

Vergleich verschiedener Konzepte zur passiven Reduktion der Schallabstrahlung eines Verbrennungsmotors

Fabian Duvigneau, Peter Schrader, Hans Schapitz, Tommy Luft, Sebastian Koch, Hermann Rottengruber, Ulrich Gabbert

Abstract

In this paper, several approaches to reduce the sound emission of combustion engines through passive measures are presented and compared. The different passive approaches are demonstrated with the help of a two cylinder diesel engine. The focus in the comparison of the concepts is on the additional mass required, the achievable noise level reduction and the ease of implementation. The original configuration of the engine is used as the reference configuration for all of the presented approaches. First, a full engine encapsulation is investigated due to its thermoacoustic efficiency. In comparison the application of aluminum and polyurethane foams on the surface of a functionally-integrated oil pan is studied. Beside the acoustical point of view, both concepts also increase the heat storage in the engine oil which leads to a better efficiency of the engine and a reduction in the amount of emitted pollution. Consequently, these concepts increase the environmental friendliness of the car, which is increasingly a major focus of automotive engineers. Furthermore, the warm up of the heating system is sped up. Finally, a new concept is presented that uses the high damping potential of granular materials. Therefore, the bottom of the two-piece oil pan of the diesel engine is replaced by a fillable bottom. In the development processes of the prototypes for the four presented concepts, numerical simulations based on the finite element method are used to evaluate different design configurations with regards to their acoustic behavior. The experiments are then executed on an acoustic engine test bench.

Kurzfassung

Im Beitrag werden die Entwicklung und Erprobung verschiedener passiver Ansätze zur Reduktion der Schallabstrahlung von Verbrennungsmotoren am Beispiel eines Zweizylinder-Dieselmotors vorgestellt und miteinander verglichen. Im Fokus des gleichs stehen die eingesetzte Masse, die erreichte Pegelreduktion sowie die Praxistauglichkeit der untersuchten Konzepte. Alle Konzepte werden der originalen Motorkonfiguration gegenübergestellt. Zunächst wird das Potential einer thermoakustischen Motorvollkapselung hinsichtlich der erreichbaren Wärmespeicherung und der Schalldämmung aufgezeigt. Im Vergleich dazu wird die Schallreduktion des Motors infolge der Substitution der Ölwanne durch eine mit Aluminium- und Kunststoffschäumen verkleidete funktionsintegrierte Ölwanne studiert. Beide Konzepte führen neben der Schallpegelreduktion zu einer erhöhten Wärmespeicherung. Auf diese Weise kann eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und eine Erhöhung des Wirkungsgrads des Motors erreicht werden. Dies führt zu einem kundenwerten Vorteil in Bezug auf die Ansprechzeiten der Fahrzeugheizung und trägt zur Umweltfreundlichkeit der Motoren bei. Abschließend wird die Ölwanne

mit einem alternativen Deckel versehen, der mit einem granularen Medium gefüllt ist, wodurch eine Schwingungsdämpfung der Ölwanne und eine reduzierte Schallabstrahlung erreicht werden. Die Entwicklung der Prototypen wurde durchgängig mit Simulationen auf Basis der Finiten Elemente Methode unterstützt, um unterschiedliche Designvarianten vorab bewerten zu können. Der Nachweis der akustischen Effekte der verschiedenen Maßnahmen erfolgt durch Messungen an einem dynamischen Akustik-Motorprüfstand.

1. Potentiale einer thermoakustischen Motorkapselung

Es wurden mehrere Varianten von thermoakustischen Vollkapselungen für einen kompakten Verbrennungsmotor entwickelt und vergleichend bewertet. Bild 1 veranschaulicht den Kapselaufbau von zwei Prototypen (P1 und P2) am Motorprüfstand. Das verwendete Kapselmaterial besteht aus einem schallweichen Polyurethan-Schaumstoff mit einer Temperaturbeständigkeit bis 160 °C vor einer schallharten Außenwand. Für die Kapselung der Abgasanlage wurden aufgrund der höheren Temperaturen Mineralwolle und perforierte Aluminiumbleche zur thermischen Abgrenzung verwendet. Diese Bleche fungieren zusätzlich als Helmholtz-Resonator.

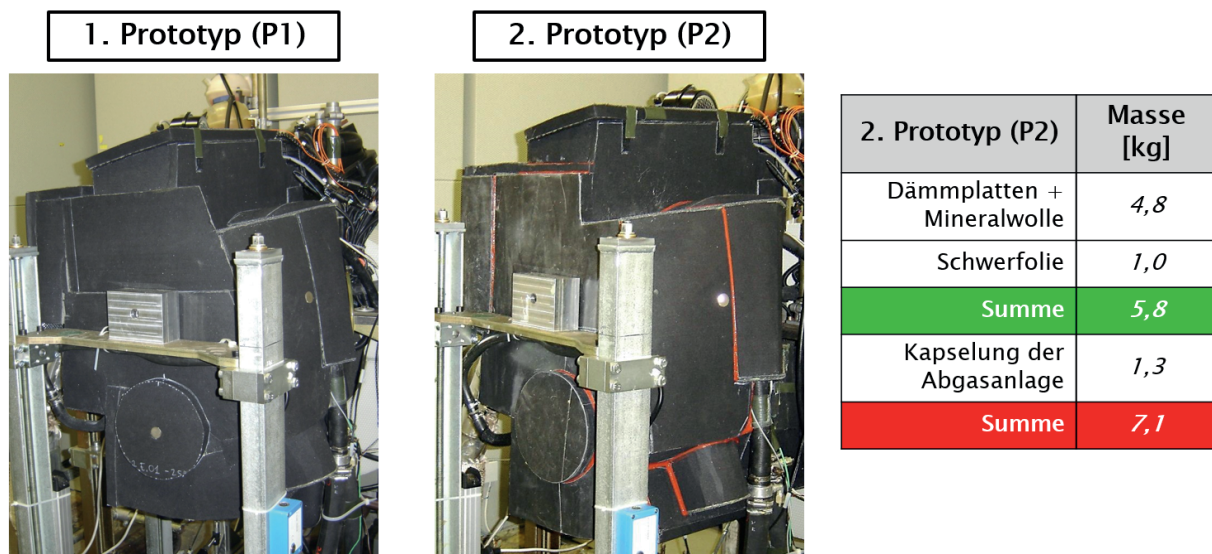


Bild 1: Erster und zweiter Prototyp einer thermoakustischen Motorkapsel (links), Teilmassenangaben des Prototyps 2 (rechts)

Aus der akustischen Untersuchung des ersten Kapselprototyps (P1) ergaben sich einige Verbesserungsmöglichkeiten, die beim Aufbau des zweiten Prototyps (P2) genutzt wurden. Akustische Leckagen wurden mit einer akustischen Kamera detektiert und mittels Silikon abgedichtet. Zudem wurde mit Hilfe von Entkopplungen versucht, die auftretenden Körperschalltransmissionen zu reduzieren. Diese Konfiguration der Motorkapsel wird im Folgenden P2 genannt. Abschließend kam beim Prototyp P2 an ausgewählten Oberflächen (motorstirnseitig) Schwerfolie zum Einsatz. Diese Konfiguration mit Schwerfolie wird nachfolgend P2+ genannt. Mit Hilfe

der Schwerfolie können die Amplituden von Frequenzen unterhalb von 1 kHz besser reduziert werden [1].

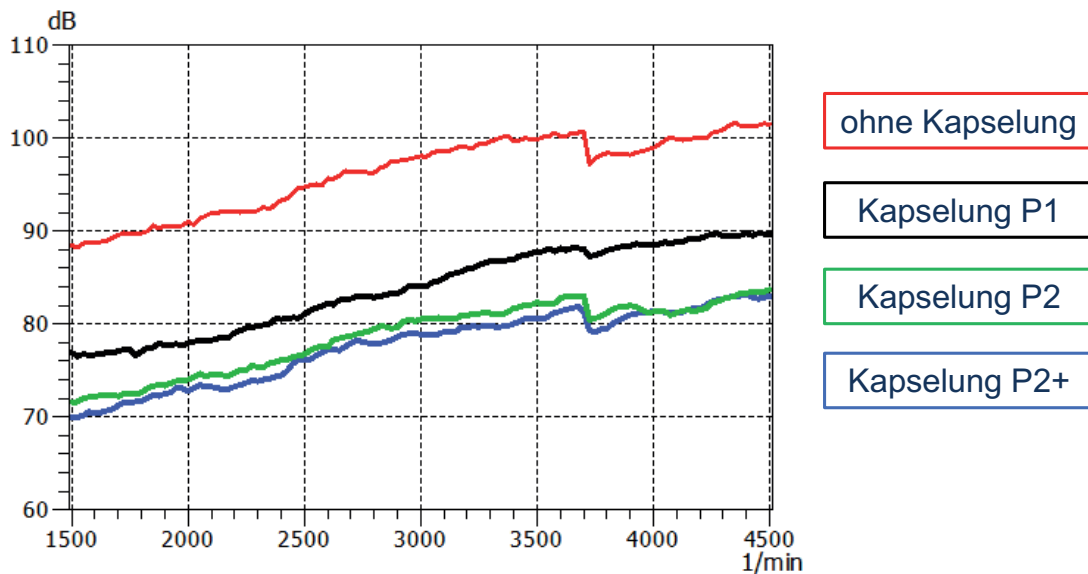


Bild 2: Motorhochläufe der verschiedenen Kapselungen und des ungekapselten Motors bei einer mittleren Last von 50 Nm

Bild 2 zeigt für die Motorhochläufe von 1500 - 4500 U/min für die verschiedenen Konfigurationen mit und ohne Kapselung den über den gesamten hörbaren Frequenzbereich (0,15 - 16 kHz) ermittelten Schalldrucksummenpegel in dB. Es ist deutlich zu erkennen, dass P1 bereits für alle durchfahrenen Drehzahlen bis 3700 U/min eine deutliche Reduktion von durchschnittlich 13 dB und für die Drehzahlen über 3700 U/min von 10 dB bewirkt. Die aus P1 weiterentwickelte Konfiguration P2 zeigt gegenüber dem ungekapselten Motor für alle Drehzahlen eine ungefähr konstante Pegelreduktion von 17 dB. Der Einsatz der Schwerfolie bei P2+ bewirkt für Drehzahlen unterhalb von 4000 U/min im Vergleich zu P2 eine zusätzliche Reduktion von etwa 2 dB.

Eine psychoakustische Analyse der verschiedenen Kapselvarianten hat gezeigt, dass die Vollkapselung mit einer zusätzlichen Schwerfolie (P2+) keinen Mehrwert hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung bewirkt [1]. Folglich erschließt sich durch Berücksichtigung psychoakustischer Parameter ein Einsparungspotential bezüglich der Masse und den Kosten. Aus diesem Grund ist es wichtig, bei numerischen Analysen zum akustischen Verhalten von Motoren zukünftig auch psychoakustische Modelle zu verwenden [2].

Hinsichtlich der Wärmespeicherung im Motoröl zeigen die Messergebnisse vom Motorprüfstand eine deutliche Verbesserung infolge der thermoakustischen Kapselung. Nach sechs Stunden beträgt der Temperaturunterschied im Motoröl zwischen dem Motor ohne Kapselung und mit dem zweiten Kapselprototyp (P2) etwa 20 K und nach acht Stunden etwa 16 K.

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Vollkapselung demonstriert das große Potential von Motorkapselungen hinsichtlich der akustischen und thermischen Wirksamkeit. Bild 1 verdeutlicht jedoch auch zwei wesentliche Schwachpunkte der hier präsentierten Kapselkonfigurationen. Die optimierte Motorkapsel verursacht eine Zusatzmasse von 7,1 kg und eine Volumenvergrößerung von etwa 70%. So viel

Bauraum steht in einem Motorraum üblicherweise nicht zur Verfügung. Demzufolge ist davon auszugehen, dass bauraum- und gewichtsoptimierte Kapselvarianten eine wesentlich geringere akustische und thermische Effizienz aufweisen. Trotzdem sind Motorvoll- und Teilkapselungen sehr attraktiv und werden zunehmend in der Automobilindustrie eingesetzt.

2. Thermoakustische Wirksamkeit von applizierten Aluminium- und Kunststoffschäumen auf einer funktionsintegrierten Ölwanne

Als ein zweites Konzept zur passiven Reduktion der Schallabstrahlung wird in diesem Kapitel die akustische und thermische Wirksamkeit von applizierten Aluminium- und Kunststoffschäumen am Beispiel einer funktionsintegrierten Ölwanne vorgestellt.

Zunächst wurden auf Basis eines ersten Konstruktionsentwurfs der funktionsintegrierten Ölwanne numerische Simulationen hinsichtlich des Schwingungsverhaltens durchgeführt [3]. Bild 3 zeigt dazu die Ergebnisse verschiedener Verrippungsvarianten des Ölwannebodens. Das verwendete Simulationsmodell für die erforderlichen Finite Element Analysen ist Bild 4 zu entnehmen. Es konnte mit Hilfe von numerischen Analysen gezeigt werden [4], dass Verrippungen zu einer signifikanten Reduktion der Schallabstrahlung führen, so dass es sich lohnt, zukünftig im Rahmen von Optimierungsrechnungen eine ideale Rippenkonfiguration zu ermitteln.

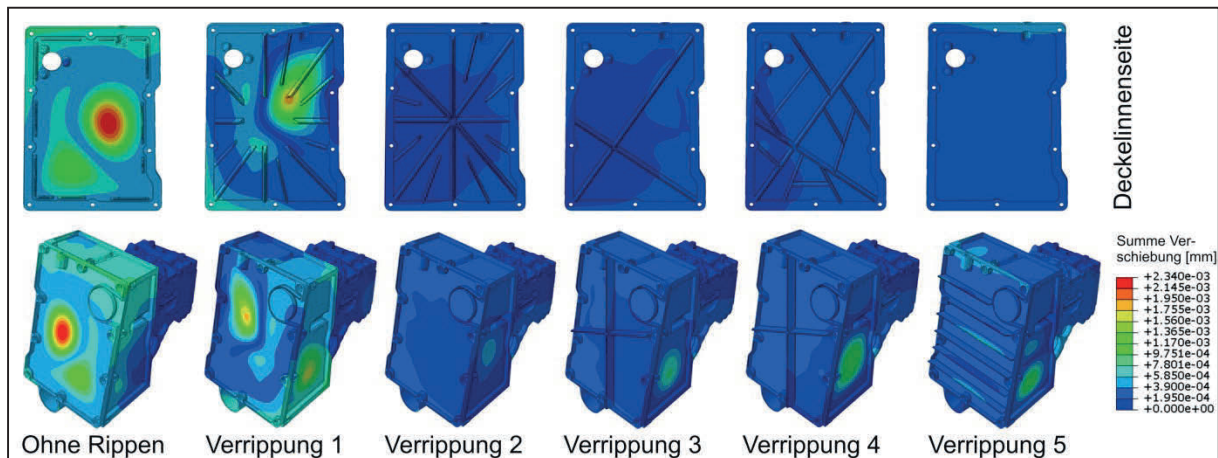


Bild 3: Vergleich der resultierenden Strukturschwingungen verschiedener Rippenvarianten für den Ölwanneboden der funktionsintegrierten Ölwanne

Von den hier untersuchten Verrippungsvarianten stellte sich die Variante 2 als die wirkungsvollste Konfiguration heraus (siehe Bild 3) und wurde aus diesem Grund für den entwickelten Prototyp real umgesetzt. Im Bild 4 ist der Aufbau des Prototyps der funktionsintegrierten Ölwanne dargestellt. Auf die Rippen des Ölwannebodens wurde ein Verdrängungskörper aus hitze- und ölbeständigen Kunststoff angebracht, um die Menge des benötigten Öls zu reduzieren und so Masse und Verbrauchsmittel zu sparen. In den Bildern 4 und 5 sind außerdem die Regionen zu erkennen, in denen die verschiedenen Schäume appliziert wurden. Darüber hinaus ist in Bild 5 der

in die Ölwanne integrierte Ölfiler und Wärmetauscher zu erkennen. Da im vorliegenden Beitrag die thermoakustische Wirksamkeit der applizierten Schäume im Fokus steht, wird nicht weiter auf die Auswirkungen der Funktionsintegration eingegangen.

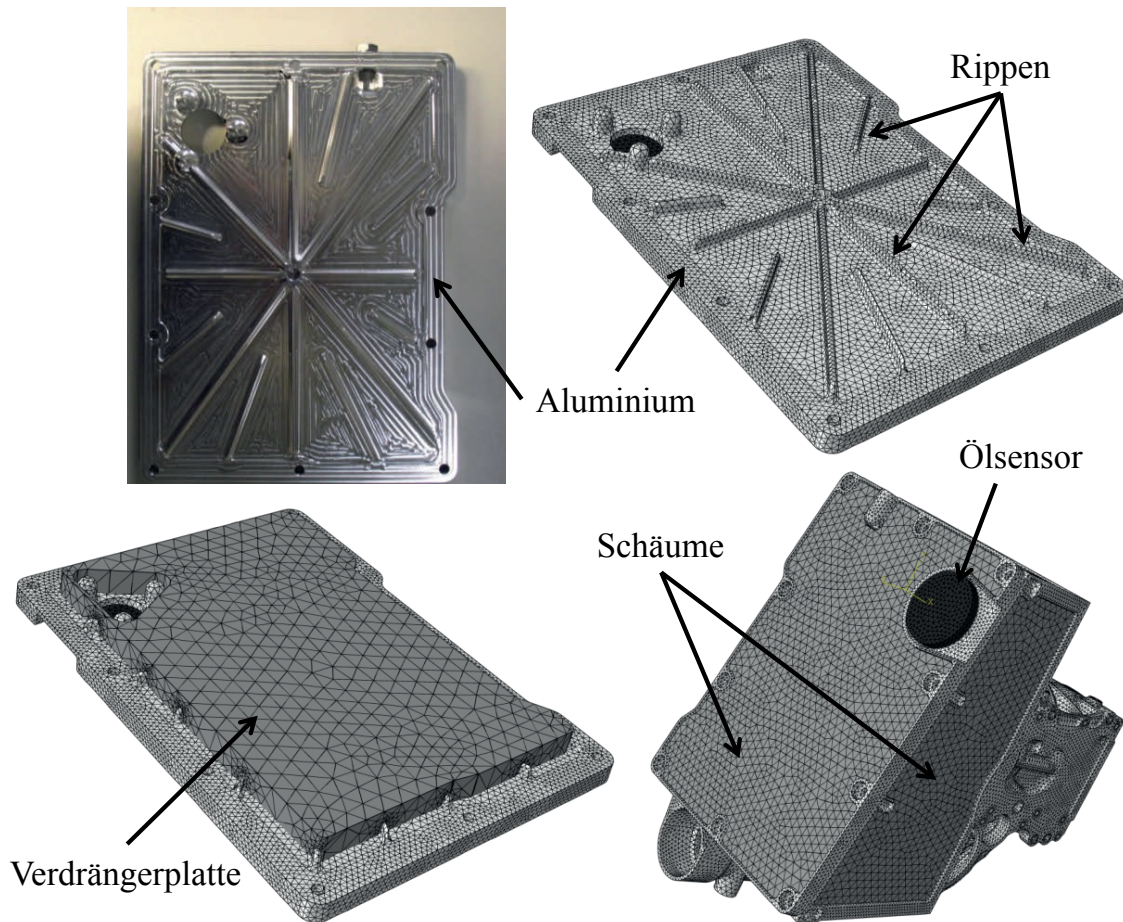


Bild 4: Gefertigter Ölwanneboden (links oben) und FE-Simulationsmodell der funktionsintegrierten Ölwanne

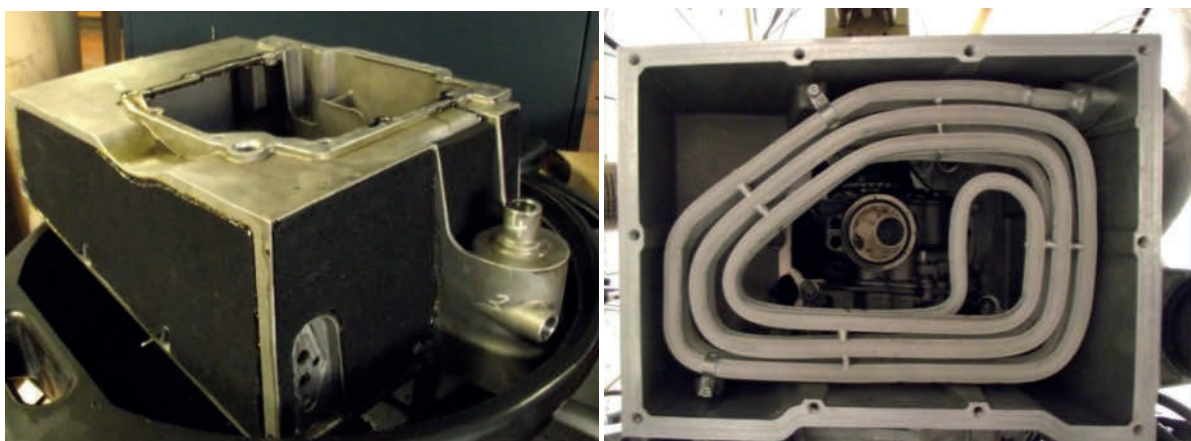


Bild 5: Prototyp der funktionsintegrierten Ölwanne. Links: Ansicht mit appliziertem Kunststoffschaum und Ölfiler. Rechts: Blick von unten in die geöffnete Ölwanne mit integriertem Wärmetauscher.

Alle mit Hilfe des Prototyps aus Bild 5 am Motorprüfstand untersuchten Schäume sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihres Materials, ihrer Dicke, Porosität und Steifigkeit. Mit der Kolorierung in der Tabelle wurden Aluminiumschäume, steife Kunststoffschäume, Kapselungsschäume mit Versteifung und weiche Kunststoffschäume unterschieden. Der Absorptionsgrad α wurde mit angegeben, wenn dieser seitens der Hersteller verfügbar war, wobei die mit angegebene Eckfrequenz das Erreichen eines hohen Absorptionsgrades im Frequenzbereich kennzeichnet. Zusätzlich wurde die Methode, mit der der Absorptionsgrad bestimmt wurde, angegeben.

Tabelle 1: Am Motorprüfstand untersuchte Aluminium- und Kunststoffschäume

Nr.	Dicke [mm]	$\alpha_{\text{eck}} [-]$ 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

In Bild 6 sind die Schalldrucksummenpegel der Ölwanne mit den verschiedenen Schäumen aus Tabelle 1 für einen stationären Betriebspunkt (2000 U/min, 47 Nm) angegeben. Die weniger steifen Schäume weisen allesamt einen geringeren Schalldruckpegel als der blanke Ölwanneboden auf. Die größte Pegelreduktion von 1,2 dB bewirkt Schaum Nr. 8, welcher von den nicht-metallischen Schäumen das höchste Flächengewicht besitzt. Bei allen anderen Schäumen fällt die Pegelreduktion geringer aus. Der paarweise Vergleich der Ergebnisse von Schaum Nr. 10 und 11 und von Schaum Nr. 6 und 7 zeigt, dass das Aufbringen einer Akustik-Alufolie einen positiven Effekt hat. Die perforierte, gewellte Alufolie bewirkt dabei nicht nur einen akustischen Kurzschluss, sondern wirkt auf den elastischen Schäumen als zusätzliche Masse, welche dämpfend wirkt und die Schallenergie-dissipation innerhalb des Schaumes verstärkt.

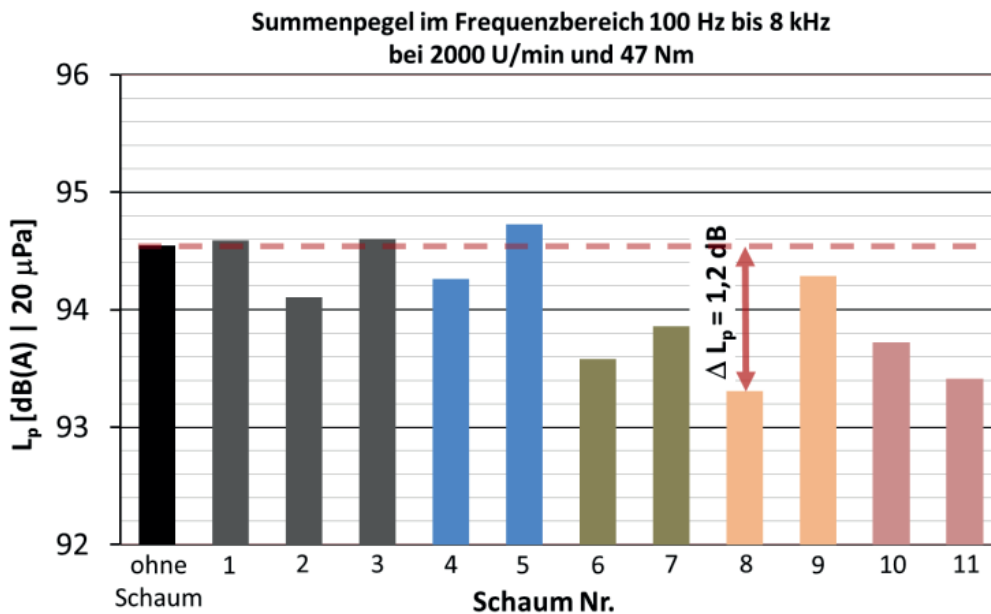


Bild 6: Schalldrucksummenpegel der mit den verschiedenen Schäumen beklebten Ölwanne im Frequenzbereich von 0,1 kHz bis 8 kHz

Die Messungen der Öltemperaturabklingkurven am Prüfstand haben gezeigt, dass die funktionsintegrierte Ölwanne einen deutlichen Vorteil hinsichtlich der thermischen Effizienz bewirkt. Gegenüber der originalen Ölwanne dauerte das Abkühlen auf eine Temperatur von 40 °C fast 2 Stunden länger. Die zusätzliche Wärmespeicherung ist damit trotzdem wesentlich geringer als die der zuvor untersuchten Vollkapselung. Die funktionsintegrierte Ölwanne benötigt viel zusätzlichen Bauraum und bewirkt eine signifikante Massenerhöhung. Aus diesem Grund wurde ein verkleinerter seriennaher Prototyp entwickelt [4]. Dieser seriennahe Prototyp ist 1,55 kg leichter als der erste Prototyp (jeweils ohne Öl) und in Bild 7 abgebildet.

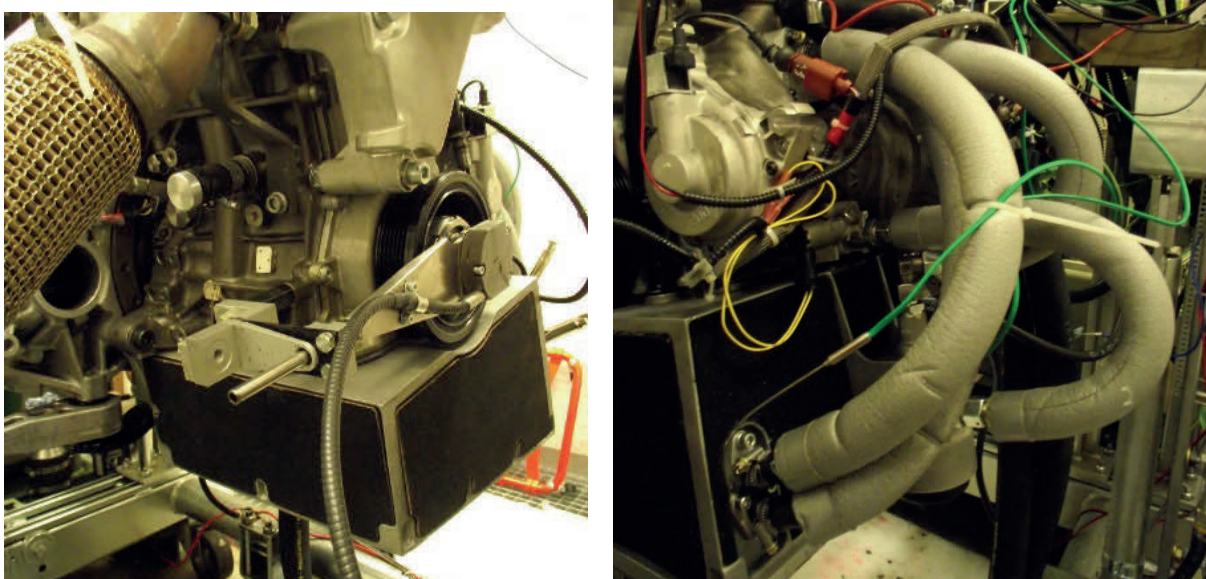


Bild 7: Seriennaher Prototyp der funktionsintegrierten Ölwanne am Motorprüfstand mit appliziertem Kunststoffschäum

Obwohl der seriennahe Prototyp deutlich kleiner ist, dauerte die Abkühlung auf eine Temperatur von 40 °C etwa 20 Minuten länger als beim ersten Prototyp. Aufgrund der kleineren Ölmasse im seriennahen Prototyp nimmt die Schwingungsdämpfende Wirkung des Öles ab. Deshalb wurde am seriennahen Prototyp ohne Schaum eine Schalldruckpegelreduktion gegenüber der originalen Ölwanne von nur 0,6 dB gemessen. Insgesamt konnte durch die Applikation eines zweilagigen Kunststoffschaumes infolge der Feder-Masse-Wirkung eine Pegelreduktion von 3,7 dB gegenüber der originalen Ölwanne erzielt werden. Somit bewirkt die Applikation eines geeigneten Schaummaterials eine Pegelreduktion von 3,1 dB. Bild 8 zeigt den Vergleich des seriennahen Prototyps der funktionsintegrierten Ölwanne mit und ohne Schaum.

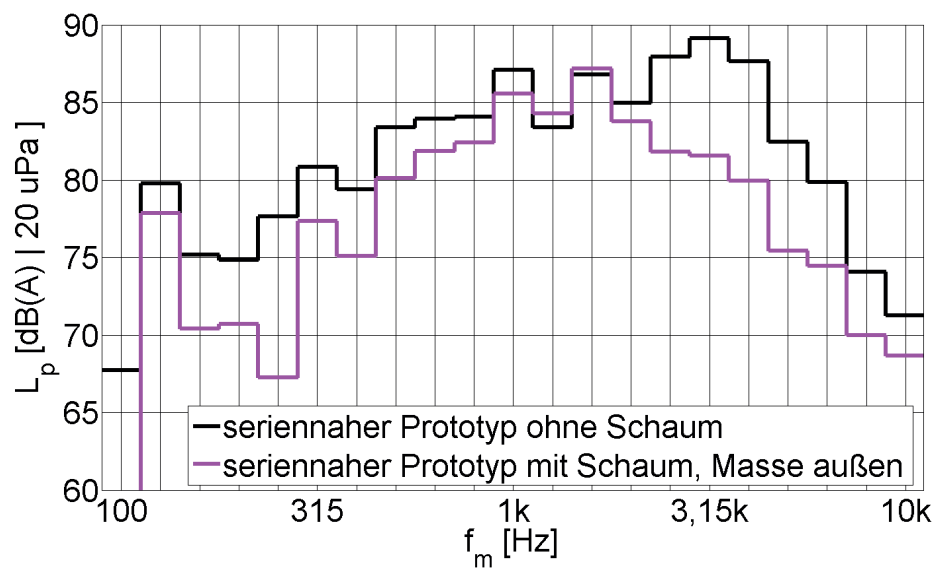


Bild 8: Schalldrucksummenpegel des seriennahen Prototyps der funktionsintegrierten Ölwanne mit und ohne Applikation von Schaummaterial

Trotz der Verkleinerung erfordert der entwickelte seriennahe Prototyp der funktionsintegrierten Ölwanne immer noch viel zusätzliche Masse und Bauraum. Folglich hängt es von der konkreten Problemstellung der Anwendung ab, ob der positive thermische Effekt diese Nachteile rechtfertigt.

Die reine Betrachtung des Konzeptes der applizierten Schäume ohne Berücksichtigung der funktionsintegrierten Ölwanne führt zu einem etwas anderen Ergebnis. Die Applikation von Schaummaterialien erfordert wesentlich weniger Bauraum und bewirkt nur eine geringere Massenerhöhung. Allerdings ist die akustische Wirksamkeit stark vom verwendeten Material abhängig. Kunststoffschäume sind deutlich vorteilhafter als Aluminiumschäume. Die reine Applikation des Schaummaterials am seriennahen Prototyp als Feder-Masse-System bewirkt eine Pegelreduktion von maximal 3,1 dB. Die thermische Wirksamkeit ist mit einer Temperatursteigerung von 2 °C nach sechs und 1,5°C nach acht Stunden gegenüber einer Vollkapselung vergleichsweise gering.

Zusammenfassend bedeutet das, dass eine Vollkapselung thermisch und akustisch deutlich vorteilhafter ist. Die Applikation von Kunststoffschäumen kann interessant sein, wenn eine Vollkapselung aufgrund von Bauraumlimitationen nicht in Frage kommt. Bei der Verwendung von Kunststoffschäumen als Feder-Masse-System ist

das präsentierte Konzept dem einer Teilkapselung ähnlich und unterscheidet sich im Wesentlichen nur durch die Art der Fixierung.

3. Alternatives Dämpfungskonzept auf Basis granularer Medien

Nachfolgend wird ein passives Dämpfungskonzept präsentiert, das die dissipativen Eigenschaften granularer Medien ausnutzt. Als Anwendungsbeispiel dient die zweiteilige Ölwanne des auch für die vorherigen Untersuchungen genutzten Dieselmotors. Das Konzept basiert darauf, den Boden der Ölwanne durch einen Boden mit befüllbarer Kavität zu ersetzen (siehe Bild 9). Es ist das Ziel, die Strukturschwingungen als Ursache der akustischen Emissionen zu reduzieren. Als granulares Medium dient hier zunächst Sand, der sich durch folgende Vorteile auszeichnet. Sand ist billig, fast überall verfügbar, alterungs- und temperaturbeständig, umweltunbedenklich und auch problemlos recyclebar.

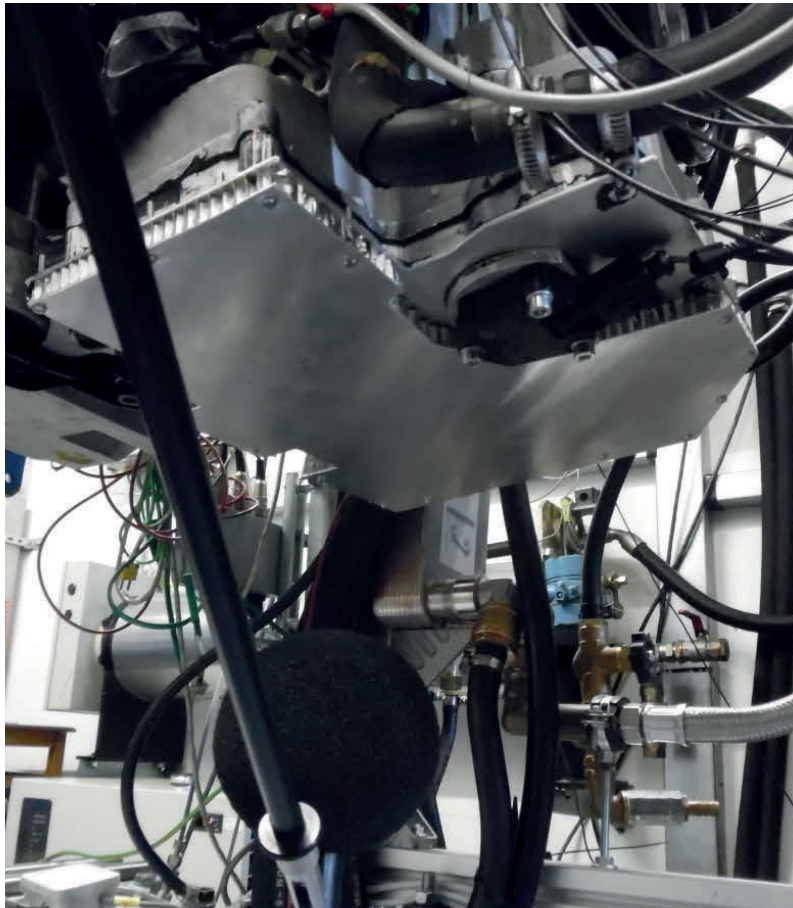


Bild 9: Am Motorprüfstand montierter Honigwabenboden der Ölwanne

Dieses Konzept wurde bereits in [5] vorgestellt. Nachfolgend wird eine Weiterentwicklung vorgestellt, bei der Honigwaben genutzt werden. Diese haben den Vorteil, dass sie als Verbund sowohl sehr leicht als auch sehr steif sind. Zudem kann mit Hilfe einer Honigwabenstruktur eine kontrollierte Teilfüllung des Ölwannendeckels erreicht werden. In Bild 10 ist eine solche Teilfüllung dargestellt.

Der entwickelte Ölwannendeckel besteht aus zwei Teilen. Der untere Teil ist die Honigwabenstruktur (siehe Bild 10), die separat abnehmbar ist, um den Befüllungszustand am Prüfstand ändern zu können. Die Honigwabenstruktur wird mittels Schrauben am oberen Teil des entwickelten Deckels befestigt. Der obere Teil ist eine plattenförmige Struktur, die zum einen den unteren Teil hält und zum anderen den eigentlichen Abschluss der Ölwanne darstellt. Der Fokus bei der Entwicklung dieses Prototyps lag darauf, die Befüllung der Honigwaben problemlos ändern zu können, ohne das Öl ablassen zu müssen.

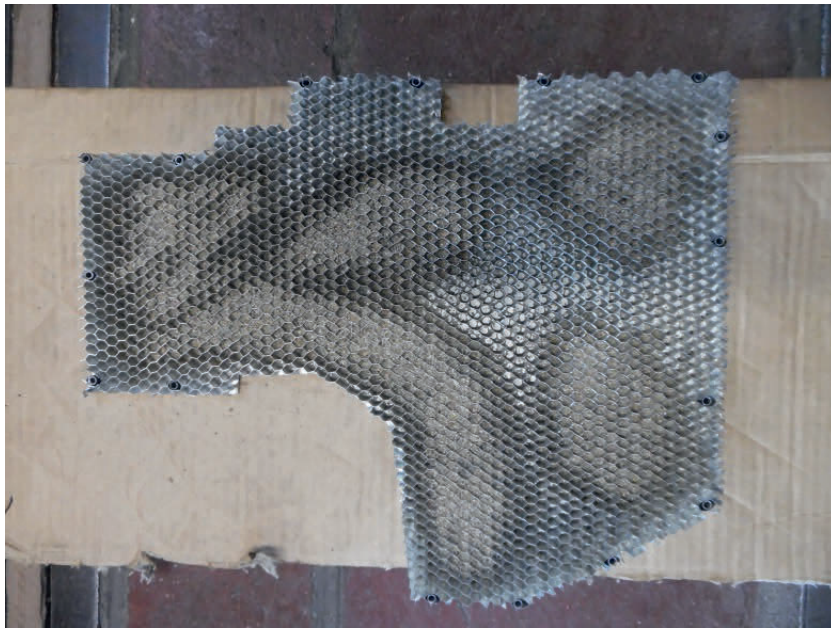


Bild 10: Optimierte Sandfüllung der Honigwabenstruktur

In Bild 10 ist eine spezielle Teilfüllung dargestellt, die sich im Rahmen von Voruntersuchungen als optimal hinsichtlich der erforderlichen Masse und der erzielbaren akustischen Wirksamkeit herausgestellt hat. In den Voruntersuchungen wurde die Füllung der Honigwabenstruktur variiert und die Schwingungsantwort des Ölwannenbodens mit Hilfe eines Laservibrometers gemessen. Als Anregungsquelle diente ein elektrodynamischer Schwingungserreger. Die Voruntersuchungen wurden an der vom Motor getrennten Ölwanne durchgeführt.

In Bild 11 ist der für die akustischen Messungen genutzte Motorprüfstand mit einem Einzelmikrofon und einem Mikrofonarray zu sehen. Das Einzelmikrofon wurde mittig unter dem Ölwannenboden positioniert und das Mikrofonarray parallel zum Ölwannenboden ausgerichtet und jeweils einmal verschoben, um die gesamte Fläche des Ölwannenbodens abscannen zu können.

Insgesamt wurden am Prüfstand drei verschiedene Konfigurationen vermessen: der Originaldeckel, der Deckelprototyp mit leerer Honigwabenstruktur und der Prototyp mit gefüllten Honigwaben. Die verwendete Füllung ist in Bild 10 gezeigt. Im Bild 12 sind die Ergebnisse der Arraymessung für die drei unterschiedlichen Konfigurationen für den gleichen Betriebspunkt dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits der ungefüllte Prototyp eine Verbesserung bewirkt, aber der zusätzliche Effekt durch die Sandfüllung wesentlich größer ist.

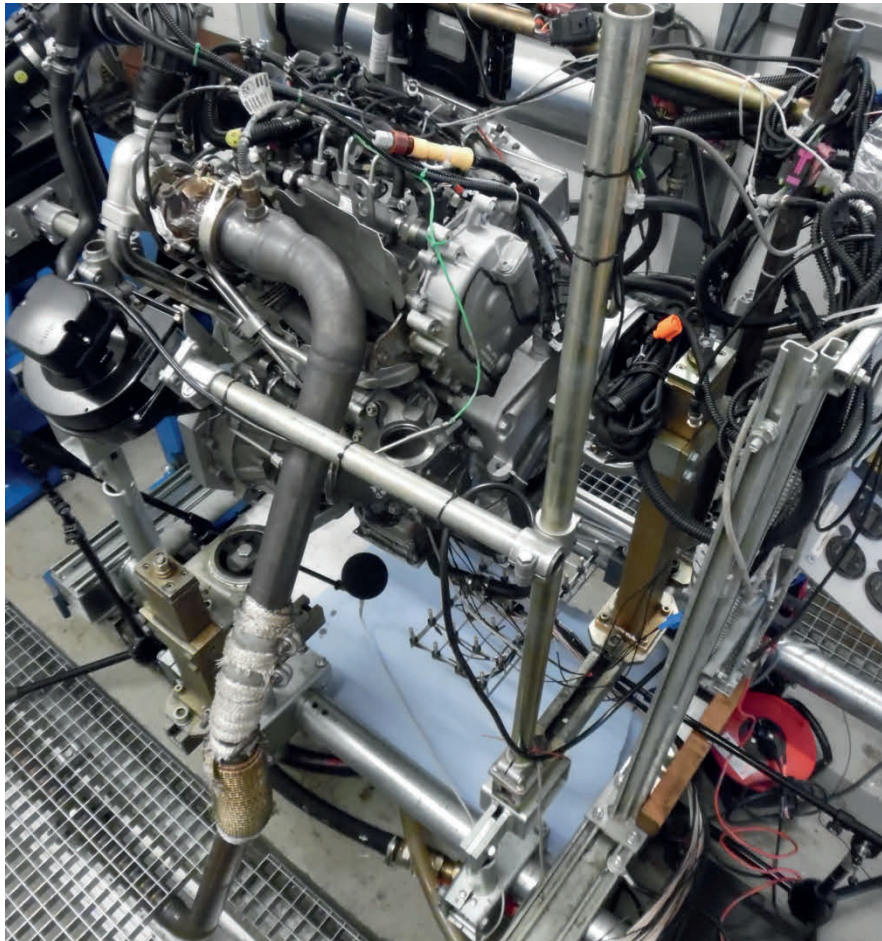


Bild 11: Motorprüfstand mit Mikrofonarray und Einzelmikrofon

Die Unterschiede zwischen den drei Konfigurationen in Bild 12 betragen allerdings lediglich 2 dB. Die Verbesserung durch die Sandfüllung fällt damit wesentlich geringer aus, als es in den Vorstudien der Fall war. Auch die Motorhochläufe in Bild 13 zeigen, dass der Effekt der Sandfüllung zwar messbar aber vergleichsweise klein ist.

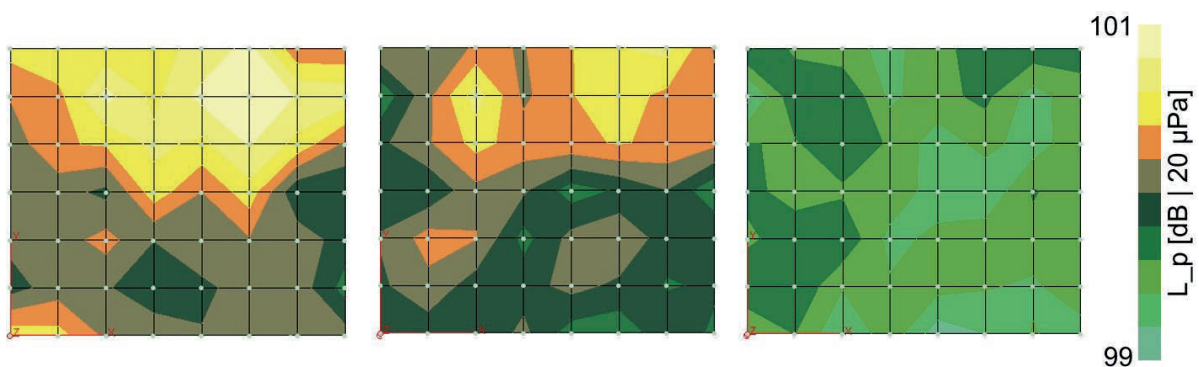


Bild 12: Schalldruckverteilung des Ölwannebodens bei 2000 min^{-1} und 80 Nm mit dem Originaldeckel (links), dem Deckelprototyp mit ungefüllter Honigwabenstruktur (Mitte) und der optimierten Teilfüllung (rechts)

Zudem wird deutlich, dass die Dämpfungswirkung durch die Sandfüllung in Frequenzen über 3 kHz zunimmt, während der Effekt im Frequenzbereich von 0,5 bis 3 kHz lediglich marginal ist und die Sandfüllung für Frequenzen unter 0,5 kHz sogar teilweise eine Verschlechterung bewirkt.

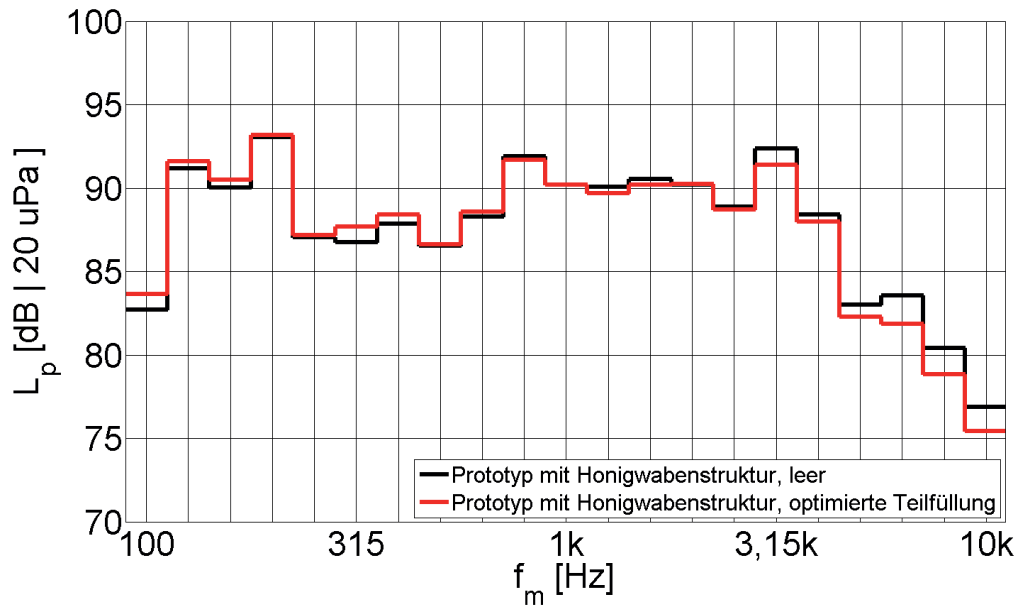


Bild 13: Schalldruckpegel für Motorhochläufe von $1500-4000 \text{ min}^{-1}$ und 50 Nm Last

Diese Effekte wurden in den Voruntersuchungen nicht beobachtet. Zum Vergleich ist in Bild 14 die Reduktion des Schallschnellepegels des Ölwannebodens dargestellt, die mit Hilfe der optimierten Teilfüllung im Rahmen der Voruntersuchungen erreicht wurde. Aufgrund der Wahl des Anregungsmechanismus konnte in den Voruntersuchungen ausschließlich der Frequenzbereich bis 2 kHz untersucht werden, also der Bereich, in dem in Bild 13 durch die Sandfüllung nur marginale Verbesserungen oder sogar Verschlechterungen zu erkennen sind. Im Gegensatz dazu zeigt Bild 14 in keinem Terzband eine Verschlechterung und für Frequenzen über 200 Hz immer eine minimale Reduktion von etwa 5 dB. Dabei werden auch teilweise Pegeldifferenzen von bis zu 13 dB erreicht. Eine wichtige Eigenfrequenz bei 254 Hz wird fast vollständig bedämpft.

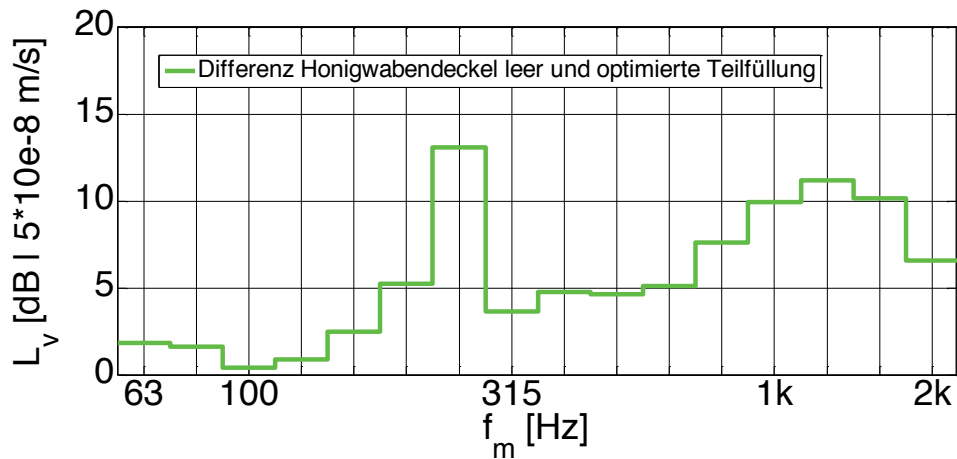


Bild 14: Differenz der auf dem Ölwanneboden gemessenen Schallschnellepegel des Honigwabendeckels mit und ohne Sandfüllung

Eine mögliche Begründung der Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Voruntersuchung und den Messergebnissen am Motorprüfstand ist, dass am Motorprüfstand das Gesamtgeräusch des Verbrennungsmotors und nicht nur die Schallabstrahlung der Ölwanne gemessen wird. Außerdem stand kein Akustik-Motorprüfstand zur Verfügung. Demzufolge haben die Geräusche der Prüfstandstechnik und vor allem die zahlreichen Reflexionen an den Wänden des verhältnismäßig kleinen Raumes einen wesentlichen Einfluss. Wird in dieser Umgebung eine Schallquelle eliminiert, muss das nicht zu einer signifikanten Reduktion des Gesamtgeräusches führen. Mit Hilfe von akustischen Messungen in einem Freifeldraum soll in einer weiterführenden Studie geklärt werden, ob das vorgestellte Konzept eine signifikante Reduktion der Schallabstrahlung der Ölwanne bewirkt.

In jedem Fall ist der befüllbare Prototyp so ausgeführt worden, dass er auch mit der optimierten Teilfüllung etwa 6% leichter als der Originaldeckel ist. Zusätzlich benötigt der entwickelte Honigwabendeckel auch nicht mehr Bauraum als der originale Deckel der Ölwanne. Insofern ist das hier vorgestellte Konzept durchaus interessant, auch wenn dessen am Motorprüfstand erreichte Pegelreduktion hier nur etwa 2 dB betrug. Zugunsten einer größeren Gewichtsreduktion könnte zusätzliches Füllmaterial eingespart werden. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass auch geringe Füllmengen bereits große Effekte erzielen.

4. Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden drei verschiedene Konzepte zur passiven Reduktion der Schallabstrahlung eines Verbrennungsmotors präsentiert und hinsichtlich ihrer thermischen und akustischen Wirksamkeit auf einem Motorprüfstand verglichen. Dabei hat sich die thermoakustische Vollkapselung sowohl hinsichtlich der Akustik als auch der Wärmespeicherung als die effektivste Methode erwiesen. Allerdings ist die Vollkapselung sehr empfindlich gegenüber Leckagen. Nachteilig sind der zusätzlich benötigte Bauraum und die erforderliche Zusatzmasse (7 kg bei P2+). Der optimierte Vollkapselprototyp P2+ führt zu einer Pegelreduktion von 17-19 dB und bewirkt eine deutlich längere Wärmespeicherung im Motoröl.

Die Applikation von Aluminiumschäumen hat sich als ineffizient erwiesen. Die Applikation eines wesentlich leichteren Kunststoffschäummaterials am seriennahen Prototyp der funktionsintegrierten Ölwanne führte hingegen zu einer Pegelreduktion von ca. 3 dB bei etwas über 0,5 kg Zusatzmasse. Die thermische Wirksamkeit dieser Maßnahme ist aber vergleichsweise gering.

Das Einbringen von granularen Medien im Boden der Ölwanne bewirkte mit nur 2 dB die geringste Pegelreduktion. Dennoch ist dieses Konzept interessant, da der befüllbare Prototyp mit einer optimierten Teilfüllung leichter als der Originaldeckel ausgeführt werden kann. Dabei wird kein größerer Bauraum als beim originalen Deckel benötigt. Außerdem haben Voruntersuchungen gezeigt, dass die Reduktion der Ölwannenschwingungen sehr groß ist und auch mit geringeren Füllmengen bereits große Effekte zu erzielen sind.

Der Vergleich der verschiedenen Konzepte im vorliegenden Beitrag zeigt, dass es in Abhängigkeit vom konkreten Anwendungsfall (Bauraum, Masse, Preis, Wärmespeichervermögen, Schallemission) möglich ist, mehrere Ziele gleichzeitig zu erreichen.

5. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des Verbundprojektes „Competence in MObility – Automotive“ und der „Landesinitiative Elektromobilität und Leichtbau – ELISA“, welche mit Geldern des Bundeslandes Sachsen-Anhalt und der Europäischen Union gefördert wird. Die Autoren bedanken sich für die gewährte finanzielle Förderung.

Literatur

- [1] F. Duvigneau, T. Luft, J. Hots, J. L. Verhey, H. Rottengruber, U. Gabbert: Thermoacoustic 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
- [2] F. Duvigneau, S. Liefold, M. Höchstetter, J. L. Verhey, U. Gabbert: Analysis of simulated engine sounds using a psychoacoustic model, Journal of Sound and Vibration, Volume 366, 2016, pp. 544-555. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.11.034
- [3] P. Schrader, F. Duvigneau, T. Luft, U. Gabbert, H. Rottengruber: Entwicklung einer funktionsintegrierten wärme- und schalldämmten Ölwanne, 40. Jahrestagung für Akustik - DAGA, Oldenburg, 2014
- [4] P. Schrader, F. Duvigneau, T. Luft, U. Gabbert, H. Rottengruber: 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, San Francisco, 2015
- [5] F. Duvigneau, S. Koch, E. Woschke, U. Gabbert: An effective vibration reduction concept for automotive applications based on granular-filled cavities, Journal of Vibration and Control. DOI: 10.1177/1077546316632932