

Passives Konzept zur Schwingungsreduktion mittels partiell gefüllter Wabenstrukturen

Sebastian Koch¹, Fabian Duvigneau¹, Ryan Orszulik², Ulrich Gabbert¹, Elmar Woschke¹

¹ *Institut für Mechanik, 39106 Magdeburg, E-Mail: sebastian.koch@ovgu.de*

² *School of Engineering and Applied Sciences, 02138 Cambridge*

Einleitung

Bei der Entwicklung neuer Kraftfahrzeuge unternehmen Automobilhersteller immer größere Anstrengungen, um die emittierten Geräusche zu reduzieren und an die Wünsche der Kunden anzupassen, um so deren Kaufentscheidung zu beeinflussen [1]. Aber auch Normen und gesetzliche Richtlinien zwingen die Entwickler, den Fokus stärker auf die Verbesserung der akustischen Eigenschaften zu legen [2]. In der vorliegenden Arbeit wird ein passives Konzept zur Schwingungs- und Schallreduktion vorgestellt, das die hohe Steifigkeit von Wabenstrukturen und die guten Dämpfungseigenschaften von Granulaten nutzt. Die guten Dämpfungseigenschaften von Granulaten resultieren aus Reibung und Stößen zwischen den einzelnen Teilchen, was in einigen Studien nachgewiesen wurde. So untersuchte Lenzi [3] das Dämpfungsverhalten von Sand in Abhängigkeit von der Korngröße und der Feuchtigkeit. Saeki [4] führte numerische und experimentelle Untersuchungen an einem Horizontalprüfstand durch und untersuchte unter anderem die Abhängigkeit der Dämpfung von den Materialparameter. Akustische Untersuchungen von Partikeldämpfern wurden von Chung et al. [5] und von Kuhl und Kaiser [6] veröffentlicht. Verglichen mit der Vielzahl von akademischen Testbeispielen sind in der Literatur nur wenige praktische Anwendungsfälle von Partikeldämpfern zu finden. Heckel et al. nutzten Metallkugeln in einem Partikeldämpfer, um die Schwingungen einer Säge für den medizinischen Einsatz zu reduzieren [7]. Automotive Anwendungen wurden von Xia et al. [8] und Duvigneau et al. [9] veröffentlicht. Wabenstrukturen besitzen eine hohe Steifigkeit bei einem geringen Gewicht und eignen sich deshalb besonders gut für Leichtbaukonzepte. Außerdem können die dämpfenden Granulate oder andere Schwingungsdämpfer sehr einfach in die Hohlräume der Wabenstrukturen eingebracht werden. Zum Beispiel kombinierten Li et al. die Wabenstruktur mit Schaum und erzielten gute Schallreduktionen [10]. Wang integrierte Metallkugeln und zeigte, dass die Schwingungsreduktion mit der Anzahl der Kugeln zunimmt [11].

Als automotives Anwendungsbeispiel wird in der vorliegenden Arbeit der Boden einer Ölwanne untersucht, der ein wesentlicher Schallabstrahler eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor ist [12]. Als Granulat wird Sand verwendet, der temperaturbeständig, kostengünstig und umweltfreundlich ist sowie kaum Verschleißeffekte zeigt.

In der nachfolgend beschriebenen Untersuchung wird das granulare Material in die Wabenstruktur integriert, wodurch kein zusätzlicher Bauraum benötigt wird. Durch die Nutzung vieler kleiner Hohlräume, wie sie die Wabenstruktur aufweist, ergibt sich die Möglichkeit, die Position des

dämpfenden Granulates zu optimieren, worauf in dieser Arbeit besonders eingegangen wird. Außerdem wird gezeigt, dass eine optimale Positionierung sowohl experimentell als auch numerisch bestimmt werden kann. Mit diesem Konzept ist es möglich, die Schwingungen deutlich zu reduzieren, ohne die Masse zu erhöhen oder zusätzlichen Bauraum in Anspruch zu nehmen. In der Arbeit von Koch et al. wurde das hier vorgestellte Konzept auf einem Motorprüfstand getestet und die Schallabstrahlung gemessen [13]. Dabei konnte der Nachweis erbracht werden, dass auch unter praxisnahen Einsatzbedingungen eine relevante Schallreduktion erreicht werden kann.

Versuchsaufbau

Als Messobjekt wurde die in Abbildung 1(a) dargestellte zweiteilige Ölwanne aus Aluminium verwendet. Der obere Teil der Ölwanne wurde nicht verändert, während der untere Teil durch eine zweiteilige Konstruktion ersetzt wurde. Der erste Teil dieser neuen Konstruktion ist eine 2mm starke Aluminiumplatte, die die Ölwanne abschließt und ein Auslaufen des Motoröls verhindert. Der zweite Teil der neuen Konstruktion ist eine 1mm starke Aluminiumplatte mit Wabenstruktur (Höhe 10 mm), die nahezu die gleiche Form wie die erste Platte aufweist und unter diese geschraubt wurde. Die Konstruktion, ermöglicht ein leichtes Montieren und Demontieren der Wabenstruktur, wodurch sowohl die Position als auch die Menge des Granulats leicht variiert werden kann, ohne dass es zu Undichtheiten der Ölwanne kommt. Die Masse des neuen Ölwannebodens beträgt 730 g und ist damit 365 g leichter als die originale Konstruktion. Die Ölwanne mit dem neuen Boden ist in Abbildung 1(b) dargestellt.

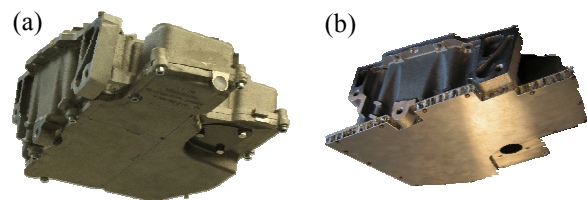


Abbildung 1: (a) Ölwanne mit originalem Boden; (b) Ölwanne mit Wabenstrukturboden

Das Schwingungsverhalten der Struktur wurde mit einem Laser-Scanning-Vibrometer der Firma Polytec (PSV-400) ermittelt, das eine kontaktlose Messung der Oberflächenschwingungen ermöglicht. Das Messobjekt wurde frei-frei aufgehängt, um Lagerungseinflüsse auszuschließen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Zur Anregung wurde ein Shaker mit Impulshammerkopf verwendet, der eine breitbandige Anregung ermöglicht, ohne die

Lagerung der Struktur zu beeinflussen. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde immer das gleiche Messgitter verwendet. Als granulares Material wurde ein Sand verwendet, bei dem 95% der Körner einen Durchmesser im Bereich von 0,1 mm bis 0,48 mm aufwiesen, der aber auch einige größere Körner mit bis zu 2.6mm Durchmesser enthält. In [13] wurde gezeigt, dass der Einfluss der Korngröße sehr gering ist. Um die Schwingungsantworten besser vergleichen zu können, werden RMS (root mean square) Darstellungen verwendet. Die RMS-Amplitude eines Punktes ergibt sich aus

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n x_i^2}, \quad (1)$$

wobei x_i die Amplitude bei der Frequenz i und n die Anzahl der Frequenzen ist.

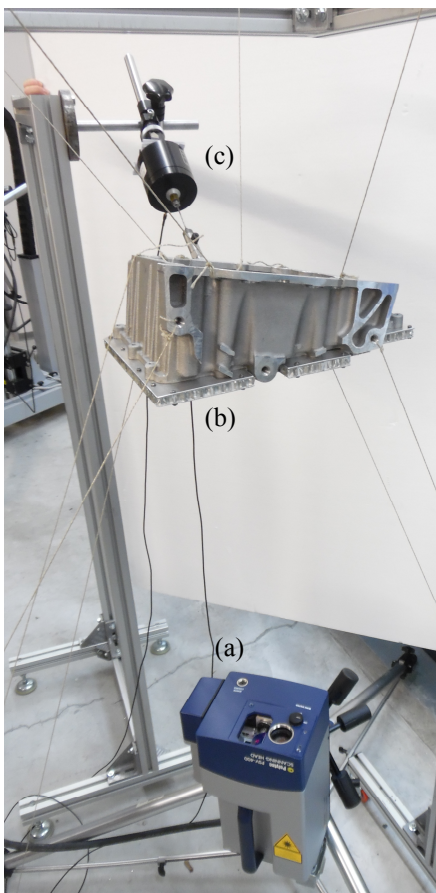


Abbildung 2: Versuchsaufbau; (a) Laser-Scanning-Vibrometer; (b) Ölwanne mit Wabenboden; (c) Shaker mit Impulshammerkopf

Vergleich von Wasser und Sand

In Abbildung 3 sind die Frequenzgänge der originalen Ölwanne ohne Füllung, der Ölwanne mit einer Füllung von 1000 g Wasser und der Ölwanne mit 1000 g Sandfüllung angegeben. Die Abbildung 4 zeigt die zugehörigen gemittelten Schwingungsamplituden (RMS). Es ist zu erkennen, dass die Schwingungsreduktion nicht auf die zusätzliche Masse sondern durch andere schwingungsreduzierende Mechanismen hervorgerufen wird. Der Sand wirkt offensichtlich deutlich schwingungsdämpfend.

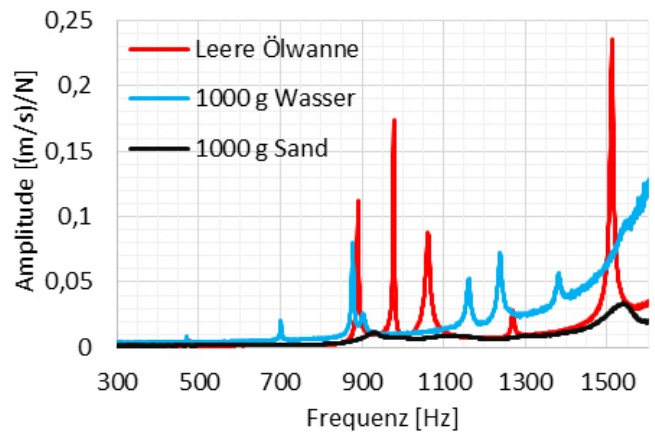


Abbildung 3: Frequenzgang der originalen Ölwanne, ohne Füllung, mit Wasserfüllung und mit Sandfüllung

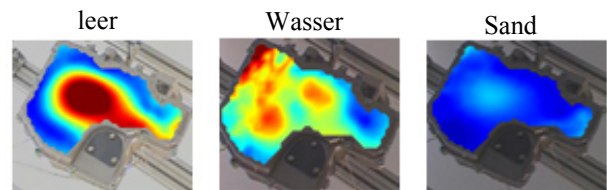


Abbildung 4: RMS der originalen Ölwanne ohne Füllung, mit Wasserfüllung und mit Sandfüllung

Einfluss der Sandmenge

In Abbildung 5 sind die Schwingungsantworten für verschiedene Füllmengen dargestellt, wobei der Sand jeweils gleichmäßig im Boden verteilt wurde. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Schwingungsamplituden mit zunehmender Sandmasse verringern. In einer realen Anwendung muss allerdings ein Kompromiss zwischen Schwingungsreduktion und Leichtbau gefunden werden. Dieser Kompromiss ist von den Kundenwünschen und den rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig. Eine deutliche Schwingungsreduktion wird bereits bei einer Zuführung von 130 g Sand erreicht. Im vorliegenden Fall wurde die Sandzufuhr auf maximal 310 g beschränkt. Diese Sandmenge hat sich als ein guter Kompromiss erwiesen, weil gegenüber der originalen Ölwanne sowohl eine Gewichtsreduktion als auch eine deutliche Reduktion der Schwingungsamplituden im interessierenden Frequenzbereich erreicht wurden.

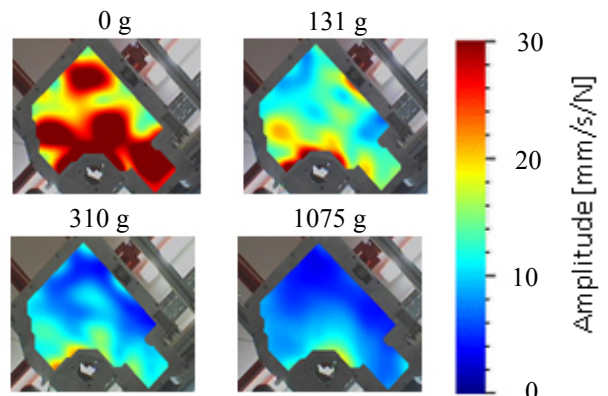


Abbildung 5: Schwingungsantwort des Ölwannebodens in Abhängigkeit von der eingebrachten Sandmasse

Einfluss der Positionierung

Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde eine Sandmasse von 310 g auf unterschiedliche Weise in die Wabenstruktur des Ölwannendeckels eingebracht. Die Verteilung des Sandes und die daraus folgende Schwingungsantwort sind in Abbildung 6 dargestellt. Es zeigt sich ein deutlich erkennbarer Einfluss der Sandverteilung auf das Schwingungsverhalten. Die mit Hilfe von Partikeldämpfern erreichte Schwingungsreduktion kann auf dissipative Effekte durch Reibung und Kollision zurückgeführt werden. Diese sind an den Orten besonders groß, an denen die maximalen Amplituden auftreten. Das konnte mit zahlreichen weiteren Füllungsverteilungen bestätigt werden [13]. Diese Erkenntnis läßt sich für die optimale Verteilung nutzen. Verglichen mit der Amplitudenänderungen durch Erhöhung der Sandmenge hat die Positionierung einen kleinen Einfluss auf das Schwingungsverhalten. Dennoch sollte dieses Optimierungspotential für die Schwingungsdämpfung genutzt werden.

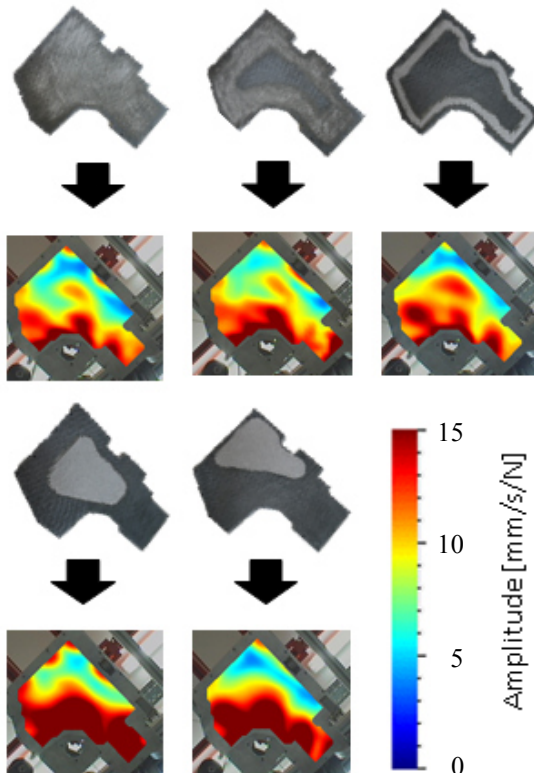


Abbildung 6: Positionierung des Sandes und die zugehörige Schwingungsantwort bei einer Sandmasse von 310 g

Numerische und experimentelle Füllungsbestimmung

Um eine optimale Position des Sandes in einem frühen Entwicklungsstadium zu ermitteln, bietet sich die Nutzung numerischer Modelle an. Das FEM-Modell der Ölwanne weist insgesamt 2,2 Millionen Freiheitsgrade auf. Es wird stochastisch angeregt und ist frei-frei gelagert. Die Bodenplatten und die Waben wurden mit Schalelementen und der obere, kompakte Bereich mit Volumenelementen diskretisiert. Die einzelnen Komponenten wurden an den Bohrungen miteinander verbunden. Die Abbildung 7(a) zeigt die mit Hilfe einer FE Rechnung ermittelten

Amplituden dieses Modells. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann ein erster Entwurf für die Verteilung der Sandfüllung gewonnen werden, die in Abbildung 7(b) dargestellt ist. Die Abbildung 7(c) und 7(d) zeigen die gemessenen Schwingungsantworten, die mit dem Entwurf der Sandverteilung ermittelt wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Amplituden signifikant geringer sind.

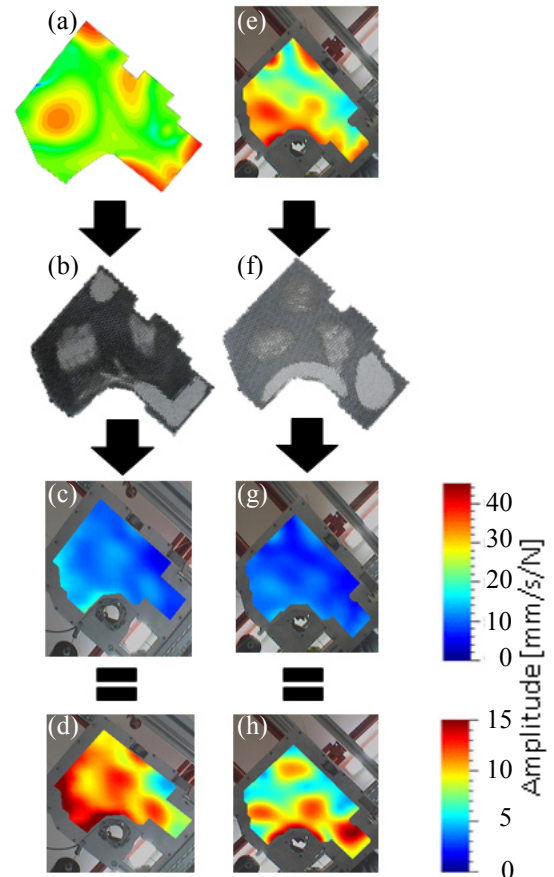


Abbildung 7: Veränderung des Schwingungsverhaltens durch Verwendung der numerisch bzw. experimentell ermittelten Ausgangsschwingung

Die experimentell ermittelte Schwingungsantwort des Ölwannebodens ist in Abbildung 7(e) dargestellt. Die daraus resultierende Füllung ist in 7(f) und die resultierenden Schwingungsantworten sind in den Abbildungen 7(g) und 7(h) dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die numerisch und experimentell ermittelten Füllungen ähnlich sind. In dem unteren runden Bereich liefern die FEM-Rechnungen geringere Amplituden, da in diesem Bereich auf Grund eines Fertigungsproblems das idealisierte Ölwannemodell nicht ausreichend gut mit der Realität übereinstimmt. Die experimentell ermittelte Sandverteilung ergibt geringere Schwingungsamplituden als alle übrigen untersuchten Konfigurationen. Die Frequenzgänge des originalen Bodens, der leeren Wabenplatte sowie der Wabenplatte mit numerisch und experimentell ermittelter Füllung sind in Abbildung 8 vergleichend dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass sowohl die numerisch als auch die experimentell optimierte Konfiguration trotz einer geringeren Masse bessere Ergebnisse als die originale Ölwanne liefern. Bei fehlenden Informationen zum Schwingungsverhalten empfiehlt sich die Verwendung einer Gleichverteilung des

Sandes, die nicht das beste aber immerhin noch ein sehr gutes Ergebnis liefert.

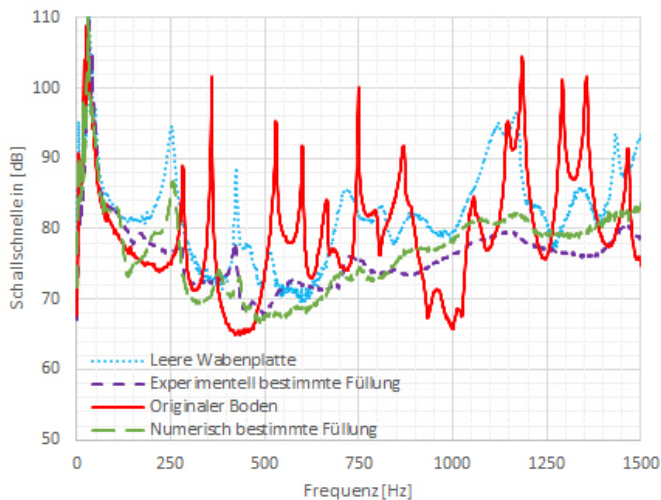


Abbildung 8: Frequenzgang des originalen Bodens, des leeren Wabenbodens und der numerisch und experimentell bestimmten Füllungen

Ergebnisse

Im Beitrag wurde ein passives Leichtbaukonzept vorgestellt, das es ermöglicht, die Schwingungen und damit die Schallabstrahlung von Bauteilen deutlich zu reduzieren, ohne zusätzliche Masse oder zusätzlichen Bauraum zu verwenden. Dafür wurden großflächige Schallstrahler doppelwandig ausgeführt, die Hohlräume als Wabenstruktur gestaltet und diese partiell mit Sand gefüllt, der gute dämpfende Eigenschaften besitzt. Mit Hilfe der Hohlräume ist es möglich, den Sand an genau definierten Orten zu platzieren. Den größten Einfluss auf die Schwingungsreduktion hat die verwendete Sandmenge, wobei im Anwendungsbeispiel Ölwanneboden die größte Schwingungsreduktion mit einer Vollfüllung des Bodens erreicht wurde. Aber auch mit kleineren Sandmengen ist bereits eine deutliche Schwingungsreduktion zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass auch die lokale Verteilung des Sandes einen signifikanten Einfluss auf das Schwingungsverhalten hat. Die dissipativen Effekte des hier präsentierten Partikeldämpfers treten insbesondere dort auf, wo große Bewegungen zwischen den einzelnen Sandkörnern stattfinden. Daraus folgt, dass der Sand an den Orten positioniert werden sollte, an denen die größten Schwingungsamplituden auftreten. Es konnte gezeigt werden, dass diese günstigen Positionen des Granulats sowohl mit Hilfe von experimentellen als auch mit numerischen Methoden ermittelt werden können. Die experimentell ermittelte Füllung ergab in dem untersuchten Anwendungsfall bessere Ergebnisse als alle anderen Konfiguration mit gleicher Masse. Die geringfügig schlechteren Ergebnisse bei der numerisch ermittelten Füllung erklären sich aus den Abweichungen zwischen der Realität und dem numerischen Modell. Wenn keine Information über das Schwingungsverhalten vorhanden ist, sollte eine Gleichverteilung des Sandes gewählt werden.

Danksagung

Die Förderung der Arbeit, die im Rahmen des Projektes „Competence in MObility III - COMO III“ mit Mitteln des

Europäischen Fonds für Regionale Entwicklungen (EFRE) und des Land Sachsen-Anhalt (ZS/2016/04/78118) erfolgte, wird dankend anerkannt.

Literatur

- [1] Jekosch, U. (2004): Basic concepts and terms of “quality”, reconsidered in the context of product sound-quality, *Acta Acustica united with Acustica* 90: 999–1006.
- [2] Regulation (EU) No 540/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems, and amending Directive 2007/46/EC and repealing Directive 70/157/EEC.
- [3] Lenzi, A. (2011): *The use of damping material in industrial machines*, PhD Thesis, University of Southampton, UK.
- [4] Saeki, M. (2002): Impact damping with granular Materials in a horizontally vibrating system. *Journal of Sound and Vibration* 251(1), 153–161.
- [5] Chung H., Emms G, Fox C. (2014): Vibration reduction in lightweight floor/ceiling systems with a sand-sawdust damping layer, *Acta Acustica united with Acustica* 100:628-639.
- [6] Kuhl, W. and Kaiser. H. (1952) Absorption of structure-borne sound in building materials without and with sand-filled cavities, *Acustica* 2: 179–188.
- [7] Heckel, M., Sack, A., Kollmer, J. E. et al. (2012): Granular dampers for the reduction of vibrations of an oscillatory saw, *Physica A* 391: 4442–4447.
- [8] Xia, Z., Liu, X. and Shan, Y. (2005): Application of particle damping for vibration attenuation in brake drum, *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* 7:178–194.
- [9] DuVigneau, F.; Koch, S.; Woschke, E.; Gabbert, U. (2016): An effective vibration reduction concept for automotive applications based on granular-filled cavities, *Journal of Vibration and Control*, 2017 (online available).
- [10] Li, Z., Crocker, M., J. (2006): Effects of thickness and delamination on the damping in honeycomb-foam sandwich beams, *J. Sound Vib.* 294 (3) 473–485.
- [11] Wang, B., Yang, M. (2000): Damping of honeycomb sandwich beams, *J. Mater. Process. Technol.* 105 (1) 67–72.
- [12] Ballou, G., M. (2005): *Handbook for Sound Engineers*, Oxford: Butterworth Heinemann, TGM.
- [13] Koch S., DuVigneau F., Orszulik R., Gabbert U., Woschke E. (2017): Partial filling of a honeycomb structure by granular materials for vibration and noise reduction, *Journal of Sound and Vibration* 39,30–40.