

Untersuchung der schalldämmenden Wirkung von leichten Aluminium- und Kunststoffschäumen an einer funktionsintegrierten Ölwanne

Peter Schrader¹, Tommy Luft¹, Hermann Rottengruber¹

¹ O.-v.-Guericke-Universität, Institut für Mobile Systeme, 39106 Magdeburg, E-Mail: peter.schrader@ovgu.de

Einleitung

Nach der Verordnung Nr. 540/2014 des europäischen Parlaments treten ab dem 1. Juli 2016 für das Gros der heute hergestellten PKW niedrigere Fahrgeräuschgrenzwerte in Kraft [1]. Zusätzlich bringt die zunehmende Etablierung hybrider Antriebssysteme die Kundenforderung nach leiseren Verbrennungsmotoren und einem geräuscharmen Wechsel vom elektromotorischen in den verbrennungsmotorischen Betrieb mit sich. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Herausforderung, das effektive Motorgeräusch aktueller, oft downgesizter Motoren deutlich abzusenken. Für diesen Zweck kommen prinzipiell passive und aktive Schallminderungsmaßnahmen in Frage. Dieser Beitrag untersucht das akustische und thermische Potential einer passiven Maßnahme – der Aufbringung von Metall- und Kunststoffschäumen auf der Motoroberfläche. Die Ergebnisse der Untersuchung werden denen einer im Institut entwickelten Motorvollkapselung [2] gegenübergestellt.

In [3] zeigen die Autoren, dass ein positiver akustischer Effekt der Anbringung von Aluminiumschaum erstens durch eine Erhöhung der Materialsteifigkeit und zweitens des Verlustfaktors erzielt werden kann. Der Beitrag untersucht den zweiten Aspekt, d. h. die Wirksamkeit der Energiedissipation verschiedener Schäume an einer steifen Motoroberfläche. Bei dieser handelt es sich um den mit Rippen versteiften Boden einer funktionsintegrierten Ölwanne (Abbildung 1).

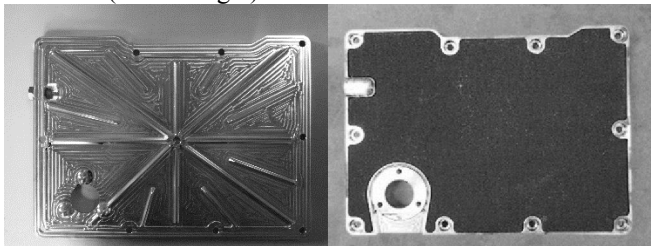


Abbildung 1: verrippter Ölwanneboden (links: Innenseite, rechts: Außenseite mit Schaum Nr. 8)

Dieser wurde vorher mithilfe der Finiten-Elemente-Methode hinsichtlich seiner Oberflächenschnellen im montierten Zustand untersucht und als die optimale von sechs verschiedenen Varianten ermittelt [3].

Untersuchte Schäume, Versuchsaufbau und -durchführung

Die untersuchten Schäume sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihres Materials, ihrer Dicke, Porosität und Steifigkeit. Entsprechend der Kolorierung der Tabelle lassen sie sich in die Gruppen Aluminiumschäume, steife Kunststoffschäume, Kapselungs-/Dämmungsschäume mit Versteifung und weiche Kunststoffschäume einteilen. So Informationen über den Absorptionsgrad α seitens der

Nr.	Dicke [mm]	α_{eck} [-] bei f_{eck} [Hz]	Flächengewicht [kg/m ²]	Beschreibung
1	10	-	4,14	Kleinporiger Aluminiumschaum
2	10	-	9,91	Mittelporiger, doppelt plattierter Aluminiumschaum
3	10	-	7,28	Mittelporiger, einfach plattierter Aluminiumschaum
4	20	-	2,44	Mikroporiger, steifer Kunststoffschaum I
5	20	-	2,29	Mikroporiger, steifer Kunststoffschaum II
6	25	1,05 bei 1000 Hz (α -Kabine)	2,78	Mikroporiger, weicher Kapselungsschaum mit versteifender Schicht und Akustik-Alufolie
7	20	1,05 bei 1250 Hz (α -Kabine)	2,45	Mikroporiger, weicher Kapselungsschaum mit versteifender Schicht
8	10	0,9 bei 4000 Hz (Impedanzrohr)	5,00	Mikroporiger, schwerer, weicher Kunststoffschaum
9	10	0,9 bei 3150 Hz (Impedanzrohr)	1,60	Mikroporiger, leichter, weicher Kunststoffschaum mit akustisch wirksamer Papierbeschichtung
10	15	0,74 bei 1000 Hz (α -Kabine)	1,49	Mikroporiger, weicher, leichter Dämmungsschaum mit versteifender Schicht
11	15	0,75 bei 1000 Hz (α -Kabine)	2,05	Mikroporiger, weicher, leichter Dämmungsschaum mit versteifender Schicht und Akustik-Alufolie

Tabelle 1: untersuchte Schäume

Hersteller verfügbar waren, sind diese angegeben, wobei der Wert der Eckfrequenz beim Erreichen hoher Absorptionsgrade im Frequenzbereich angegeben ist. Die Methode der Hersteller zur Bestimmung des Absorptionsgrades ist ebenfalls angegeben.

Die Schäume wurden mithilfe eines Schmelzklebstoffes am Ölwanneboden befestigt. Dieser wurde auf dem Ölwanneboden in einem Ofen bei 180 °C geschmolzen, so dass eine Klebstoffschicht von 1 mm Dicke entstand. Die

Aufbringung der verschiedenen Schäume auf den flüssigen Klebstoff erfolgte außerhalb des Ofens. Auf diese Weise wurde eine ganzflächige Verbindung des Schaumes am Ölwanneboden realisiert und einer thermischen Schädigung des Schaumes vorgebeugt.

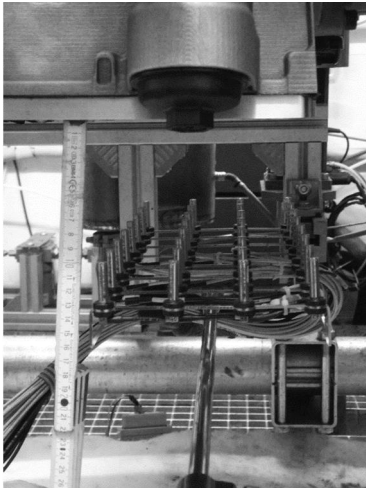


Abbildung 2: Mikrofonarray unter dem Ölwanneboden

Die Untersuchung der Schäume erfolgte mit einem Mikrofonarray. Dieses ist entsprechend Abbildung 2 an der Unterseite der Ölwanne montiert. Das Array misst 150 x 350 mm und trägt 32 Mikrophone. Es wurde stets im Abstand von genau 100 mm parallel zur Schaumoberfläche angeordnet. Für die Abdeckung des gesamten Ölwannebodens muss es bei jeder Messung um 150

mm verschoben werden (in der Abbildung nach links). Zu diesem Zweck wurde das Array an einem Arm befestigt, welcher auf einer Schiene verschieb- und fixierbar gelagert ist. Um Reflexionen am schallharten Boden unter der Ölwanne zu vermeiden, wurde dieser mit Absorptionsmaterial ausgelegt, welches bei einer Frequenz von 100 Hz einen Absorptionsgrad von 1,0 erreicht. Deshalb wurde die Auswertung und Beurteilung der Schäume erst ab dieser Frequenz vorgenommen.

Das Saug-Diesel-Aggregat wurde an drei verschiedenen Betriebspunkten untersucht. Mithilfe eines Entwicklungssteuergerätes wurde an diesen Punkten stets der gleiche anregende Zylinderdruckverlauf durch die Vorgabe der in Tabelle 2 angegebenen Einspritzparameter erzeugt.

BP [U/min // Nm]	EB MI [°KW n. OT]	p _{Rail} [bar]	n _{Pil} [-]	EB PiI [°KW n. OT]	EB PoI [°KW n. OT]
2000 // 47	2	750	2	-50	30
2000 // 38	1	680	1	-25	35
1800 // 32,5	-2	460	2	-38	18

Tabelle 2: Untersuchte Betriebspunkte (BP)

Die Betriebspunkte wurden nach einer vorhergehenden Untersuchung festgelegt, wobei neben Emissions- und Effizienzbetrachtungen ein möglichst geräuscharmer Betrieb des untersuchten Aggregates sichergestellt wurde [4]. Zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften der Schäume werden in diesem Beitrag die Messergebnisse am lautesten Betriebspunkt (2000 U/min, 47 Nm) herangezogen.

Versuchsergebnisse

Abbildung 3 zeigt die mit dem Array am Ölwanneboden gemessenen Schalldruckpegelverteilungen für die in Tabelle 1 gelisteten Schäume. In der oberen Reihe sind die Ergebnisse für die steifen Aluminium- und Kunststoffschäume dargestellt; die untere Reihe zeigt die eher weichen Schäume. Schaum Nr. 1 und 3 stellen die geschlossenzelligen Aluminiumschäume dar, welche, am Ölwanneboden befestigt, diesem eine poröse Oberfläche verleihen. Der doppelt plattierte Schaum Nr. 2 hat abgesehen von der 0,8 mm dicken Aluminiumplatte den gleichen Aufbau wie Schaum Nr. 3 und die gleiche Porengröße und -Struktur. Somit muss die geringfügige Reduktion des Schalldruckpegels von Schaum Nr. 2 gegenüber dem Boden ohne Schaum auf diese Plattierung der Schaumoberfläche zurückgeführt werden, welche einen Dämpfungseffekt bewirkt.

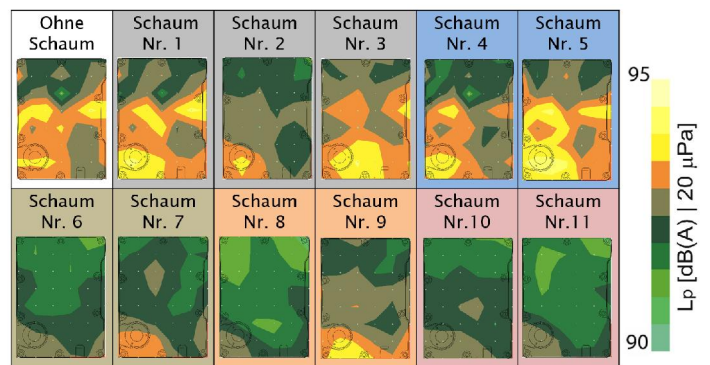


Abbildung 3: Schalldruckpegelverteilung am Ölwanneboden bei 2000 U/min und 47 Nm im Frequenzbereich 0,1-8 kHz

Die steifen Kunststoffschäume Nr. 4 und 5, welche gegenüber den vorhergehenden eine 10 mm größere Plattenstärke aufweisen, liefern keinerlei Verbesserung des gemessenen Schalldruckpegels. Schaum Nr. 5 bewirkt sogar eine Erhöhung desselben, die besonders an der Montagefläche des Öltemperatursensors (links unten im Mapping) sichtbar wird. Die Schalldruckverteilungen stellen die Überlagerung der Eigenmoden im untersuchten Frequenzbereich dar. Diese unterscheiden sich nicht voneinander, mit der Ausnahme von Schaum Nr. 2, dem außen plattierten Aluminiumschaum, der zwei Maxima des Bodens ohne Schaum so dämpft, dass sie verschwinden. Die Analyse der Pegelverteilung an den einzelnen Moden des Ölwannebodens zeigt, dass es sich um eine Biegung 2. Ordnung bei 704 Hz handelt.

Die weniger steifen Schäume (untere Reihe) weisen allesamt einen geringeren Schalldruckpegel auf als der blanke Ölwanneboden. Die größte Pegelreduktion bewirkte Schaum Nr. 8, welcher von den nicht-metallischen Schäumen das höchste Flächengewicht hat. Das Pegelmaximum des Ölwannebodens ohne Schaum zeigt sich auch hier im Gebiet der Montagefläche des Öltemperatursensors. Der Schalldruckpegel an dieser Stelle ist bei Schaum Nr. 8 um etwa 1,5 dB abgesenkt. Die Berechnung des Gesamtpegels, welche virtuell das Mikrofon-Array zu einem Einzelmikrofon zusammenfasst, liefert für den Frequenzbereich eine Pegelreduktion von maximal 1,2 dB bei Schaum Nr. 8 (Abbildung 4). Bei allen anderen Schäumen fällt die Pegelreduktion geringer aus. Der Vergleich der

Ergebnisse von Schaum Nr. 10 und Schaum Nr. 11 zeigt, dass das Aufbringen einer Akustik-Alufolie einen positiven Effekt bringt. Die perforierte, gewellte Alufolie bewirkt dabei nicht nur einen akustischen Kurzschluss, sondern wirkt auf den elastischen Schäumen ähnlich wie die Platte auf dem Aluminiumschaum Nr. 2 als zusätzliche Masse, welche dämpfend wirkt und somit die Schallenergie-dissipation innerhalb des Schaumes verstärkt.

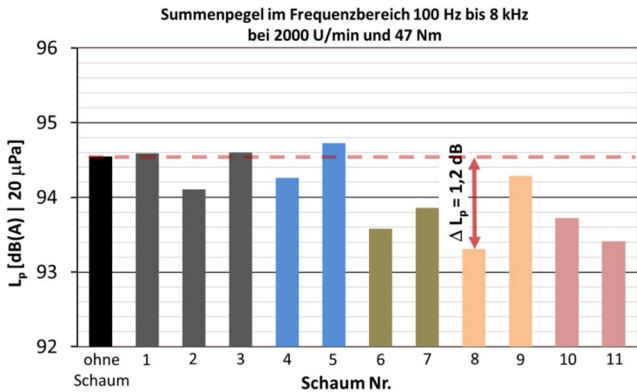


Abbildung 4: Summenpegel der mit den verschiedenen Schäumen beklebten Ölwanne im Frequenzbereich 0,1-8 kHz

Da die bekannten Daten der leichten Schäume zeigen, dass diese ihr volles Absorptionsvermögen bei Frequenzen oberhalb von 1000 Hz erreichen, liegt eine frequenzabhängige Betrachtung des Verhaltens der Schäume nahe. Diese liefert Abbildung 5. Der Vergleich der Terzspektren der steifen Aluminiumschäume (oben links) mit den weichen Kunststoffschäumen zeigt, dass letztere bei Frequenzen über 1 kHz den ersteren überlegen sind. Bis auf die Kapselschäume (oben rechts) zeigt sich bereits bei den Terzmittenfrequenzen 400 und 500 Hz eine Pegelabsenkung gegenüber dem unverschäumten Boden und dem mit Aluminiumschaum

verkleideten. Die Pegelabsenkung des doppelt plattierten Aluminiumschäums Nr. 2 bei 160 und 200 Hz zeigt lediglich der schwere Kunststoffschäum Nr. 8 (unten links) und der mit Akustik-Alufolie beschwerte Dämmungsschaum Nr. 11 (unten rechts).

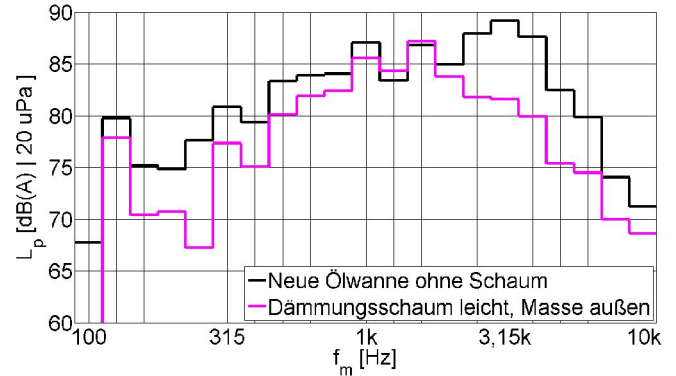


Abbildung 6: Terzspektrum des Schalldrucks von Schaum Nr. 8 mit Massenschicht an der Außenseite

Die Schäume Nr. 6, 7, 10 und 11 wurden zunächst mit ihrer thermisch isolierenden, schweren Schicht am Ölwanneboden verklebt. Dadurch konnte hier nicht der positive dissipative Effekt einer an der äußeren Oberfläche schwingenden Masse untersucht werden, sondern nur derjenige des masseunbehafteten Schaumes. Daher wurde ein weiteres Experiment mit Schaum Nr. 10 durchgeführt, wobei dessen schwere Schicht nach außen gerichtet war. Das Resultat dieses Versuches zeigt das Terzspektrum in Abbildung 6. Gegenüber dem Ölwanneboden ohne Schaum konnte eine Reduktion des Schalldruckpegels um 3,1 dB im Frequenzbereich 0,1-8 kHz erzielt werden. Der Abgleich mit Abbildung 4 zeigt, dass derselbe Schaum mit der als Schwinger wirkenden, außenliegenden Masse in Summe eine um 2,25 dB größere Reduktion des Schalldruckpegels bewirkt

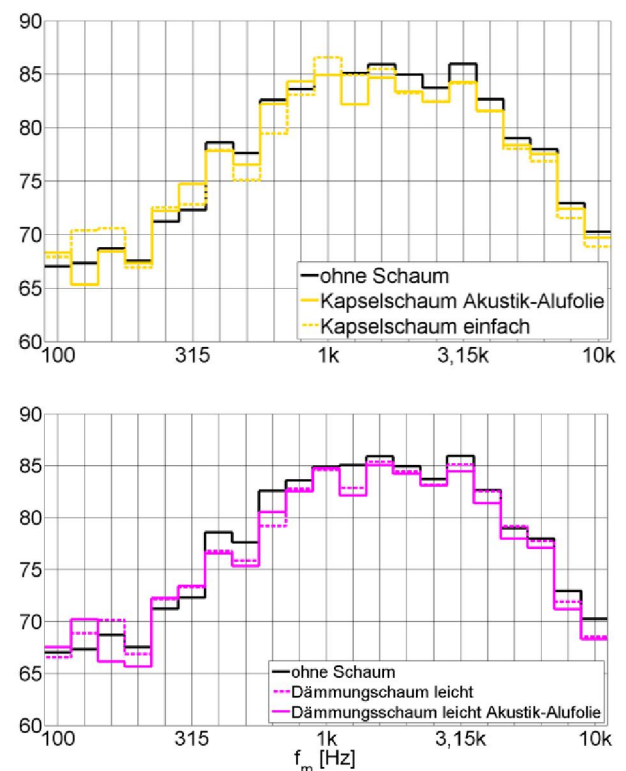
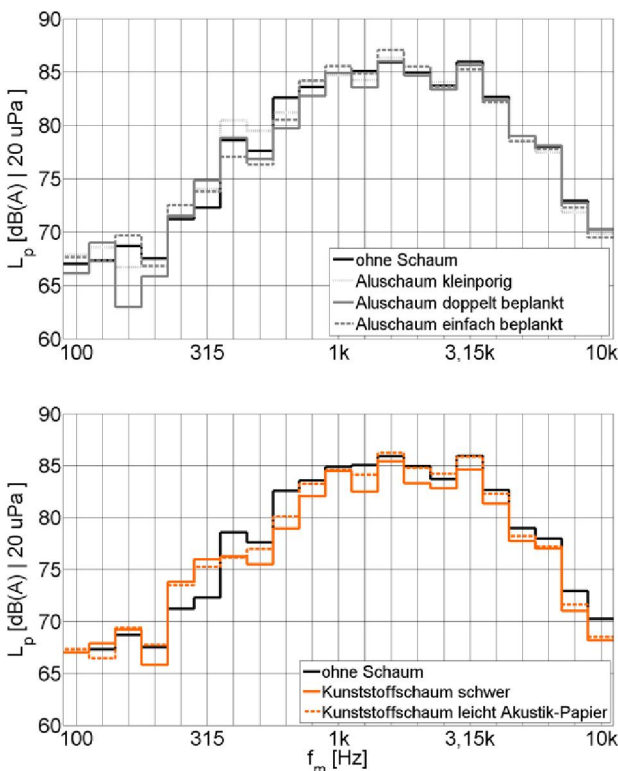


Abbildung 5: Terzspektrum der Schäume Nr. 1, 2, 3 (oben links) 6 und 7 (oben rechts) 8 und 9 (unten links) sowie 10 und 11 (unten rechts) im Vergleich zum unverschäumten Ölwanneboden (schwarzer Graph)

als mit einer am Material verklebten Masse. Somit ist diese Modifikation der Schaummontage diejenige der Untersuchung, welche die signifikanteste Wirkung zeigt. Da Schaum Nr. 10 mit einem Flächengewicht von 1,49 kg/m² von allen untersuchten Schäumen der leichteste ist, wurde der Nachweis dafür erbracht, dass sich mit leichten Schaumverkleidungen an der Oberfläche von Motoren gut hörbare Schalldruckpegelreduktionen erzielen lassen.

Für diese akustische optimale Variante wurde eine Abklingkurve der Öltemperatur an der vollverschäumten Ölwanne aufgezeichnet, welche Abbildung 7 zeigt. Durch den Schaum konnte die Zeit bis zum Erreichen der Öltemperatur 40 °C ($t_{40^\circ\text{C}}$) um eine Stunde und 14 min. hinausgezögert werden (siehe Abbildung). Dies ist vorteilhaft, da eine höhere Öltemperatur geringere Reibungsverluste bei einem Neustart des Motors mit sich bringt, und somit einen geringeren Kraftstoffverbrauch.

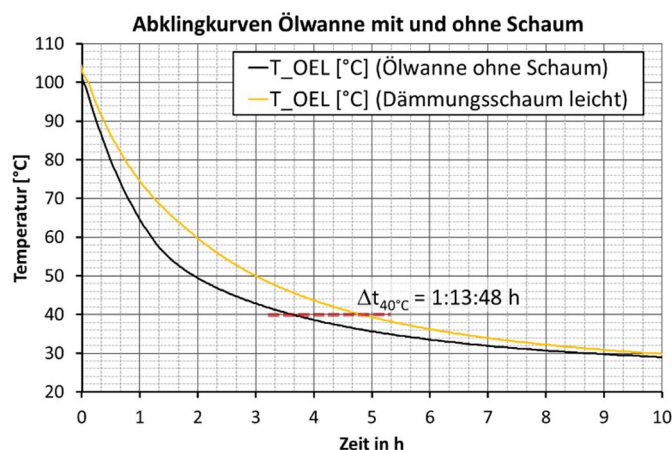


Abbildung 7: Einfluss der Ölwannenverschäumung auf die Wärmespeicherfähigkeit der Ölwanne.

Schlussfolgerungen

Mit steifen Kunststoff- und Metallschäumen, welche an der Oberfläche schwingender Maschinenteile verklebt werden, lässt sich keine Verringerung der abgestrahlten Schalleistung erzielen. Weiche Kunststoffschäume sind für diesen Zweck deutlich besser geeignet. Im Vergleich zu Metallschäumen verfügen diese Schäume meist über eine geringere Wärmeleitfähigkeit und haben somit bessere Isolations-eigenschaften.

Die mit weichen, an der Motoroberfläche montierten Kunststoffschäumen erzielte Schalldruckpegelreduktion liegt im deutlich wahrnehmbaren Bereich. Dabei lassen sich die größten Pegelreduktionen nicht mit den schwereren Schäumen erzielen, sondern mit mindestens zweischichten Verbundschäumen, welche an ihrer Außenseite eine als schwingende Masse wirkende Schicht aus festerem Material aufweisen. Dieser Effekt lässt sich auch bei Metallschäumen beobachten, bei denen eine Dämpfung bestimmter Eigenschwingungen nachgewiesen werden konnte, wenn sie eine Deckschicht aus Vollmaterial besaßen. Ein ähnlicher Effekt zeigte sich auch beim Bekleben der Kunststoff-schaumoberfläche mit einer Alufolie.

Die Frequenzbereiche, in denen ein Schaum einen hohen Absorptionskoeffizienten aufweist, korrelieren nicht mit den

Frequenzbereichen, in denen er an einer schwingenden Oberfläche eine Dissipation der Schwingungsenergie und somit eine Verringerung der Schalleistung bewirkt. Ein Schaum, dessen Absorptionskoeffizient in der α -Kabine erst über 1 kHz seine besten Absorptionseigenschaften erreicht, kann bereits bei deutlich geringeren Frequenzen sehr gute schwingungsdämpfende Effekte zeigen.

Die Aufbringung von Schäumen an der Motoroberfläche ist der motornahen Kapselung eng verwandt. Ihr gegenüber bringt sie den Vorteil einer geringeren Masse und einem deutlich geringeren Volumen des verkleideten Motors. Jedoch können mit einer Vollkapsel sowohl in akustischer als auch in thermischer Hinsicht bessere Ergebnisse erzielt werden. Thermisch brachte eine Vollkapselung ein $\Delta t_{40^\circ\text{C}}$ von über 5 h [2]. Akustisch wurden Schalldruckpegelreduktionen von mehr als 10 dB realisiert. [2, 5].

Durch eine vollständige Verkleidung der Motoroberfläche mit einem thermisch isolierenden Schaum könnte $\Delta t_{40^\circ\text{C}}$ vergrößert werden. Auf diese Weise wäre eine Annäherung an die Wärmespeicherfähigkeit einer Vollkapselung möglich.

Die Untersuchung anderer, hinsichtlich ihrer akustischen Dissipationseigenschaften verbesserter Schäume, könnte zu einer weiteren Absenkung der Schallemission führen.

Danksagung

Ohne den Entwurf der Ölwanne durch die Firma TRIMET Aluminium GmbH und die Firma WTZ gGmbH wären die hier gemachten Untersuchungen nicht möglich gewesen. Dank gebührt ebenfalls den Firmen Autoneum, Odenwald Chemie, BASF, Evonic und Greiner Perfoam für die Bereitstellung der Schäume. Das Land Sachsen-Anhalt und die Europäische Union förderten das Projekt „ELISA – modulare Leichtbaukomponenten“, in dessen Rahmen die Untersuchungen durchgeführt wurden.

Literatur

- [1] Europäische Union: Verordnung Nr. 540/2014 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014. Abgerufen am 03.03.2015 unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal/content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0540&from=EN>
- [2] Duvigneau, F. et al.: Entwicklung, Simulation und psychoakustische Bewertung einer motornahen thermoakustischen Vollkapselung, 8. Symposium für Motor- und Aggregateakustik, Tagungsband, 2014 S. 279 ff.
- [3] Schrader, P. et al.: Entwicklung einer funktionsintegrierten wärme- und schallgedämmten Ölwanne, Deutsche Jahrestagung für Akustik, Tagungsband, 2014, S. 305-306
- [4] Kraut, M.: Brennverfahrensoptimierung an einem Zweizylinder-Saugdieselmotor für den Range-Extender Einsatz, Studienarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014
- [5] Mantovani, M. et al.: Innovative Konzepte zur thermoakustischen Kapselung des Motorraums, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 01/2010, S. 20-25