Einsatz granularer Medien zur Schall- und Schwingungsreduktion automotiver Anwendungen

Fabian Duvigneau[1], Sebastian Koch[2], Elmar Woschke[2], Ulrich Gabbert[1]

[1] *Lehrstuhl für Numerische Mechanik, Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität, 39106 Magdeburg, Deutschland, Email: fabian.duvigneau@ovgu.de*

[2] *Lehrstuhl für Technische Dynamik, Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität, 39106 Magdeburg, Deutschland, Email: sebastian.koch@ovgu.de*

Einleitung

Das akustische Verhalten von Verbrennungsmotoren rückt bei der Entwicklung moderner Automobile immer mehr in den Fokus. Dabei haben passive Maßnahmen zur Reduktion der Schallemission eine besonders große Bedeutung. In einer vorangegangenen Studie [1] wurde die Applikation von Aluminium- und Kunststoffschäumen auf einer Ölwanne hinsichtlich des Potentials zur passiven Schalldämmung untersucht. Allerdings führte dieser Ansatz lediglich zu einer geringen Schallpegelreduktion. Des Weiteren wurde in [2] eine Motorvollkapselung untersucht, welche sich als sehr effizient erwies und breitbandig zu einer Reduktion der abgestrahlten Schallleistung von ca. 12 dB(A) führte.

Im vorliegenden Beitrag wird ein alternatives Konzept zur passiven Schwingungsdämpfung vorgestellt, das im Wesentlichen die hohe innere Reibung granularer Medien als Dissipationsquelle ausnutzt. Ziel ist es, direkt den Strukturschwingungen als Ursache der akustischen Emissionen entgegenzuwirken, anstatt mittels Dämmungen oder Ähnlichem deren Wirkung zu bekämpfen. Die Ölwanne ist eine der dominantesten Schallquellen eines Verbrennungsmotors. Aus diesem Grund wird nachfolgend eine zweiteilige Ölwanne eines Dieselmotors als Anwendungsbeispiel verwendet. Die Effizienz des vorgestellten Konzeptes wird anhand eines Ölwannendeckels demonstriert, der eine Kavität aufweist, die mit Granulat befüllt und anschließend verschlossen werden kann. Als Granulat dient im vorliegenden Beitrag Sand, der viele Vorteile aufweist. Sand ist billig, fast überall verfügbar, alterungsbeständig, umweltunbedenklich und die Recyclebarkeit stellt kein Problem dar.

In Voruntersuchungen wurde gezeigt, dass die Dämpfungswirkung von Sand sehr viel höher ist als die von Wasser und die erreichte Schwingungsreduktion neben der Wirkung der zusätzlichen Masse maßgeblich auf der inneren Reibung des granularen Mediums beruht [3].

Im Beitrag wird zunächst die verwendete Ölwanne und der speziell entwickelte Ölwannenboden vorgestellt. Danach wird der Versuchsaufbau erläutert und die Ergebnisse diskutiert. Dabei steht neben der erreichbaren Reduktion der Schwingungsamplituden auch insbesondere der Leichtbau im Fokus. Für die experimentelle Schwingungsanalyse der verschiedenen Ölwannenböden wird ein 1D-Laservibrometer verwendet.

Deckeldesign

In Abb. 1 ist der entwickelte Prototyp eines Ölwannendeckels dem Originaldesign gegenübergestellt. Der obere Teil der Ölwanne wird unverändert beibehalten. Alle Deckelvarianten sind aus Aluminium gefertigt und werden mit Hilfe identischer Schrauben immer auf die gleiche Weise am oberen Ölwannenteil befestigt.

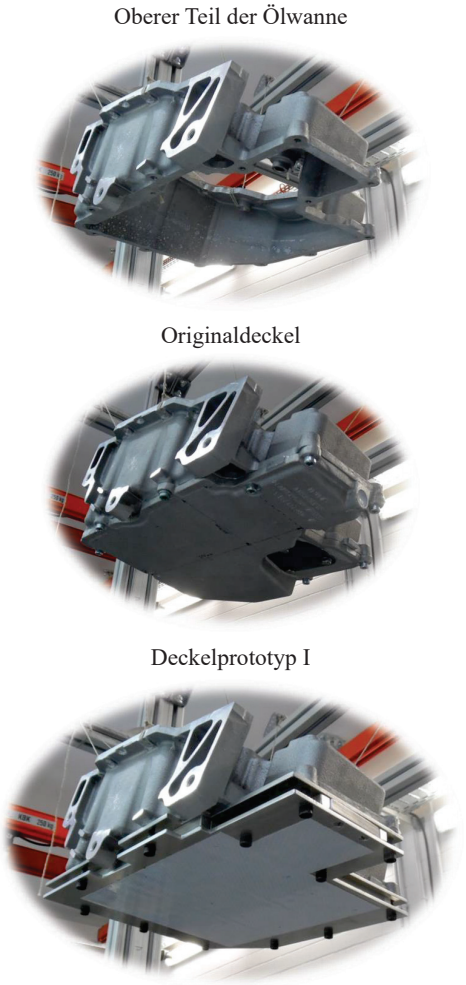

Abbildung 1: Gegenüberstellung des Orignaldeckels und des Prototypen

Ein detaillierterer Einblick in das Design des Prototyps wird in Abb. 2 gegeben. Die Konstruktion des Deckelprototyps wurde bewusst einfach gehalten und völlig oh-

ne Designoptimierung oder Versteifungsmaßnahmen konzipiert. Die Hauptbestandteile sind zwei Platten gleicher Dicke, sowie geschraubte Abstandhalter zur Erzeugung der gewünschten Kavität. Einer dieser Abstandhalter wurde während der Untersuchungen zum Be- und Entfüllen genutzt (siehe Abb. 2).

Abbildung 2: Entwickelter Ölwannendeckelprototyp mit befüllbarer Kavität

Für alle Untersuchungen wird der gleiche Sand verwendet (siehe Abb. 3). Der Prototyp in Abb. 2 kann 760 g dieses Sandes fassen. Es handelt sich um ein Sandgemisch auf Siliziumbasis mit einer nicht einheitlichen Korngröße, wie in Abb. 3 zu erkennen ist. Der mittlere Korndurchmesser beträgt 0.3 mm. Nach DIN ISO 4324 ergibt sich ein Schüttwinkel von 31°. Letzterer kann als ein Maß für die Reibung granularer Materialien verwendet werden, um die Dämpfungsfähigkeit verschiedener Granulate zu bewerten.

Abbildung 3: Der als Füllmaterial verwendete Sand

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Messung der Schwingungen des jeweiligen Ölwannenbodens ist in Abb. 4 dargestellt.

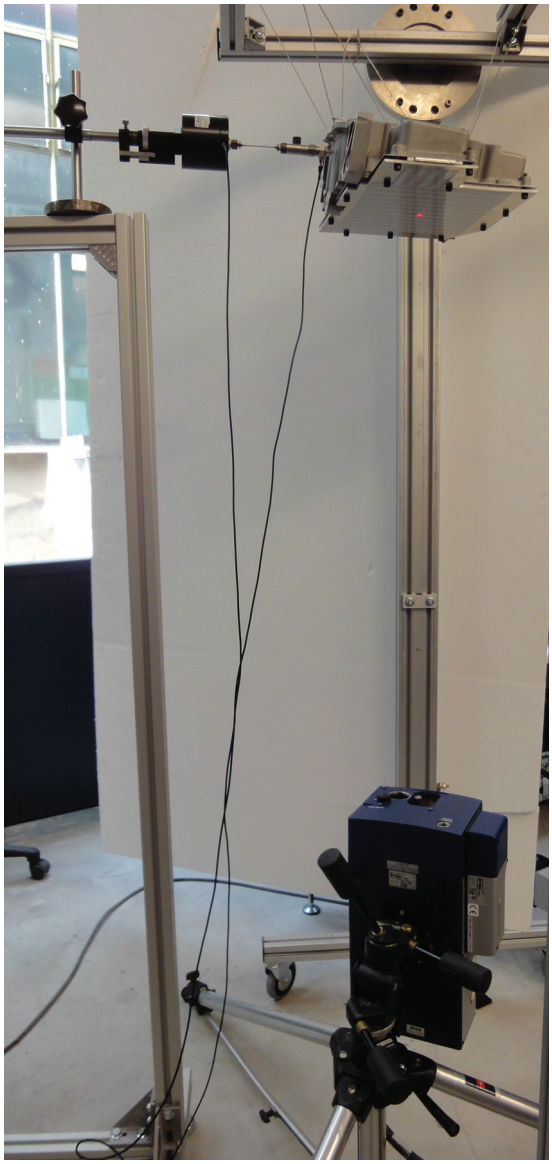

Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Schwingungsmessung des Ölwannenbodens mittels Laservibrometer

Zur Ermittlung der Schwingungsamplituden wird ein Laservibrometer (PSV-400) der Firma Polytec verwendet, das senkrecht zur Messebene ausgerichtet wird, um mögliche Messungenauigkeiten gering zu halten. Die Ölwanne ist mit Hilfe von Fäden frei-frei aufgehängt. Dabei wurde der Ölwannenboden horizontal ausgerichtet. Während der verschiedenen Versuche bleibt der obere Teil der Ölwanne und deren Lagerung stets unverändert; ausschließlich der angeschraubte Deckel wird ausgetauscht. Auch der Anregungspunkt am oberen Teil der Ölwanne bleibt identisch. Die Anregung erfolgt durch einen Impulshammerkopf, der auf einen elektrodynamischen Schwingungserreger montiert ist. Auf diese Art und Weise ist eine reproduzierbare Erregung ohne Veränderung der Randbedingungen der Ölwanne gewährleistet. Ziel ist es, sekundäre Körperschallpfade zu vermeiden. Zusätzlich ist der Schwingungserreger aus diesem Grund auf einem separatem Aluminiumrahmen befestigt (siehe Abb. 4). Der Kraftsensor im Hammerkopf

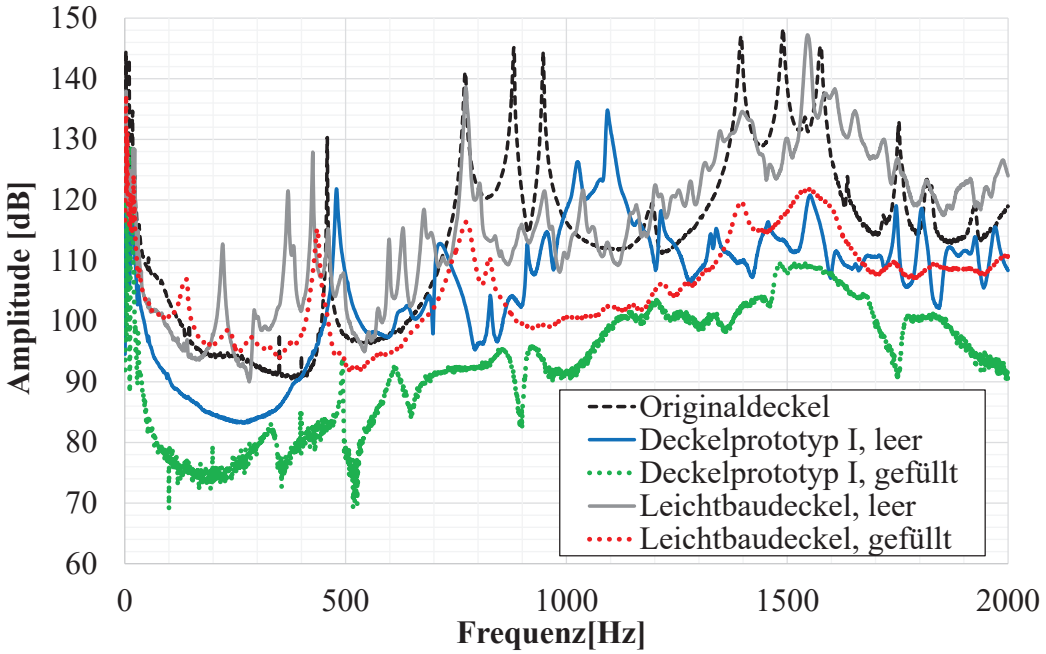

Abbildung 5: Vergleich der verschiedenen Deckelvarianten hinsichtlich der Schwingungsantwort

wird genutzt, um die Übertragungsfunktionen der jeweiligen Konfiguration zu bilden. Folglich ist durch identische Randbedingungen, einen identischen Anregungspunkt und die Berücksichtigung der Erregeramplitude eine optimale Vergleichbarkeit der verschiedenen Konzepte gegeben.

Ergebnisse

Es wurden fünf verschiedene Deckelkonfigurationen vermessen: der Originaldeckel, der in Abb. 2 gezeigte Prototyp I mit und ohne Sandfüllung sowie eine Leichtbauvariante des Prototyps I mit und ohne Sandfüllung. In diesem Beitrag wurden ausschließlich Vollfüllungen betrachtet; in [3] wurden zusätzlich auch Teilfüllungen untersucht.

Die Leichtbauvariante ist notwendig, um zu zeigen, dass das präsentierte Konzept auch unter der Nebenbedingung, die Masse des Originaldeckels nicht zu überschreiten, sehr gute Resultate liefert. Hinsichtlich der Konstruktion sind beide Varianten nahezu baugleich. Lediglich die Plattendicke wurde von 4 mm auf 1 mm reduziert und die Höhe der Kavität von 11 mm auf 5 mm verringert. Die Leichtbauvariante kann im Gegensatz zum Prototyp I nur 347 g anstatt 760 g des verwendeten Sandes fassen. Die Masse des Leichtbaudeckels beträgt leer 553 g und gefüllt 900 g. Der Leichtbaudeckel ist 195 g bzw. 17.8 % leichter als der 1095 g schwere Originaldeckel. Der Prototyp I weist hingegen leer eine Masse von 1994 g auf und wiegt mit Füllung 2754 g.

In Abb. 5 sind die über alle Messpunkte gemittelten Antwortspektren der verschiedenen Deckelvarianten gegenübergestellt. Zusätzlich sind in Tab. 1 die Maximalwerte, die im Frequenzspektrum der jeweiligen Konfiguration auftreten, und in Tab. 2 die Mittelwerte der Spektren aufgelistet. Die Unterschiede der jeweiligen Konfiguration zum Originaldeckel sind in den Tabellen ebenfalls mit angegeben.

Tabelle 1: Maximalwerte der Schwingungsantwort der verschiedenen Deckelkonfigurationen und deren Unterschiede zum Originaldeckel

Konfiguration	Maximal-wert	Diff. zum Max. Orig.
Originaldeckel	148.24 dB	
Prototyp I, leer	134.84 dB	-13.40 dB
Prototyp I, gefüllt	109.55 dB	-38.69 dB
Leichtbaudeckel, leer	147.24 dB	-1.00 dB
Leichtbaudeckel, gefüllt	121.78 dB	-26.46 dB

Tabelle 2: Mittelwerte der Schwingungsantwort der verschiedenen Deckelkonfigurationen und deren Unterschiede zum Originaldeckel

Konfiguration	Mittelwert	Diff. zu MW Orig.
Originaldeckel	113.38 dB	
Prototyp I, leer	105.52 dB	-7.86 dB
Prototyp I, gefüllt	92.83 dB	-20.55 dB
Leichtbaudeckel, leer	115.52 dB	+2.14 dB
Leichtbaudeckel, gefüllt	105.10 dB	-8.28 dB

Die Abb. 5 zeigt, dass der Leichtbaudeckel ohne Füllung (graue Linie) aufgrund seiner nachgiebigeren Struktur im Frequenzbereich bis 2000 Hz deutlich mehr Eigenfrequenzen aufweist als die anderen beiden Varianten.

Der sehr viel steifere Prototyp I (blaue Linie) weist allerdings ebenfalls wesentlich mehr Eigenfrequenzen auf als der originale Deckel, was durch die Plattenstruktur des Prototyps I im Vergleich zur optimierten dreidimensionalen Struktur des Originaldeckels (inklusive Versteifungselementen) begründet werden kann. Die durch die Sandfüllung induzierte Dämpfung ist in beiden Fällen so hoch, dass viele der Eigenfrequenzen gar nicht mehr detektierbar sind.
Es ist klar zu erkennen, dass die Antwortspektren der gefüllten Konfigurationen nahezu im gesamten betrachteten Frequenzbereich deutlich unter denen ohne Füllung liegen. Lediglich bei der Leichtbauvariante zeigt die Frequenzantwort mit Füllung in einigen Frequenzen unterhalb von 450 Hz größere Amplituden. Der gefüllte Prototyp I (grün gestrichelte Linie) ist im gesamten Frequenzbereich stets die beste Konfiguration. Allerdings ist auch die ungefüllte Variante des Prototyps bereits besser als der Originaldeckel. Dies wird auch anhand der im Spektrum auftretenden Maximalwerte (siehe Tab. 1) und dem Mittelwert des Antwortspektrums (siehe Tab. 2) deutlich. Dabei liegt der Maximalwert des ungefüllten Prototypen mit 134.84 dB bereits 13.4 dB unter dem des Originaldeckels. Der Mittelwert des ungefüllten Prototyps ist um 7.86 dB kleiner. Die Sandfüllung reduziert den Maximalwert noch einmal um weitere 25.29 dB und den Mittelwert um weitere 12.69 dB. Die Ursache dafür, dass bereits der ungefüllte Prototyp I besser als der Originaldeckel ist, liegt in der Überdimensionierung dieses ersten Prototyps, der ungefüllt bereits etwa zwei Kilogramm schwer ist und aus einem Plattenverbund von zwei 4 mm dicken Aluminiumplatten besteht, während der Originaldeckel in manchen Bereichen lediglich eine Dicke von 3-4 mm aufweist. Die Leichtbauvariante wurde untersucht, um zu zeigen, dass das präsentierte Konzept auch für ein gewichtsoptimiertes Bauteil attraktiv ist.
Im Gegensatz zum Prototyp I ist die Leichtbauversion ohne Füllung nicht besser als der Originaldeckel. Der Mittelwert des ungefüllten Leichtbaudeckels ist etwa 2 dB höher als beim Originaldeckel, während der auftretende Maximalwert 1 dB geringer ist als beim Originaldeckel. Die Sandfüllung des Leichtbaudeckels bewirkt im Vergleich zur ungefüllten Variante eine Senkung des Maximalwertes um 25.46 dB und des Mittelwertes um 10.42 dB. Somit zeigt der Leichtbaudeckel mit Sandfüllung wesentlich geringere Schwingungsamplituden als der Originaldeckel und ist gleichzeitig noch 17.8 % leichter. Beim Vergleich des Prototyps I mit Sandfüllung mit dem gefüllten Leichtbaudeckel fällt auf, dass die 760 g Füllung des Prototyps I zwar erwartungsgemäß eine größere Reduktion verursacht, aber die 347 g Füllung des Leichtbaudeckels im Vergleich zur jeweiligen ungefüllten Konfiguration bereits eine fast ebenso große zusätzliche Reduktionen verursacht. Es besteht hier ein offensichtliches Optimierungspotential der Füllmenge in Kombination mit dem Deckeldesign. Dies soll in weiterführenden Studien näher untersucht werden.

Zusammenfassung

Im Beitrag wurde ein Konzept zur Schwingungsdämpfung präsentiert, das die vorteilhaften Dämpfungseigenschaften granularer Materialien ausnutzt. Zur Demonstration wurde Sand als granulares Medium genutzt. Sand hat viele Vorteile, wie beispielsweise den Preis, die Verfügbarkeit und die Umweltfreundlichkeit. Die hohe Wirksamkeit von Sand wurde experimentell mit Hilfe von Schwingungsmessungen nachgewiesen. Die entwickelte Leichtbauversion eines Ölwannendeckels mit sandgefüllter Kavität ist 17.8 % leichter als der Originaldeckel und senkt die Schwingungsamplituden im Mittelwert um etwa 8 dB und im Maximalwert um über 26 dB im Vergleich zum originalen Ölwannendeckel ab.
Die Untersuchung verschiedener Sandarten mit unterschiedlichen Korngrößen als Füllmaterialien sowie die gezielte Studie von definiert teilgefüllten Honeycomb-Strukturen ist Teil aktueller Untersuchungen. Honeycomb-Strukturen bieten dabei nicht nur die Möglichkeit zur definierten Teilfüllung, sondern zeichnen sich durch ein geringes Gewicht und eine sehr hohe Steifigkeit aus. Zukünftig ist geplant, die daraus entstehenden Konzepte an einem laufenden Verbrennungsmotor zu applizieren und hinsichtlich der resultierenden Schallabstrahlung mit Hilfe eines Mikrofonarrays an einem Motorprüfstand zu vermessen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes „COmpetence in MObility – Automotive“, das mit Geldern des Europäischen Strukturfonds und des Landes Sachsen-Anhalt gefördert wird.

Literatur

[1] Schrader, P.; Duvigneau, F.; Luft, T.; Gabbert, U.; Rottengruber H.: Development, Simulation and Experimental Investigation of a Function-Integrated and Foam Damped Oil Pan for a Two Cylinder Diesel Engine. 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – InterNoise 2015.

[2] Duvigneau, F.; Luft, T.; Hots, J.; Verhey, J.L.; Rottengruber H.; Gabbert, U.: Thermo-acoustic performance of full engine encapsulations - A numerical, experimental and psychoacoustic study. Applied Acoustics, Volume 102, 15 January 2016, Pages 79-87. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.09.012.

[3] Duvigneau, F.; Koch, S.; Woschke, E.; Gabbert, U.: An effective vibration reduction concept for automotive applications based on granular-filled cavities. Journal of Vibration and Control, 2016. DOI: 10.1177/1077546316632932.