebnisse mit ersten simulativen Modellierungsansätzen für ausgewählte Proben. Für Al-Schaum- und AAS-Proben wurden Dämpfungen im Bereich 0,1-0,9 % bestimmt. Eine Dämpfungserhöhung durch die Infiltration mit PCM wurde für alle Proben festgestellt. Mit zunehmender Frequenz wurde bei nicht-infiltrierten Proben ein sinkendes Dämpfungsvermögen beobachtet, wohingegen bei infiltrierten Proben keine Frequenzabhängigkeit festgestellt werden konnte.

Zusammenfassend stellen PCM-infiltrierte Al-Schäume Werkstoffverbunde mit großem Potential dar, um über eine Vielzahl an Parametern eine anwendungsgerechte Einstellung akustische Eigenschaften zu realisieren. Künftig gilt es diese Parameter gezielt einzustellen. Die Werkstoffe zeichnen sich durch ein hohes Maß an Funktionsintegration, einschließlich gutem Dämpfungsvermögen aus. Potentielle Anwendungen sind bspw. Batteriegehäusekomponenten in Elektrofahrzeugen, Werkzeugmaschinenkomponenten, Maschinenelemente wie Zahnräder und Wohnraumstrukturen.

Für die Bestimmung modaler Eigenschaften infiltrierter Proben mit PCM im schmelzflüssigen Zustand sind weitere Untersuchungen mit optimiertem Versuchsrandbedingungen erforderlich. In zukünftigen Untersuchungen werden Beschleunigungsaufnehmer für die Dämpfungsbestimmung niedriger Frequenzen genutzt.

Literatur

- [1] Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N., G.: Metal Foams: a Design Guide, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 2000
- [2] Höfler, D.; Pribsch, H. H.; Rust, A. Brandl, F. K.: Geräuschreduktion von Motorbauteilen durch hochdämpfende Werkstoffe, Graz, 2006
- [3] Hipke T., Lange G., Poss R.: Taschenbuch für Aluminiumschäume, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 1. Auflage 2007
- [4] Schmerler, R.: Aluminum Foam Sandwich Battery housing for electric cars, European Electric Vehicle Batteries Summit ACI, Berlin, 2019
- [5] Golovin I.S., et.al. Damping in some cellular metallic materials due to microplasticity, Materials Science and Engineering, S. 531–536, 2002
- [6] Klan S., et.al.: Aluminiumschaum zur Verbesserung der Akustik und des Crashverhaltens, ATZ Journal 10/2017