

# VIRTUELLE EVALUATION VON MATERIALIEN FÜR MOTORKAPSELUNGEN

Dipl.-Ing. Fabian Duvigneau, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Gabbert

## 1 Motivation

In den letzten Jahren ist die Akustik zu einem wichtigen Faktor bei der Beurteilung moderner Automobile geworden. Ein wichtiges Ziel der aktuellen Forschung besteht darin, die Schallabstrahlung von Verbrennungsmotoren zu minimieren. Thermoakustischen Motorkapselungen kommt dabei als passive Maßnahme zur Verbesserung des NVH-Verhaltens (NVH: Noise, Vibration, Harshness) eine immer größer werdende Bedeutung zu [1]. Derartige Kapselungen können bei entsprechender Auslegung die Schallabstrahlung signifikant reduzieren [2]. Zudem führt eine thermische Kapselung zu einer höheren Temperatur des Motoröls, wodurch eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und ein besseres Kaltstartverhalten erreicht werden [3]. Eine optimal ausgelegte Motorkapsel verbessert damit die zunehmend mehr in den Fokus rückende Umweltfreundlichkeit von Verbrennungsmotoren.

Zur Entwicklung effizienter Kapselsysteme sind numerische Simulationen notwendig, um das Verbesserungspotential bestmöglich auszuschöpfen [4]. Derartige Simulationen bieten eine Reihe von Vorteilen. Sie sind bereits früh im Designprozess durchführbar, sie erfordern keine Prototypen, sie ersetzen aufwendige Experimente und sie ermöglichen im Gegensatz zu experimentellen Studien die Untersuchung einer viel größeren Variantenvielfalt ohne signifikante Kostensteigerung. Unglücklicherweise erfordern komplexe Akustiksimulationen, die vom Verbrennungsprozess über die Strukturschwingungen bis hin zur Schallabstrahlung in die umgebende Luft alle wichtigen Phänomene berücksichtigen, einen hohen numerischen

Aufwand [5]. Dabei ist auch die Berücksichtigung der menschlichen Hörempfindung als Bewertungsfaktor verschiedener Maßnahmen bezüglich der akustischen Auswirkungen von essentieller Bedeutung [3].

Im Beitrag wird eine Idee präsentiert, die darin besteht, den Aufwand des gesamten virtuellen Entwicklungsprozesses eines solchen Kapselungssystems signifikant zu reduzieren, indem mit Hilfe einfacher numerischer Voruntersuchungen eine Vorauswahl der zu verwendenden Kapselmaterialien getroffen wird, bevor beispielsweise die Geometrie der Kapselung optimiert wird. Somit werden die aufwendigen Akustiksimulationen mit komplexen Geometrien ausschließlich für die am besten geeigneten Materialsysteme durchgeführt. Als Bewertungskriterium der unterschiedlichen Kapselmaterialien wird das Schalldämmmaß verwendet, das mit Hilfe von FE-Analysen [6] berechnet wird, um aufwendige Experimente für die Vorauswahl des Kapselmaterials zu vermeiden. Im vorliegenden Beitrag wird die Übertragbarkeit der mit Hilfe der Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse überprüft, indem diese anhand von Akustiksimulationen an einer komplexen Motorkapsel verifiziert werden.

## 2 Das Schalldämmmaß

Ein detaillierter Überblick über die verschiedenen Methoden das Schalldämmmaß zu berechnen, wird in [7] gegeben. Die Grundgleichung zur Berechnung des Schalldämmmaßes  $R$  ist

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} . \quad (1)$$

Der Transmissionsgrad  $\tau$  ist das Verhältnis der von einem Hindernis bzw. einer Struktur transmittierten  $P_{tr}$  und der einfallenden  $P_e$  Schalleistung. Gleichzeitig ist

der Transmissionsgrad  $\tau$  auch das Verhältnis der transmittierten  $I_{tr}$  und der einfallenden  $I_e$  Schallintensität

$$\tau = \frac{P_{tr}}{P_e} = \frac{I_{tr}}{I_e} . \quad (2)$$

Für den Fall, dass das Fluid auf beiden Seiten der Struktur identisch ist, lässt sich der Transmissionsgrad auch über das Quadrat des Verhältnisses der Magnituden des transmittierten  $\hat{p}_{tr}$  und des einfallenden Schalldrucks  $\hat{p}_e$  ausdrücken.

$$\tau = \left| \frac{\hat{p}_{tr}}{\hat{p}_e} \right|^2 \quad (3)$$

Dazu muss nur die Definition der Schallintensität  $I$  herangezogen werden.

$$I = \frac{|\hat{p}|^2}{\rho_{fluid} \cdot c_{fluid} \cdot \cos(\varphi)} \quad (4)$$

Dabei ist  $\varphi$  der Winkel zwischen dem Normalenvektor der Wand und der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle,  $\rho_{fluid}$  ist die Dichte und  $c_{fluid}$  ist die Schallgeschwindigkeit des Fluids auf beiden Seiten der Struktur.

Für Messungen des Schalldämmmaßes

$$R = L_{p_e} - L_{p_{tr}} = 10 \log \left( \left| \frac{\hat{p}_{tr}}{\hat{p}_e} \right|^2 \right) \quad (5)$$

wird in der Regel ein Kundtsches Rohr verwendet. Dabei berechnet sich das Schalldämmmaß aus der Differenz der Schalldruckpegel vor  $L_{p_e}$  und hinter  $L_{p_{tr}}$  der Struktur. In den numerischen Untersuchungen im vorliegenden Beitrag wird das Schalldämmmaß analog zu dieser Vorgehensweise bestimmt.

### 3 Numerisches Modell

Im Bauingenieurwesen existieren zahlreiche Möglichkeiten für die Berechnung des Schalldämmmaßes auf analytischem Wege. In [8] wurde die Anwendbarkeit der bekannten analytischen Ansätze für die Bestimmung des Schalldämmmaßes von Kapselmaterialien untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass einige Grundvoraussetzungen zur Anwendung der schnellen analytischen Lösungen für thermoakustische Kapselmaterialien

nicht erfüllt sind. Das Hauptproblem besteht in der Annahme, dass die Immissions- und Emissionsseite der zu untersuchenden Struktur exakt die gleiche Bewegung ausführen.

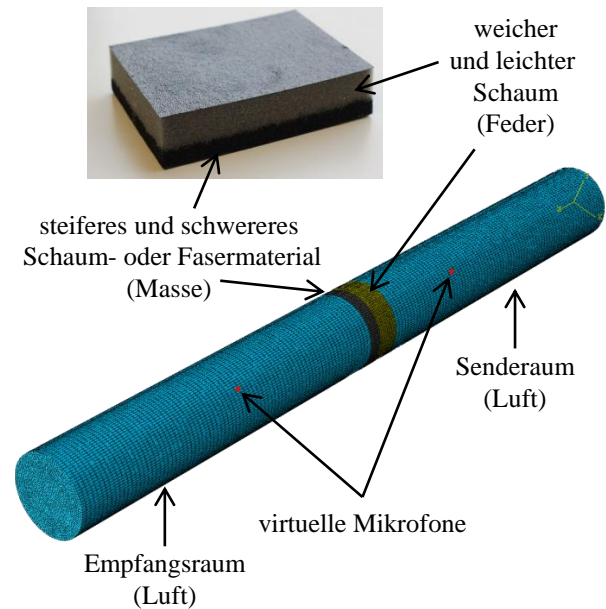


Abbildung 1: Versuchsaufbau des virtuellen Kundtschen Rohrs mit typischer Kapselmaterialprobe

Die analytischen Formeln wurden im Bauingenieurwesen für massive Strukturen wie beispielsweise Betonwände aufgestellt. Für Kapselmaterialien, die meist aus einem Mehrschichtverbund von sehr leichten und weichen Materialien bestehen (siehe Abb. 1 oben), sind die im Bauingenieurwesen üblichen Annahmen nicht gültig. Deshalb wird im vorliegenden Beitrag auf numerische Methoden zurückgegriffen, die das komplexe Schwingungsverhalten des Mehrschichtverbundes berücksichtigen. Im Vergleich zum analytischen Schalldämmmaß ist es mit Hilfe des numerischen Ansatzes außerdem möglich, verschiedene Anregungsszenarien, das Verhalten der angrenzenden Luftvolumina sowie verschiedene akustische und mechanische Randbedingungen zu berücksichtigen. Allerdings bleiben jegliche Körperschallpfade auch im hier präsentierten Ansatz unberücksichtigt. Diese haben bei den hier betrachteten motornahen Kapselungen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Die Bewertung verschiede-

dener Kapselmaterialien auf der Basis ihres Luftschalldämmmaßes stellt dennoch ein gutes Kriterium zur Vorauswahl der Materialsysteme dar.

Üblicherweise werden Schalldämmmaße in der Praxis mit einem Kundtschen Rohr gemessen. Analog dazu wird zur numerischen Bestimmung des Schalldämmmaßes verschiedener Kapselungsmaterialien ein virtuelles Kundtsches Rohr aufgebaut. Das zugehörige FE-Modell ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Abb. 1 zeigt ein typisches Beispiel für ein mehrschichtiges Kapselmaterial, das auf dem Feder-Masse-Prinzip basiert. Die Materialprobe wird an der Wand des Kundtschen Rohrs gelagert. Die Grenzen der Fluidvolumina werden analog zum realen Versuchsaufbau als schallhart modelliert. Die Luftvolumina des Sende- und Empfangsraums sind identisch dimensioniert. Im Senderaum wird eine Schallquelle definiert, die ein diffuses Schallfeld im Senderaum erzeugt. Es wird im Sende- und im Empfangsraum jeweils ein virtuelles Mikrofon im identischen Abstand zur Materialprobe positioniert. Die Differenz der an diesen Mikrofonen gemessenen Schalldruckpegel ergibt nach Gleichung (5) schließlich das Schalldämmmaß der untersuchten Probe. Aufgrund ihrer schallharten Grenzen fungieren die beiden Fluidvolumina wie Hallräume, weshalb angenommen wird, dass in beiden Volumina ein diffuses Schallfeld vorliegt. Folglich ist die Abhängigkeit des Schalldämmmaßes von der Mikrofonposition vernachlässigbar klein. Es wird eine vollständig gekoppelte Akustiksimulation durchgeführt, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Einfluss der schwingenden Luft auf die Strukturschwingung vernachlässigt werden kann. Dies liegt zum einen an der sehr geringen Steifigkeit der Kapselmaterialien und zum anderen daran, dass es sich bei den Luftvolumina um geschlossene Kavitäten handelt, die zudem noch vergleichsweise klein sind.

In den ersten Simulationen hat sich gezeigt, dass der Versuchsaufbau aus Abb. 1 im untersuchten Fre-

quenzbereich mehrere Raumresonanzen der Luftkavitäten aufweist, die die Ergebnisse dominieren (siehe Abb. 3). Die Bestimmung des Schalldämmmaßes mittels virtuellem Kundtschen Rohr soll der Vorauswahl der besten Materialien für komplexe Motorkapselungen dienen. Demzufolge ist ein Einfluss von Raumresonanzen, die dem für die Voruntersuchung genutzten Versuchsaufbau geschuldet sind, nicht erwünscht. Aus diesem Grund wurden die Luftvolumina des virtuellen Kundtschen Rohrs in Richtung der Längsachse stark verkleinert (siehe Abb. 2, links). Alle anderen Spezifikationen des ursprünglichen Modells aus Abb. 1 bleiben gleich.

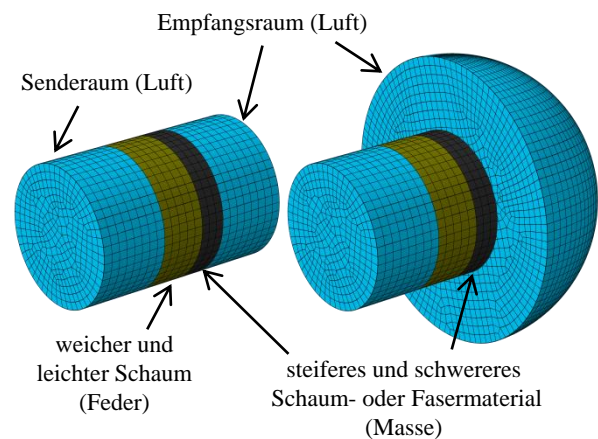


Abbildung 2: Versuchsaufbaualternativen für die virtuelle Evaluation von Kapselmaterialien

Auf der rechten Seite von Abb. 2 wird zum Vergleich zusätzlich ein Modell vorgestellt, bei dem der Empfangsraum als akustischer Halbraum ausgeführt ist. Dabei ist die planare Fläche schallhart und die halbkugelförmige Fläche als absorbierender Rand definiert, wodurch eine Abstrahlung ins Freifeld simuliert wird. Damit soll die Frage beantwortet werden, ob dieser Aufbau zur Bestimmung des Schalldämmmaßes für die Vorauswahl der Materialien geeigneter ist. Das ist zu vermuten, da er dem späteren Anwendungsfall näher kommt. Die kostengünstige Flexibilität der Modellierung zeigt hier noch einmal den Mehrwert des Virtual Engineering gegenüber einer Materialauswahl mit Hilfe experimenteller Ergebnisse.

#### 4 Ergebnisse

In Abb.3 werden die Modellierungsvarianten hinsichtlich des resultierenden Schalldämmmaßes bei gleichbleibender Materialprobe verglichen. Die ursprüngliche Modellierung aus Abb. 1 ist als schwarze Linie dargestellt und zeigt deutliche Einbrüche des Schalldämmmaßes aufgrund der Resonanzen der Luftkavitäten, die zusätzlich auch in Abb. 3 mit dargestellt sind.

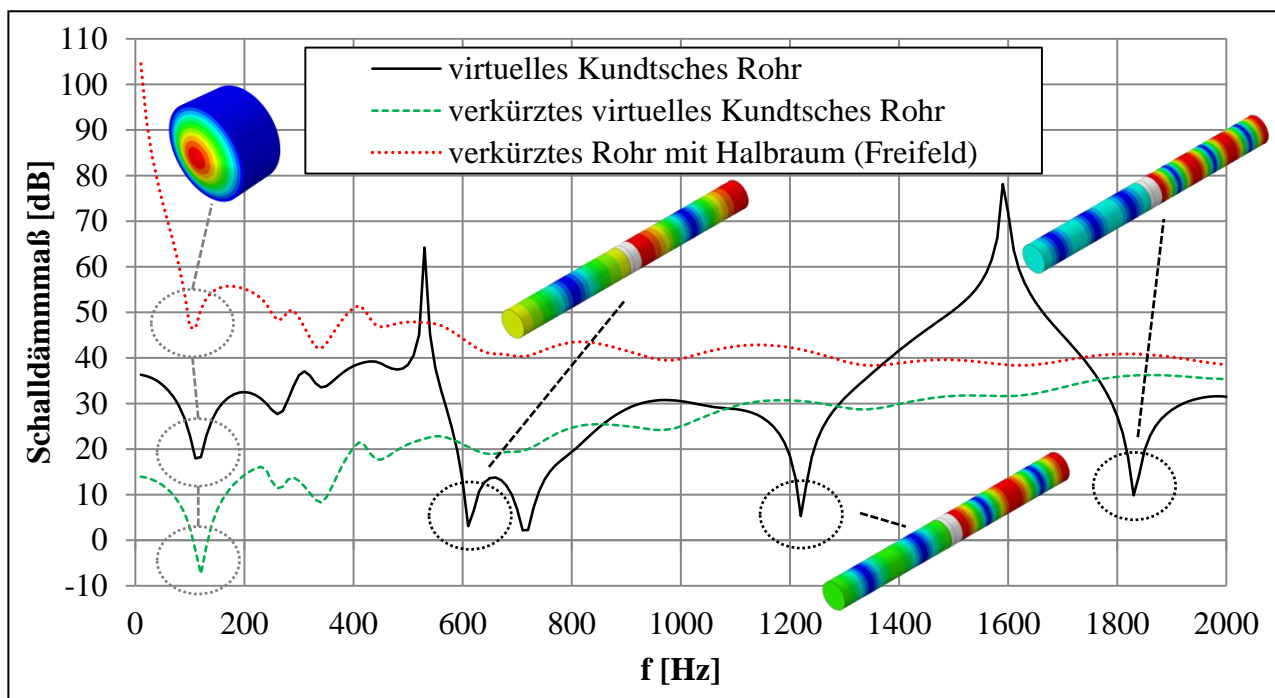


Abbildung 3: Vergleich der vorgestellten Versuchsaufbaualternativen für das virtuelle Kundtsche Rohr

Anhand der anderen beiden Kurven für die Modelle aus Abb. 2 ist deutlich zu erkennen, dass eine Verkleinerung der Fluidvolumina wie gewünscht den Einfluss der Luft eigenmoden deutlich reduziert. Eigenmoden der Materialprobe, die natürlich abhängig von den Randbedingungen und der Probengeometrie sind und somit nicht dem späteren Anwendungsfall entsprechen, können allerdings nicht vermieden werden. Ein deutlicher Einfluss eines solchen Probeneigenmodes tritt bei allen Modellierungen bei einer Frequenz von etwa 120 Hz auf. Die ersten Eigenmoden der Proben treten trotz der Lagerung bei sehr tiefen Frequenzen ( $< 100$  Hz) auf, weil es sich um sehr weiche Werkstoffe

handelt. Außerdem liegen die Eigenformen aus dem gleichen Grund sehr dicht beieinander. Die Ergebnisse in Abb. 3 machen jedoch deutlich, dass nur wenige Probeneigenformen zu signifikanten Einbrüchen im Schalldämmmaß führen.

Die Entscheidung, welche der beiden in Abb. 2 dargestellten Modellierungsvarianten für die Materialvorauswahl geeigneter ist, wird mit Hilfe von Messergeb-

nissen getroffen, die in einer früheren Studie [2] auf einem Motorprüfstand an einem laufenden Motor mit und ohne Vollkapselung ermittelt wurden. Der Vergleich der experimentellen Ergebnisse, die in Abb. 4 dargestellt sind, mit den numerischen Ergebnissen in Abb. 3 zeigt, dass die Schalldämmmaße stark überschätzt werden. Dennoch kann durch den Vergleich zweifelsfrei festgestellt werden, dass die Variante ohne Halbraum aber mit verkleinertem Luftvolumen die geeignetste Modellierung für eine erste Materialevaluierung liefert.

Ziel des hier vorgestellten Ansatzes ist es, verschiedene Kapselmaterialien zu vergleichen. Aus diesem

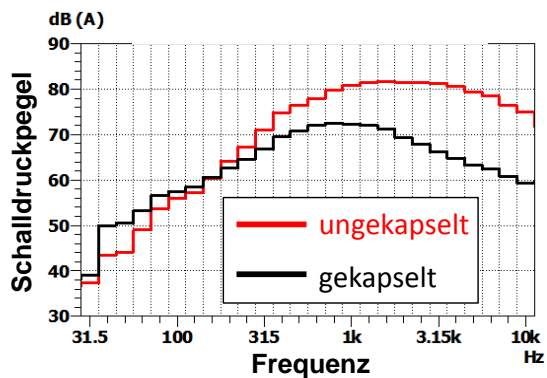


Abbildung 4: Auf dem Motorprüfstand bestimmte Schalldruckreduktion der Kapselung aus Materials A

Grund sind in Abb. 5 zunächst die Schalldämmmaße von zwei verschiedenen Kapselmaterialien für identische Probengeometrie gegenübergestellt. Sie wurden mit Hilfe des virtuellen Kundtschen Rohrs ermittelt. Das Material A ist dabei das Material, das sowohl für die zuvor vorgestellten Simulationen (Abb. 3) als auch die Messungen (Abb. 4) verwendet wurde.

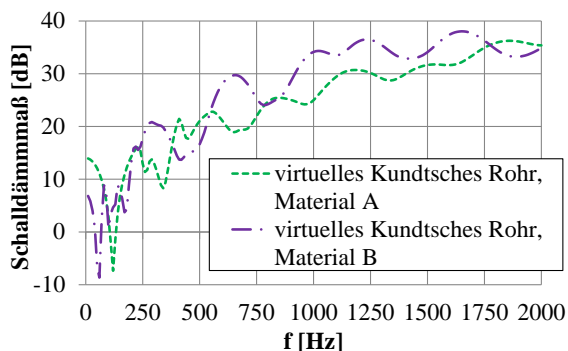


Abbildung 5: Mit virtuellem Kundtschen Rohr bestimmte Schalldämmmaße der Materialien A und B

Aus der Abb. 5 lässt sich schlussfolgern, dass das Material B das vielversprechendere ist. Diese Vermutung wird durch eine aufwendige numerische Simulation überprüft, bei der die resultierende Schallabstrahlung in die Umgebungsluft von einem Rumpfmotor mit Kapselung berechnet wird. Die Ergebnisse der Schalldruckverteilungen sind in Abb. 6 dargestellt und stellen klar, dass das Kapselmaterial B bei gleicher Kapselgeometrie definitiv zu einer größeren Reduktion des Schalldruckpegels führt. In Abb. 6 ist außerdem zu erkennen, dass die resultierende Schalldruckverteilung

im gekapselten Fall für beide Materialien qualitativ sehr ähnlich ist. Allerdings ist die Verbesserung durch die Verwendung des Materials B sehr viel höher als es die einfache numerische Vorbetrachtung aus Abb. 5 vorhersagt.

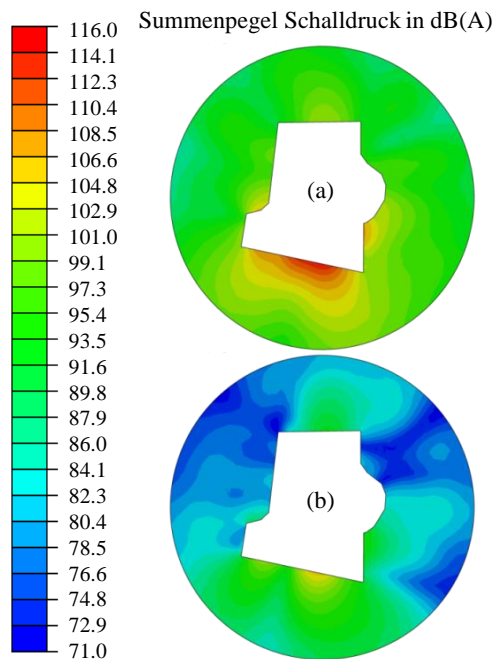


Abbildung 6: Vergleich der Schalldruckverteilung, (a) mit Kapselmaterial A, (b) mit Kapselmaterial B

Der erste signifikante Einbruch des Schalldämmmaßes tritt beim Material B aufgrund der höheren Dichte bei einer tieferen Frequenz als beim Material A auf (siehe Abb. 5). Aus diesem Grund liegt diese Resonanz außerhalb des menschlichen Hörbereichs. Damit lassen sich unter anderem die sehr viel kleineren Amplituden in der A-bewerteten Schalldruckverteilung bei Nutzung der Motorkapsel aus dem Materialsystem B erklären (siehe Abb. 6), da die A-Bewertung die Hörfläche des Menschen berücksichtigt.

Um die vorgestellte Materialvorauswahl mittels virtuellem Kundtschen Rohrs zu verifizieren, werden in Abb. 7 die am Motor erreichten Schalldämmmaße dargestellt, die zu den Ergebnissen aus Abb. 6 gehören. Es ist offensichtlich, dass auch in dieser Betrachtung das Material B besser ist als das Material A. In Abb. 6 ist außerdem das für die Berechnungen ver-

wendete FE-Modell des Motors mit Vollkapselung dargestellt.

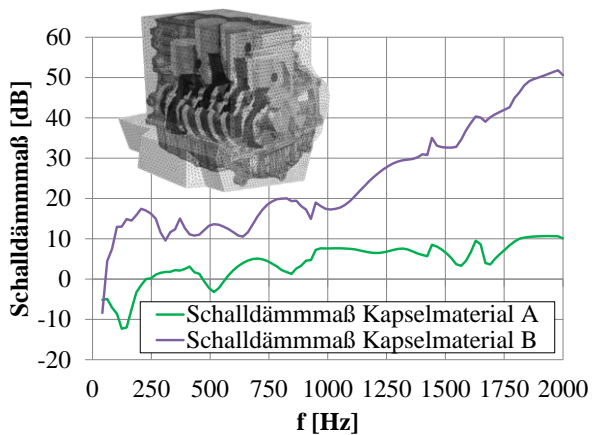


Abbildung 7: Mit komplexem Motorkapselmodell bestimmte Schalldämmmaße der Materialien A und B

Abschließend wird das komplexe Simulationsmodell des Motors inklusive Kapselung validiert, indem das berechnete Schalldämmmaß des Materials A (grüne Kurve in Abb. 7) den am realen Motor ermittelten Messergebnissen (Abb. 4) gegenübergestellt wird. In beiden Fällen führt die Verwendung der Kapsel im Frequenzbereich unter 250 Hz zu einer Erhöhung des Schalldrucks. Danach steigt das Schalldämmmaß sanft an und erreicht bei 2 kHz etwa 10 dB Schalldruckreduktion.

## 5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorgestellten Methodik kann der Aufwand des virtuellen Gesamtentwicklungsprozesses erheblich reduziert werden. Der Berechnungsaufwand für die Materialvorauswahl ist im Vergleich zu den komplexen Simulationsmodellen etwa 100- bis 200-mal kleiner. Die einfachen numerischen Voruntersuchungen zur Materialevaluation liefern die gleiche Eignungsreihenfolge der Materialsysteme wie die realitätsnäheren Simulationen mit komplexen Kapselgeometrien. Dabei stellt das virtuelle Kundtsche Rohr mit schallharten Wänden und kleinen Luftvolumina die geeignetste Modellierung zur Materialvorauswahl dar.

Mit Hilfe von Prüfstandsmessungen wurde nachgewiesen, dass die hier präsentierte Vorgehensweise in der Lage ist, eine zuverlässige Einschätzung hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit von Motorkapseln zu liefern. Folglich kann auch auf experimentelle Untersuchungen verzichtet werden. Die Materialvorauswahl mittels Luftschalldämmmaß ist allerdings nicht in der Lage, Körperschalltransmissionen oder anwendungsnahe Geometrien zu berücksichtigen. Aus diesem Grund muss für eine zuverlässige Bewertung der akustischen Wirksamkeit einer Motorkapsel auf die vollwertige Simulation der komplexen Kapselgeometrie mit Berücksichtigung des innenliegenden Motors zurückgegriffen werden.

## 6 Literatur

- [1] Gabbert, U.; Duvigneau, F.; Shan, J.: Active and passive measures to reduce the noise pollution of combustion engines, 11th IEEE ICIA, 2014
- [2] Duvigneau, F.; Luft, T.; Rottengruber, H.; Gabbert, U.: Simulation of a thermo-acoustically encapsulated engine, 21st ICSV, 2014
- [3] Liefold, S.; Duvigneau, F.; Höchstetter, M.: Geräuschqualität von Motorkapselungen. ATZ06/2015.
- [4] Duvigneau, F.; Gabbert, U.: Numerical study of a thermo-acoustically encapsulation, 11th WCCM, 2014
- [5] Duvigneau, F.; Nitzschke, S.; Strackeljan, J.; Gabbert, U.: Ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz zur Schwingungs- und Akustiksimulation eines Verbrennungsmotors, SIRM, 2015
- [6] Hughes, T. J. R.: The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1987
- [7] Mehra, S. R.: Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung, Dissertation, Stuttgart, 1995
- [8] Duvigneau, F.; Gabbert, U.: The sound reduction index applied to automotive problems, 6th AAC, 2014