

Untersuchung der schalldämpfenden Wirkung einer, durch einen speziellen Einschäumprozess hergestellten, Motorkapselung

Sebastian Schneider¹, Norbert Deußen², Tommy Luft¹, Hermann Rottengruber¹

¹ Institut Lehrstuhl Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen, 39106 Magdeburg,

E-Mail: sebastian.schneider@ovgu.de

² Forschungsgesellschaft Methoden, 51109 Köln, E-Mail: fgm@arcor.de

Einleitung

Die Forderung der Kunden nach einem geräuscharmen Fahrbetrieb und die seit Juli 2016 geltende strengere Gesetzgebung hinsichtlich der Fahrgeräuschgrenzwerte forcieren effektive und in Serie umsetzbare Maßnahmen zur Reduktion des Motorgeräusches. In dieser Hinsicht hat sich eine Vollkapselung des Verbrennungsmotors über einen breiten Frequenzbereich als akustisch wirksam erwiesen. Bei dieser passiven Maßnahme befindet sich in der Regel ein Luftspalt zwischen Motor und Kapselmaterial. Eine solche Kapselung führt jedoch zu einem wesentlich größeren Volumen bzw. Gewicht.

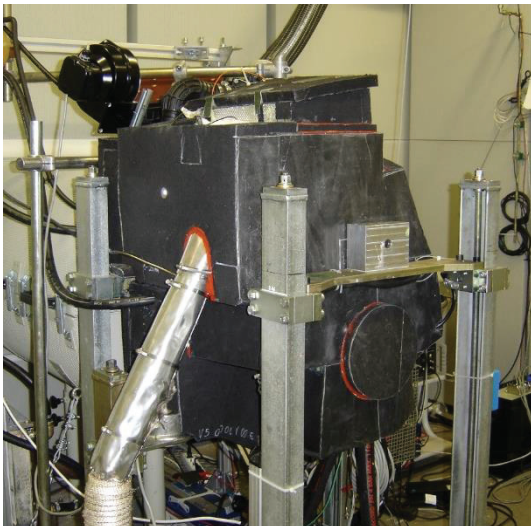


Abbildung 1: Prototyp einer Vollkapselung eines 2-Zylinder Dieselmotors [1]

So wurde im Rahmen des Projektes „Competence in Mobility II“ ein Prototyp einer Vollkapselung an einem 2-Zylinder Dieselmotor umgesetzt. Hierbei wurden die Gesamtmasse, jedoch vor allem das Gesamtvolumen des Aggregats deutlich erhöht, siehe Abbildung 1.

Seit einiger Zeit wird eine neue Kapseltechnologie entwickelt, bei der ein PU-Schaum direkt auf die Motoroberfläche appliziert wird. Der vorliegende Artikel bezieht sich auf einen 2-Zylinder Ottomotor, an dem die akustischen Eigenschaften dieser integrierten Kapsel untersucht wurden.

Prüfstands Aufbau und Messtechnik

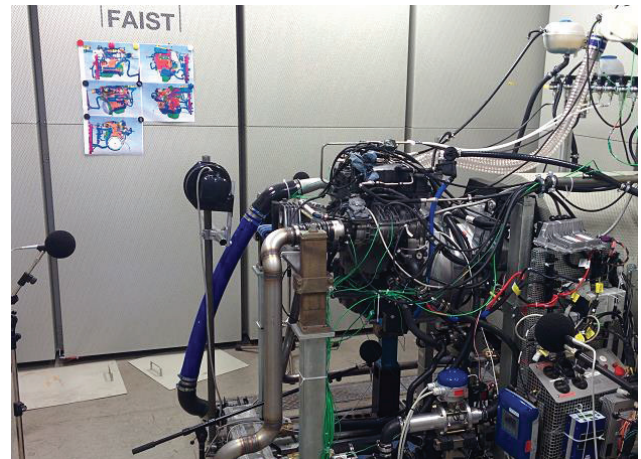


Abbildung 2: Versuchsaufbau am Akustikprüfstand der Universität Magdeburg

Die Prüfstandskammer ist mit schallabsorbierenden Wänden ausgekleidet, wobei das zentral platzierte Versuchsobjekt ausreichend Abstand zu den jeweiligen Wandflächen hat, um Schalldruckmessungen im Nah- bzw. Fernfeld durchführen zu können. Ferner wird eine E-Maschine sowohl als Anlasser als auch als Bremse zur Erzeugung der Motorlast verwendet. Diese ist über eine anderthalb Meter lange, schwingungsdämpfende Welle mit der Kurbelwelle des Motors verbunden und kann dauerhafte Lasten von bis zu 250 Nm bzw. kurzzeitige Lasten von bis zu 310 Nm zur Verfügung stellen. Die E-Maschine befindet sich aus akustischen Gründen im angrenzenden Raum, was wiederum die Länge der Prüfstandswelle erklärt.

Für die Vermessung der Luftschallemissionen, insbesondere auch für die Schalleistungsverteilung, wurden vier ½" Fernfeld-Mikrofone in einem Meter Abstand in einer Höhe von 1,10 m zum Motor aufgestellt, jeweils an der Kalt-, Heiß- und Stirnseite, sowie eines in zentraler Position über dem Motor, ebenfalls in einem Meter Abstand.

Ferner wurde für die Lokalisierung der Schallquellen der einzelnen Motorseiten ein Mikrofon-Array mit 30 Mikrofonen verwendet (siehe Abbildung 3).

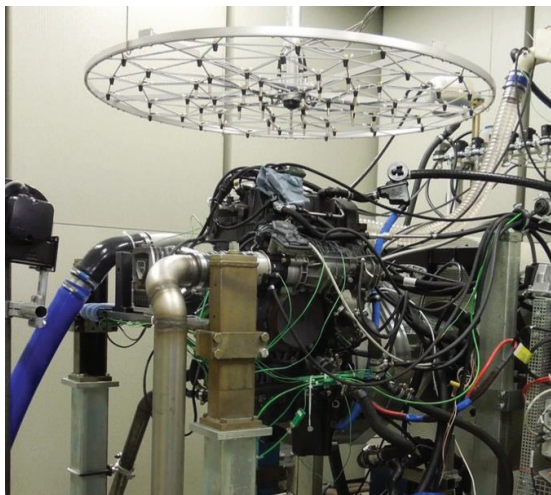


Abbildung 3: Mikrofon-Array, platziert über der Oberseite des Versuchsträgers

Dabei handelt es sich um ein Beamforming-Array mit ungleichmäßiger Verteilung der Mikrofone, welches in jeweils 70 cm Abstand zum Motor platziert wurde.

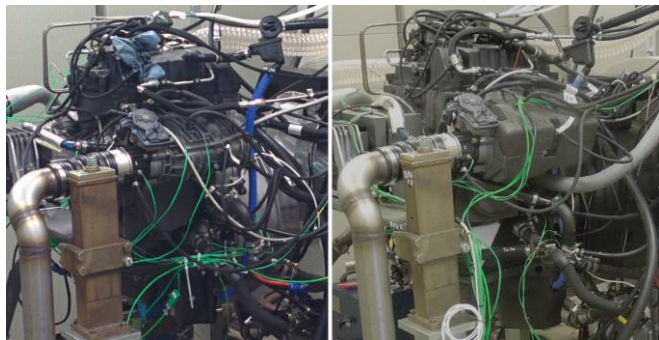


Abbildung 4: Versuchsträger vor (links) und nach der Einschäumung (rechts)

Nach der akustischen Gesamtvermessung des Basismotors wurde der Versuchsträger von der Firma FGM eingeschäumt und daraufhin erneut vermessen.

Realisierung des Einschäumprozesses

Um die motoranliegende Einschäumung des Versuchsträgers zu realisieren, wurde der zuvor vermessene Motor zunächst zerlegt. Anschließend wurden speziell angepasste GFK-Hohlkäseformen jeweils an die Bauteile fixiert. Bei dieser Technik bleiben alle Zugänge und Anbaupunkte des Motors frei zugänglich, was im Hinblick auf einen möglichen Serieneinsatz Vorteile bezüglich des Handlings sowie von Reparatur und Wartung erbringt. Darüber hinaus werden durch die Kapsel die unerwünschten Wärmeverluste im abgestellten Zustand deutlich reduziert, wodurch sich Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemission im Kundenbetrieb signifikant reduzieren. In die Käseformen wird der Polyurethanschaum injiziert und expandiert nach dem Schließen der Füllöffnung, wobei der Schaum den gesamten Hohlraum vollständig ausfüllt. So lässt sich die Funktion und Dichtheit der Kapselung über den gesamten Motorlebenszyklus gewährleisten.



Abbildung 5: Zylinderkurbelgehäuse des Versuchsträgers nach dem Einschäumprozess

Das Gesamtgewicht des aufgetragenen PU-Schaumes lag bei ca. 1,6 kg, wobei die Schaumdicke durchschnittlich 15 mm betrug.

Vergleich der Schalldruckpegel im Terzspektrum

Um die jeweiligen Motorseiten hinsichtlich deren Abstrahlcharakteristik vor und nach der Einschäumung vergleichend darzustellen, wurde ein bandpassgefiltertes, A-bewertetes Terzspektrum ausgewählt. Hierbei wurden drehzahl- und lastspezifische, stationäre Arbeitspunkte untersucht.

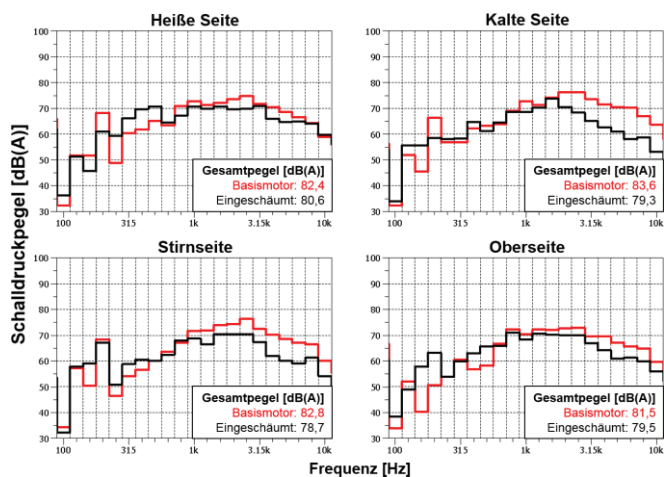


Abbildung 6: Vergleich der Schalldruckpegel im Terzspektrum bei 2500 min⁻¹ / Schleppbetrieb

So wird in Abbildung 6 der Arbeitspunkt bei 2500 min⁻¹ und geschlepptem Motorbetrieb betrachtet. Ohne die Einflüsse der Verbrennungsgeräusche werden lediglich die mechanischen Geräuschkomponenten wiedergegeben. Bei der Stirn- und besonders bei der kalten Seite des Motors fällt auf, dass bis 1 kHz lediglich geringfügige Unterschiede im Schalldruckpegel zwischen der Vermessung des Basismotors sowie des eingeschäumten Zustandes auftreten. Dies ergibt sich aus dem typischen Absorptionsverhalten des verwendeten Polyurethanschaumes. Bei den Terzen ab 1 kHz ist zu sehen, dass beim Basismotor wesentlich höhere Pegel gemessen wurden. Die Gesamtpegelreduktion ist auf der kalten Seite betriebspunktunabhängig stets am höchsten, was wiederum auf den höheren Käseanteil zurückzuführen ist.

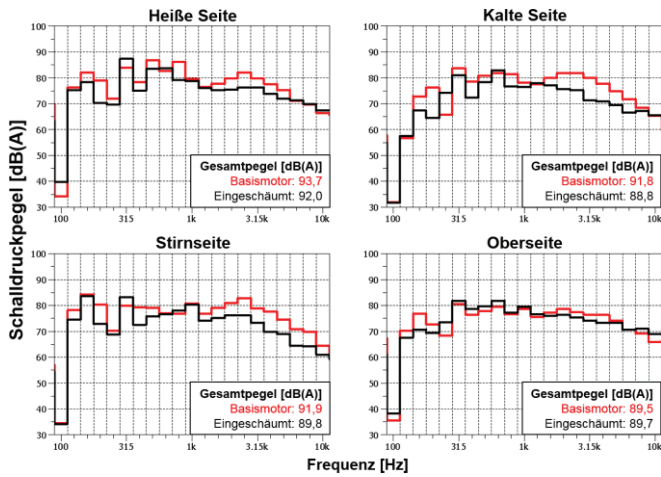


Abbildung 7: Vergleich der Schalldruckpegel im Terzspektrum bei 2500 min⁻¹ / 88 Nm

In Abbildung 7 wird nun der Betriebspunkt 2500 min⁻¹ / 88 Nm erhöht. Durch den verbrennungsmotorischen Geräuschanteil werden jetzt besonders die nieder- bis mittelfrequenten Terzen verstärkt. Ebenso wie in Abbildung 6 ist der Pegelunterschied beider Versuchsvarianten bei der Stirnseite sowie bei der kalten Seite am größten, wobei ersichtlich wird, dass sich jene Unterschiede im Gegensatz zum geschleppten Motorbetrieb im hochfrequenten Bereich weitestgehend egalisieren. An der Oberseite des Motors sind die Pegelunterschiede aufgrund des geringsten Kapselanteils wiederum kaum erwähnenswert.

Im Folgenden werden die Analysen der Schalleistungsverteilung des Versuchsträgers vor und nach der Einschäumung dargestellt. Zur Berechnung der Schalleistung wurde hierbei das Hüllflächenverfahren angewandt, nach welchem die Schallintensitäten der relevanten Motorseiten über deren Hüllflächen integriert werden [2]:

$$W = \int_A I dA = \int_A pv dA = \int_A \frac{p^2}{Z} dA$$

Anschließend werden die Schalleistungspegel aller stationär vermessenen Arbeitspunkte über alle Motorseiten berechnet, wonach die Schalleistungsdifferenzpegel aus den Versuchen vor und nach der Einschäumung subtrahiert werden.

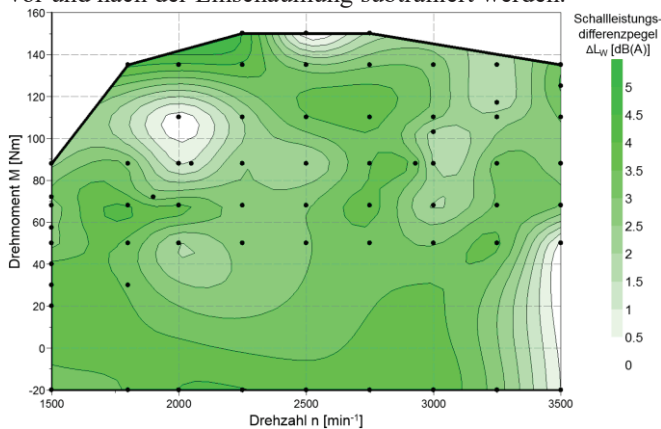


Abbildung 8: Schalleistungsdifferenzverteilung über stationär gemessene Arbeitspunkte (schwarze Punkte), berechnet über alle Motorseiten

So ist in Abbildung 8 zu sehen, dass die Schalleistungspegel in nahezu allen Bereichen des untersuchten Motorkennfeldes

durch den Einschäumprozess kleiner werden. An wenigen Stellen im erhöhten Lastbereich sowie im hohen Drehzahlbereich bei niedriger Last gehen die Differenzpegel wiederum gegen Null, was bedeutet, dass die Kapsel in diesen Betriebspunkten des Motors kaum Einfluss auf die Schalleistung nimmt.

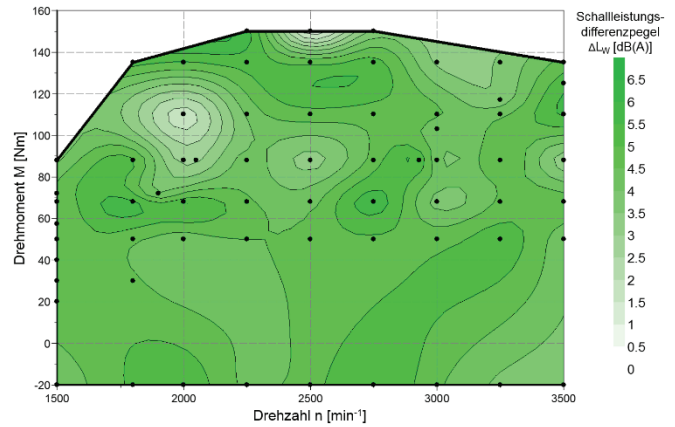


Abbildung 9: Schalleistungsdifferenzverteilung über stationär gemessene Arbeitspunkte (schwarze Punkte), Kalte Seite

In Abbildung 9 werden lediglich die Schalleistungsdifferenzpegel der kalten Seite betrachtet. Aufgrund des bereits genannten, hohen Kapselanteils auf dieser Seite sind die Schalleistungsdifferenzpegel höher als auf den restlichen Motorseiten. Die Betriebspunkte, welche in Abbildung 8 einen Differenzpegel gegen Null aufwiesen, kommen in dieser Art auch in Abbildung 9 zum Vorschein, wobei die Differenzpegel hier bei den meisten Betriebspunkten größer sind.

Um die dominantesten Schallquellen des Versuchsträgers vor und nach der Einschäumung ausfindig zu machen, wurde das in Abbildung 3 vorgestellte Mikrofon-Array, welches die Schalldruckverteilung mittels Beamforming-Algorithmus auf die jeweiligen Flächen projiziert, eingesetzt.

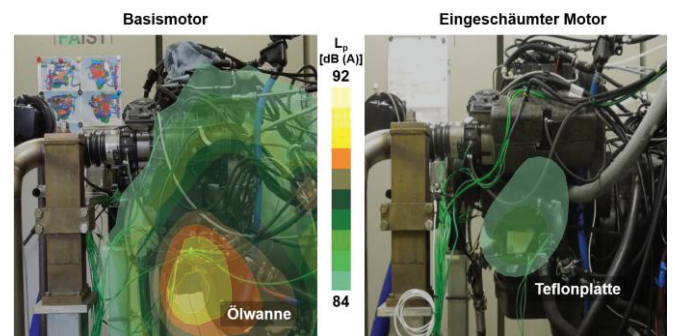


Abbildung 10: Vergleich der Schalldruckverteilungen bei 2500 min⁻¹ / Schleppbetrieb im Frequenzbereich 500 – 6400 Hz

So ist in Abbildung 10 deutlich zu erkennen, dass die Ölwanne bei der Basismotorvermessung über den gesamten, betrachteten Frequenzbereich der dominierende Schallabstrahler ist. Die Ergebnisse nach der Einschäumung wiederum zeigen, dass der Einfluss der Ölwanne durch die Kapselung nahezu vollständig verschwindet. Stattdessen tritt nun eine nachträglich angebrachte Montageplatte akustisch auffallend in Erscheinung, welche im Serienzustand jedoch keine Verwendung mehr finden würde. Die maximalen

Pegel sind bei der Basismotorvermessung dabei dennoch wesentlich höher. Die gleichen Effekte traten auf dieser Motorseite bei nahezu allen Betriebspunkten auf. Grundsätzlich ist die Ölwanne beim Versuchsträger vor der Einschäumung stets die dominanteste Schallquelle.

Weiterhin werden nun die Eigenfrequenzbereiche anhand der Messergebnisse aus den Drehzahlhochläufen mithilfe der Campbell-Diagrammdarstellung analysiert.

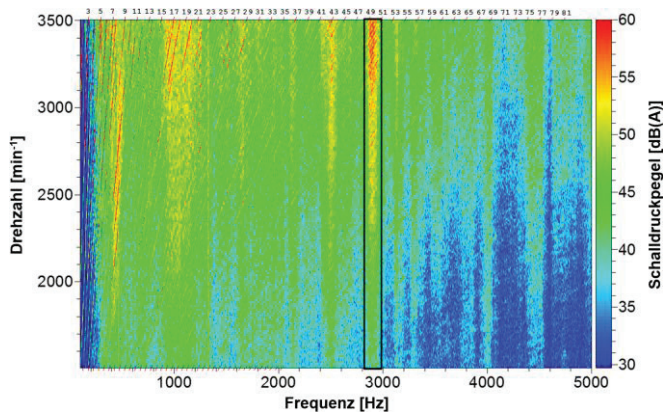


Abbildung 11: Campbell-Diagramm eines Drehzahlhochlaufs im Schleppbetrieb, Heiße Seite, Eingeschäumter Motor

Nachdem die dominantesten Resonanzbereiche (bspw. ca. 1900 – 2100 Hz) bei den Drehzahlhochläufen vor der Einschäumung der Ölwanne zugeordnet werden konnten, wird in Abbildung 11 nun ein Campbell-Diagramm eines Drehzahlhochlaufs nach der Einschäumung betrachtet. In diesem ist besonders eine Eigenmode bei ca. 2900 Hz zu sehen, welche in Abbildung 12 mithilfe des Mikrofon-Arrays exemplarisch dargestellt wird.

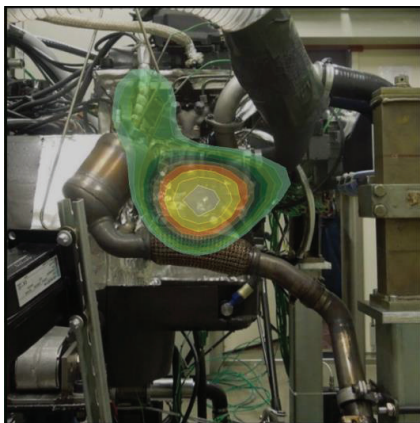


Abbildung 12: Schalldruckverteilung im Schleppbetrieb im Frequenzbereich 2870 – 2960 Hz, 3500 min⁻¹, Heiße Seite, Eingeschäumter Motor

So ist zu sehen, dass auf der heißen Seite, nachdem die akustischen Effekte der Ölwanne weitestgehend durch die Kapselung egalisiert wurden, ebenso wie auf der kalten Seite, nun andere Schallabstrahler, in diesem Fall der Abgasturbolader sowie dessen Laderstütze, in Erscheinung treten.

Fazit und Ausblick

Der Vergleich der Untersuchungen des Versuchsmotors vor sowie nach der Einschäumung zeigte, dass die Realisierung dieser motoranliegenden Teilkapselung einen entscheidenden Einfluss auf künftige Untersuchungen motornaher Kapselungen haben kann. So konnte eine deutliche Reduktion des Schalldruck- sowie Schalleistungspegels erreicht werden, wobei das Gesamtschaumgewicht, im Gegensatz zu motorfernen Kapselungen, durch einen speziellen Einschäumprozess auf etwa ein Drittel reduziert werden konnte.

Ferner gibt es dennoch Optimierungspotential, wonach der tieffrequente Bereich beispielsweise durch den Einsatz von Schwerfolie maßgeblich beeinflusst werden könnte, sodass sich auch unter 1 kHz eine signifikante Pegelreduktion zeigen würde.

Letztlich sollte ein Motor, welcher für eine motoranliegende Kapselung vorgesehen ist, im Vorfeld schon genau darauf ausgelegt bzw. konstruiert werden, sodass ein gezielter und effizienterer Einschäumprozess erfolgen kann, was wiederum der akustischen sowie thermischen Isolation weiterführend dient.

Literatur

- [1] Luft, T.: Aktive und passive Schallreduktion am Dieselmotor, Dissertation, Magdeburg (2016)
- [2] Kollmann, F.G.: Maschinenakustik, Grundlagen, Messtechnik, Berechnung, Beeinflussung. Springer-Verlag Berlin, 2. Auflage (2000)