

# Numerische und experimentelle Parameterstudien zum akustischen Verhalten monosubstrater Twinlayer für automotive Anwendungen

---

Peter Schrader, Fabian Duvigneau, Torsten Schwammberger, Michael Feist, Hermann Rottengruber, Ulrich Gabbert

## Kurzfassung

Vor dem Hintergrund steigender Kundenansprüche und gesetzlicher Anforderungen an das Vorbeifahrgeräusch von PKW spielen in der zukünftigen Motoren- und Aggregateentwicklung passive und aktive Sekundärmaßnahmen zur Verringerung des Motorgeräusches eine wachsende Rolle. Als wesentliche passive Sekundärmaßnahmen werden heute zum einen akustisch günstige Strukturkonzepte mit gezielt modifizierten Steifigkeiten des Motors entwickelt und zum anderen werden Dämmmaterialien zur Schallreduktion in den Motorraum eingebracht.

Der vorliegende Beitrag widmet sich der Untersuchung von Dämmmaterialien, wie Schäumen und Mikrofaservliesen, für die Kapselung von Motoren und Aggregaten. Die im Beitrag angegebenen Ergebnisse liefern einen Einblick in die Wirkungsweise von Dämmmaterialien und geben Hinweise für die Gestaltung von Motorenkapseln. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine auf die Oberfläche von Dämmmaterialien aus weichen Kunststoffschäumen aufgebrachte Masseschicht zu einer Verbesserung der Dämmwirkung führt [1, 2]. Zur Verifikation dieser Aussage werden verschiedene Dämmwerkstoffe mit unterschiedlichen Oberflächenschichten im Detail untersucht und das Potential der Schalldämmung unterschiedlicher Beschichtungen ermittelt. Es werden sowohl Oberflächenimprägnierungen des Grundwerkstoffes („Monosubstrate Twinlayer“) sowie Oberflächenkaschierungen untersucht und dabei die Schaumdicke des Materials, die Befestigungsart, die Imprägniertiefe, die Dichte und das Flächengewicht der Oberflächenschicht sowie die Beschaffenheit des Grundmaterials variiert. Dabei wird nicht nur die akustische Gesamtwirkung der verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt, sondern auch die Wirksamkeit in verschiedenen Frequenz- und somit Anwendungsbereichen untersucht.

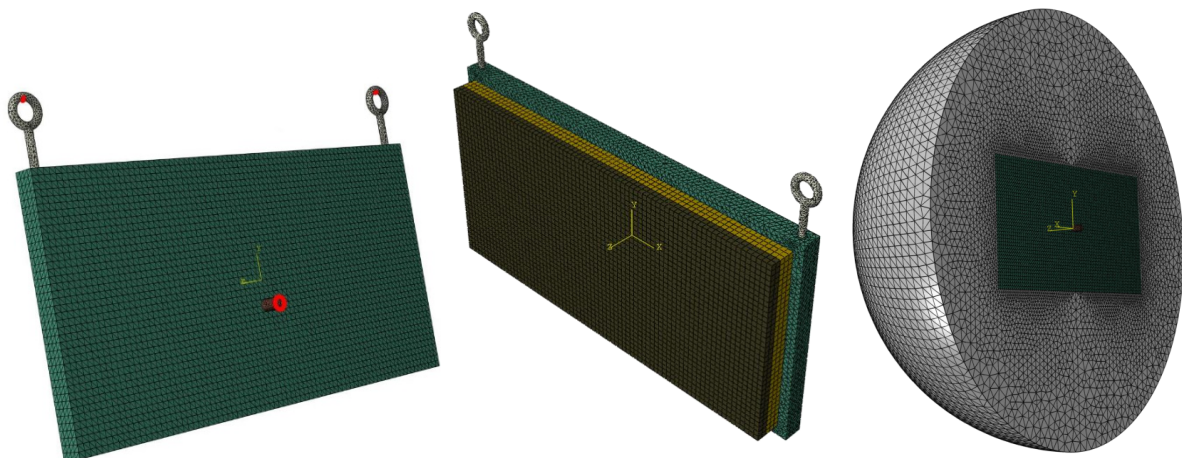
## Abstract

Due to growing customer demands and legal requirements concerning the pass-by-noise of passenger cars, passive and active secondary measures to decrease the engine noise play an increasing role in future engine- and aggregate-developments. The most substantial means of passive secondary measures are acoustically beneficial structural concepts resulting in a modified stiffness of the engine as well as the application of insulation materials as foams and microfiber fleece for the encapsulation of engines and aggregates. Previous investigations have shown that a mass layer glued to a light plastic foam material causes in general an improvement of the damping effect. Based on that fact, insulation materials with different surface layers

are examined in detail and the acoustic potential of the different coatings are determined systematically. Surface impregnations of the basic materials (“monosubstrate twinlayers”) are examined as well as surface laminations. The foam thickness, the method of fixation, the depth of the impregnation, the density and areal mass of the coating and the basic material are varied. Hereby, not only the overall acoustical effect of the damping material is regarded but also its effectiveness in different frequency ranges is studied as well.

## 1. Numerische Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an Plattenmodellen durchgeführt (siehe Kapitel 2 zum Versuchsaufbau). Um auf einfache Weise Parameterstudien durchführen zu können, wurde ein auf der Finite-Element-Methode (FEM) basierendes Simulationsmodell entwickelt und an Hand von experimentellen Ergebnissen verifiziert. Im Experiment wurden sowohl eine 18 mm dicke Aluminiumplatte als auch eine 1 mm dicke Stahlplatte als Basis für das Aufbringen unterschiedlichster Dämmmaterialien benutzt. Dafür wurden entsprechende 3D-Strukturmodelle unter Nutzung von 10-Knoten-Tetraeder-Elementen entwickelt. Für die Modellierung des umgebenden Luftvolumens wurden akustische Tetraeder-Elemente genutzt. Der wesentlich elastischere Kunststoffschaum wurde mit Hilfe von 20-Knoten-Hexaeder-Elementen diskretisiert. Das entwickelte Berechnungsmodell ist in Bild 1 dargestellt. Die Grundplatte wurde mit Tetraeder-Elementen diskretisiert, um auf einfache Weise die Plattenhalterungen und die Anbindung des Shakers sowie Bohrungen, Hohlräume und ähnliche Details in das Modell integrieren zu können. Spezielle Untersuchungen zur Gestaltung der Randbedingungen hatten ergeben, dass die beste Übereinstimmung zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen dann erzielt wird, wenn an den rot markierten Stellen (Aufhängepunkte der Platte und Shaker-Anbindung, siehe Bild 1) alle drei Verschiebungsfreiheitsgrade gesperrt werden.

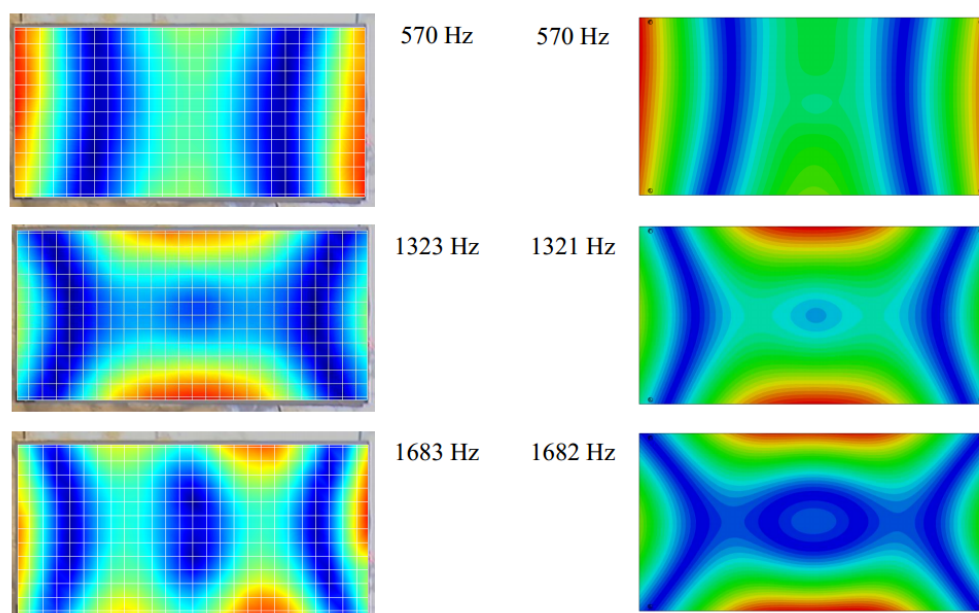


**Bild 1:** Rückseite des Plattenmodells (links), Platte mit Schaum (Mitte), Platte mit Umgebungsluft (rechts)

Die erforderliche Feinheit der Diskretisierung hängt von der Schallgeschwindigkeit in der Platte ab und wird durch die Wellenlänge der oberen Grenzfrequenz des interessierenden Frequenzbereiches bestimmt. Im vorliegenden Fall wurde eine

durchschnittliche Elementkantenlänge von etwa 5 mm genutzt, um auch die Geometriedetails der verschiedenen Bohrungen, Kavitäten, Hülsen, Befestigungshaken- und stifte berücksichtigen zu können und dabei verzerrte Elemente zu vermeiden. Eine Ausnahme bildet das umgebende Luftvolumen, das mit zur Peripherie hin größeren Elementen vernetzt wurde. Insgesamt umfassen die FE-Modelle für die Akustiksimulationen etwa 175.000 Elemente für die Platte inklusive Haken und Shaker-Anbindungsstück (i), zwischen 65.000 und 125.000 Elemente für die Dämmmaterialien der Dicke 15 bis 30 mm(ii) und zwischen 405.000 und 415.000 Elemente für das Luftvolumen(iii). Es konnte auf Grund der hohen Struktursteifigkeit der Platte angenommen werden, dass es keine Rückwirkung des Luftvolumens auf die Festkörperstruktur gibt, so dass auf eine vollständig gekoppelte Struktur-Fluid-Interaktion verzichtet wurde. Für die Berechnung der Schallabstrahlung in die Umgebungsluft unter Freifeldbedingungen wurden an der Peripherie des Luftvolumens impedanzbasierte absorbierende Randbedingungen eingeführt, um die Sommerfeldsche Abstrahlrandbedingung zu erfüllen und Reflexionen vom Fluidrand in das Luftvolumen zu vermeiden.

Um die Funktionalität des Modells sicherzustellen, wurden die Simulationsergebnisse mit Messungen an der Versuchsvorrichtung (siehe Bild 9) verglichen. Dazu wurde die Platte mit einem hochdynamischen elektromagnetischen Schwingungsgenerator mit weißem Rauschen angeregt und die Plattenoberfläche mit Hilfe eines Laservibrometers vermessen. In der Simulation wurde eine identische Erregung verwendet. Die mittels Laservibrometer und Simulation ermittelten Eigenfrequenzen und Eigenformen stimmen sehr gut überein, wie in Bild 2 zu erkennen ist.



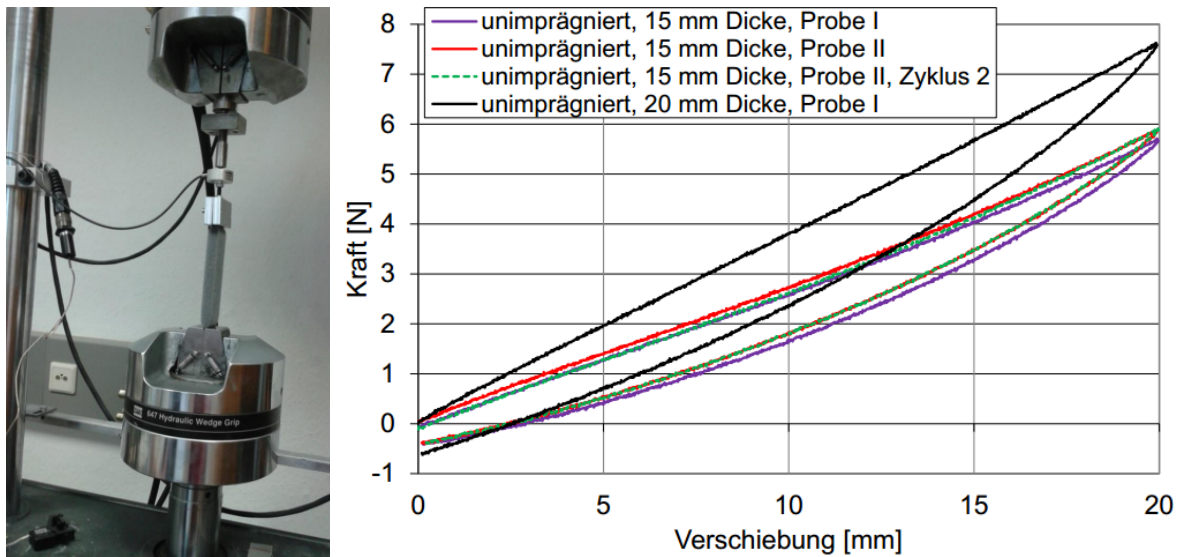
**Bild 2:** Vergleich der Laservibrometermessung der Oberflächenschnelle der schwingenden Platte (links) und Simulationsergebnis (rechts) bei drei Eigenschwingungsformen.

Die Materialkenngrößen der mehrlagigen Schäume wurden mit Hilfe von Zugversuchen bestimmt. Dabei wurden imprägnierte und unimprägnierte Schäume unterschiedlicher Dicke in mehreren Zyklen be- und entlastet, wobei ein Zyklus aus jeweils drei Be- und Entlastungen bestand. Die Ausgangsbreite der Proben betrug 40 mm und die Ausgangslänge 160 mm. Die maximale Längenänderung des Schaums

im Zugversuch wurde auf 20 mm beschränkt. In der praktischen Anwendung fällt die Dehnung deutlich geringer aus und es kann von linear-elastischem Verhalten ausgegangen werden. Aus der gemessenen Kraftdifferenz  $\Delta F$  und der Längendifferenz  $\Delta l$  kann der Elastizitätsmodul ermittelt werden zu

$$E = \frac{\Delta F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l},$$

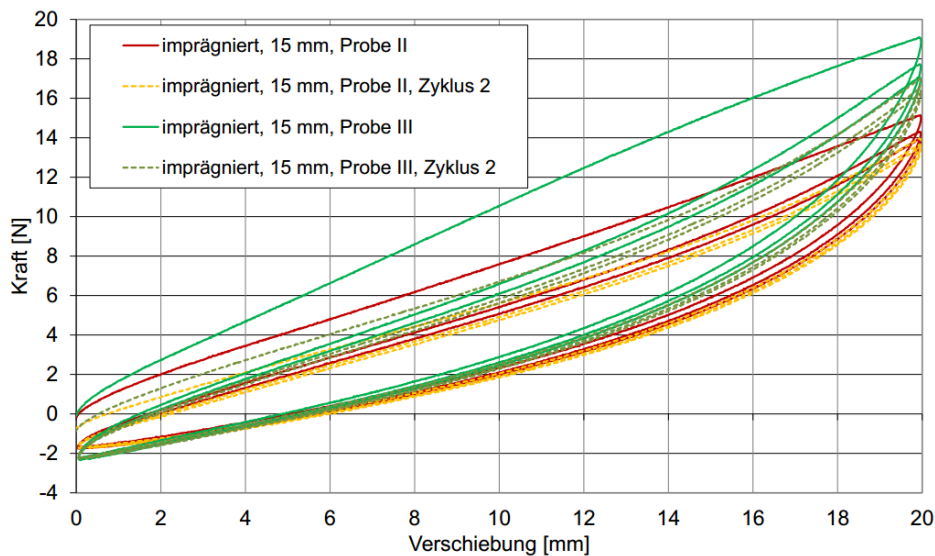
wobei  $A_0$  der Ausgangsquerschnitt und  $l_0$  die Ausgangslänge der Probe ist.



**Bild 3:** Aufbau Zugversuch (links) und Kraft-Verschiebungsdiagramm für unimprägnierte Schäume verschiedener Dicke

Bild 3 links zeigt den Aufbau des Zugversuchs mit der eingespannten Probe, dem induktiven Weggeber und der Kraftmessdose. Auf der rechten Seite von Bild 3 sind die Ergebnisse des Zugversuchs für unimprägnierte Schäume zu sehen. Eine Erhöhung der Dicke des Materials führt zu einer Versteifung (schwarzer Graph). Die Durchführung mehrerer Belastungszyklen bringt keine nennenswerte Änderung im Spannungs-Dehnungsverhalten mit sich, wie die Betrachtung des roten und grünen Graphen zeigt. Anders ist das bei den imprägnierten Schäumen. Hier ist bereits nach einem Belastungswechsel eine Schwächung des Materials erkennbar, die sich in geringerem Maße auch bei den folgenden Belastungswechseln fortsetzt (siehe Bild 4). Der Vergleich der Kraftamplituden in Bild 3 und Bild 4 verdeutlicht, dass imprägnierte Schäume erwartungsgemäß einen größeren E-Modul aufweisen als nicht imprägnierte Schäume. Die Versteifung wird durch das Aufbringen der Imprägnierschicht auf die offenporigen Zellen des Schaums verursacht. Die Absenkung der Kraftamplitude bei mehreren Belastungswechseln deutet auf ein sukzessives Aufreißen des Imprägnats auf den Schaumzellen hin, wodurch seine versteifende Wirkung reduziert wird. Dieser Prozess der schrittweisen Riss- und schließlich Karstbildung in der Imprägnierschicht ist deutlich zu erkennen, tritt aber insbesondere bei großen Verformungsamplituden auf. Bild 4 macht zudem deutlich, dass bei gleichem Materialquerschnitt deutliche Unterschiede in der Ausgangssteifigkeit zweier imprägnierter Schäume auftreten,

welche bei den unimprägnierten Schäumen deutlich geringer ausfallen (Vergleich roter und violetter Graph in Bild 3). Somit ist von einem wichtigen Einfluss des Imprägniervorgangs auf die Steifigkeit der Imprägnierschicht auszugehen.



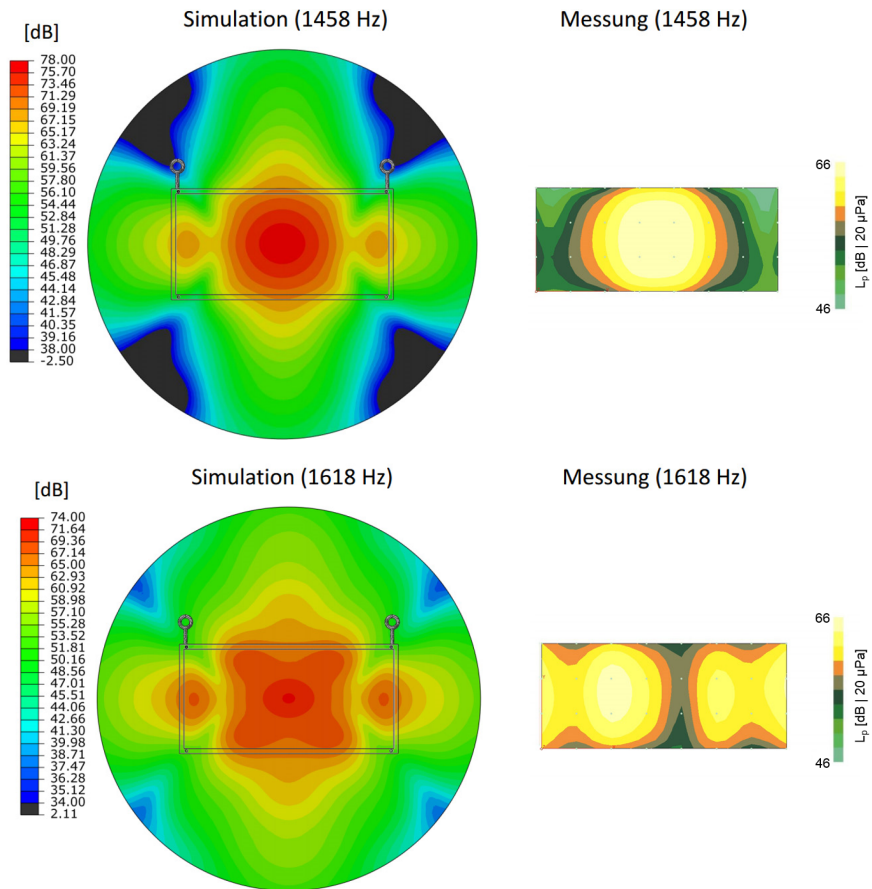
**Bild 4:** Kraft- Verschiebungsdiagramm des Zugversuchs für vollständig imprägnierte Schäume gleicher Dicke

Die Auswertung aller durchgeführten Versuche ergibt für die unimprägnierten Schäume einen E-Modul zwischen 0,057 und 0,062 N/mm<sup>2</sup>, während bei den imprägnierten Schäumen der E-Modul beim ersten Dehnungsvorgang zwischen 0,165 und 0,22 N/mm<sup>2</sup> liegt. Nach sechs Lastwechseln ist eine Verringerung auf etwa 0,14 N/mm<sup>2</sup> bei Schäumen mit geringerem Ausgangs-E-Modul und auf etwa 0,18 N/mm<sup>2</sup> bei denen mit höherem Ausgangs-E-Modul zu verzeichnen. Wie bereits erwähnt, ist diese Abschwächung des E-Moduls eine Folge großer Dehnungsänderungen wie sie bei industriellen Anwendungen des Schaums als Dämmschichten nicht zu erwarten sind.

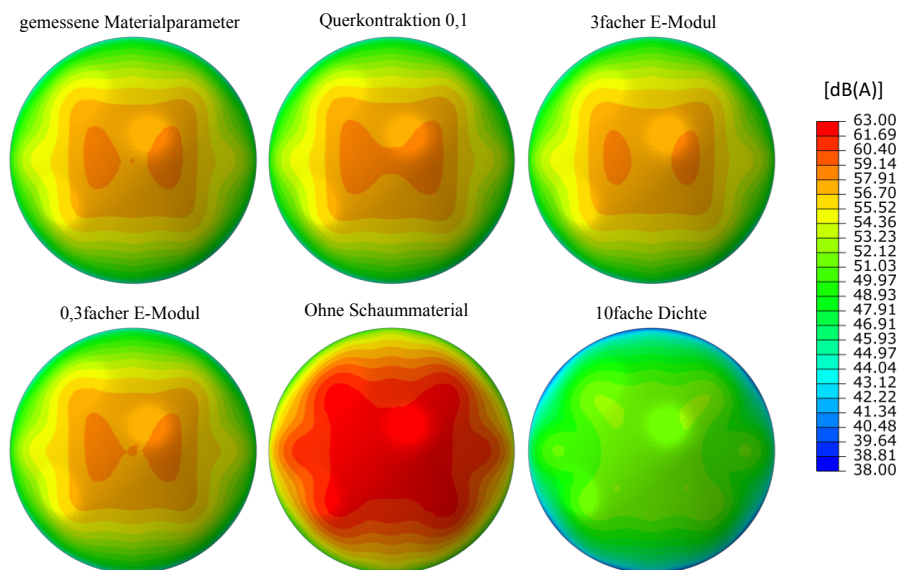
Mit den ermittelten Elastizitäts-Modulen wurde das Simulationsmodell der schwingenden Aluminiumplatte um Modelle mit mehrlagigen Dämmmaterialien erweitert. Die Kontaktfläche zwischen dem Tetraedermodell der Platte und dem Hexaedermodell der Dämmschicht wurde so gestaltet, dass die Knoten weitgehend identisch sind und so auf einfache Weise ein flächiger Kontakt realisiert werden konnte, der einer Verklebung beider Materialien im Experiment entspricht. Die mit dem Modell durchgeführten Berechnungen liefern die Schalldruckverteilung im umgebenden Luftvolumen, die im Experiment mit Hilfe eines Mikrofonarrays gemessen wurde. Das Bild 5 zeigt exemplarisch einen Vergleich von Simulation und Experiment für eine Platte mit einem 20 mm dicken Schaum und einer Imprägnierschicht von 6 mm Dicke für zwei Druckmaxima bei 1458 Hz und 1618 Hz. In beiden Fällen liegen die Peaks des Schalldruckes in der Simulation und im Experiment bei den gleichen Frequenzen. Die Unterschiede im Schalldruckpegel, die insbesondere bei 1618 Hz erkennbar sind, werden vermutlich durch eine vereinfachte Modellierung der Materialdämpfung verursacht. Im Modell wurde eine mittlere Rayleigh-Dämpfung für die gesamte Schicht benutzt, obwohl sich die Dämpfungen in der nicht imprägnierten Schicht von derjenigen der imprägnierten Schicht unterscheiden dürften. Spezielle experimentelle Untersuchungen dazu wurden bisher nicht durchgeführt. Darüber hinaus lassen sich die Parameter des Rayleighmodells



näherungsweise nur so bestimmen, das die tatsächliche frequenzabhängige Dämpfung nur angenähert wird.



**Bild 5:** Vergleich der Schalldruckpegel an zwei Druckmaxima im Plattenversuch in 50 mm Abstand von der Schaumoberfläche in Simulation (links) und Experiment (rechts)

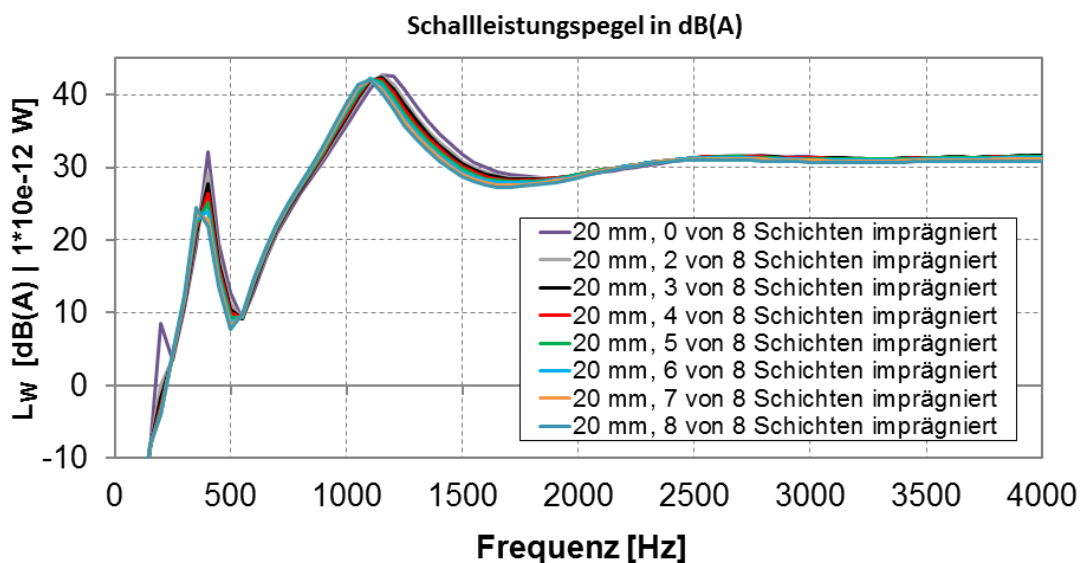


**Bild 6:** Schalldruckpegel von 0-4 kHz bei Änderung der Materialparameter, 20 mm Schaummaterial, Imprägniertiefe 10 mm

Bei einer Variation der Materialparameter Dichte, E-Modul und Querkontraktionszahl zeigte sich bei der Simulation, dass vor allem die Dichte einen signifikanten Einfluß hat, deren Erhöhung eine Reduktion der abgestrahlten Schalleistung bewirkt, wie Bild 6 verdeutlicht. Der Einfluss des E-Moduls und der Querkontraktionszahl sind dagegen gering.

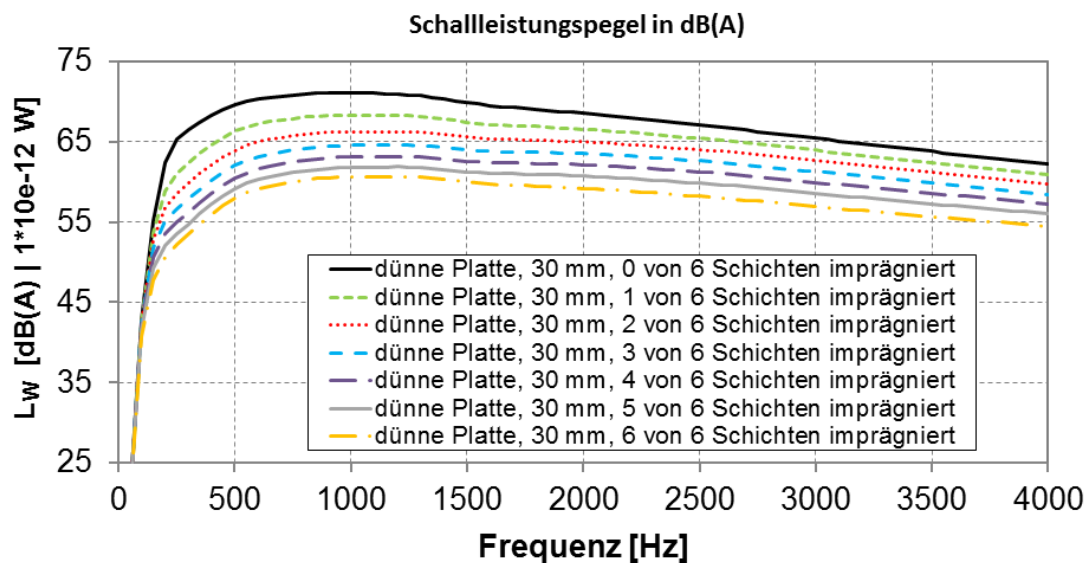
Einen ähnlichen Einfluss zeigt die Vergrößerung der Imprägniertiefe. Die Simulationsergebnisse ergeben eine Absenkung der abgestrahlten Schalleistung mit zunehmender Imprägniertiefe (siehe Bild 7).

In den bisher vorgestellten Untersuchungen dominiert die hohe Steifigkeit der 18 mm dicken Platte, weshalb der in Bild 7 dargestellte Einfluss der Imprägniertiefe auch eher gering ausfällt. Daher wurden die Berechnungen mit einer 2 mm dünnen Platte unter sonst identischen Bedingungen wiederholt. Die Ergebnisse zeigen hier einen deutlich größeren Einfluss der Imprägniertiefe (siehe Bild 8). Eine Vergrößerung der Imprägniertiefe führt zu einer Verringerung der abgestrahlten Schalleistung. Allerdings zeigt der Vergleich von Bild 7 und Bild 8, dass die abgestrahlte Schalleistung der dünnen Platte generell deutlich größer ist als bei der dicken Platte, was eine Folge der geringeren Steifigkeit der dünnen Platte ist. Eine vorherige starke Dehnung des Dämmmaterials im Zugversuch führt, wie bereits erläutert, zu einer Verringerung des E-Moduls und damit der Steifigkeit, wodurch die abgestrahlte Schalleistung zunimmt. Auch hier ist der Einfluss bei der dünnen Platte deutlich größer als bei der dicken Platte.



**Bild 7:** Einfluss der Imprägniertiefe auf die abgestrahlte Schalleistung

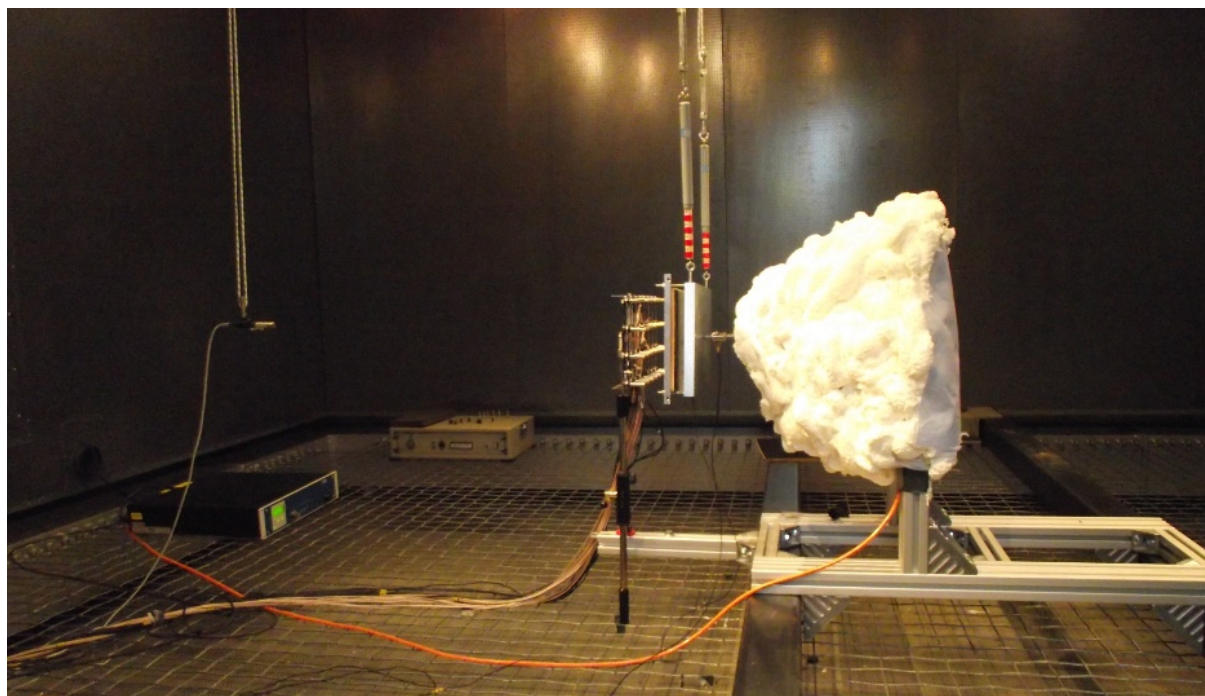
In weiteren Simulationen wurde der Einfluss der Materialdämpfung auf das dynamische Verhalten der Platten und die abgestrahlte Schalleistung untersucht. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass eine Erhöhung der Materialdämpfung der Dämmmaterialien erwartungsgemäß zu einer Reduktion der von den Platten abgestrahlten Schalleistung führt, die bei der dünnen Platte deutlich stärker zum Tragen kommt als bei der dicken Platte. Da im Simulationsmodell der Dämpfungseinfluss nur angenähert werden kann, werden dieser Einfluss und weitere Materialeinflüsse in den experimentellen Untersuchungen genauer untersucht.



**Bild 8:** Einfluss der Imprägniertiefe auf die Schalleistung bei 2 mm dünner Platte

## 2. Experimentelle Untersuchungen

Für die vergleichende Untersuchung der Dämmmaterialien wurde ein Versuchsaufbau realisiert, der die Messungen von äußeren Störgeräuschen abschirmt, die Reflexion des von den Versuchsträgern abgestrahlten Schalles verhindert, und die Störgeräusche durch den Schwingungsgenerator so minimiert, dass der Versuchsträger die dominierende Schallquelle im Versuchsraum ist. Die Messung erfolgte in einem Vollfreifeldraum. Der Versuchsaufbau ist in Bild 9 dargestellt.



**Bild 9:** Versuchsaufbau zur akustischen Vermessung der Dämmmaterialien

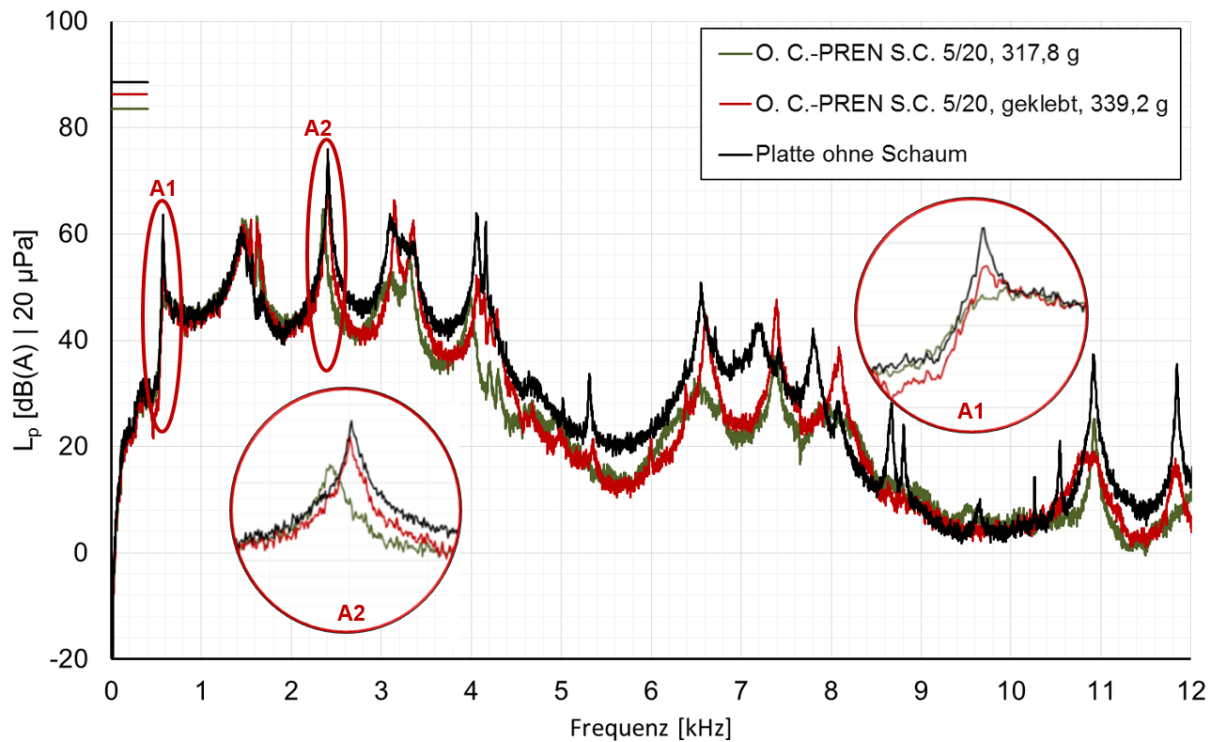


In der Raummitte befindet sich die an zwei Kraftmessern aufgehängte Metallplatte mit aufgebrachtem Dämmmaterial. In einem Abstand von 50 mm zur Oberfläche des zu untersuchenden Materials befindet sich das Mikrofonarray mit 8x4 Mikrofonen auf einer Fläche von 350x150 mm. Die Dämmmaterialproben haben die gleichen Abmaße. Mit dem Mikrofonarray erfolgt die Messung des Schalldruckes im Nahfeld und die Messung der Schalldruckverteilung. Links vom Array ist an der Raumdecke ein Fernfeldmikrofon in einem Abstand von etwa 0,9 m zur Plattenoberfläche angebracht. Der Prüfaufbau ist so realisiert, dass das Fernfeldmikrofon innerhalb des raumspezifischen Hallradius von 1,0 m außerhalb des Diffusfeldes positioniert ist. Rechts von der Metallplatte befindet sich die weiße Umschäumung des elektrodynamischen Schwingungserregers (im Weiteren als Shaker bezeichnet). Die Schaumhülle des Shakers ist so gestaltet, dass die Funktionalität des Shakers nicht beeinträchtigt wird und gleichzeitig das abgestrahlte Shakergeräusch deutlich unter dem der Platte liegt. Der Shaker bringt über eine 10 mm starke Kopplungsstange eine Kraft auf die Platte auf und wird über einen Verstärker (links im Bild) mit weißem Rauschen angeregt, dessen Amplituden- und Phasengang bei allen Versuchen identisch war. In die Kopplungsstange ist ein Impedanzmesskopf eingebaut, mit welchem die Kraftanregung gemessen wird. Vor der Verbindung der Platte mit der Kopplungsstange wurde ihre Aufhängung so justiert, dass die Gewindebohrung der frei hängenden Platte koinzident zum Anschlussgewinde ist. Auf diese Weise wurde eine kraftfreie Anbindung an den Shaker gewährleistet. Die Kraftmesser an der Aufhängung garantieren die Reproduzierbarkeit des Aufbaus bei Demontage der Platte. Für die Untersuchungen wurden, ähnlich wie in der Simulation, zwei verschiedene Platten verwendet: eine 18 mm dicke Aluminiumplatte mit den Maßen 200 x 400 mm und eine Platte aus verzinktem Stahlblech mit einer Dicke von 1 mm, an deren Rückseite ein Stahlzylinder mit einer Gewindebohrung für die Anbindung an den Shaker angelötet wurde. Bei den Versuchen mit der dicken Platte haben die Dämmmaterialien einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit.

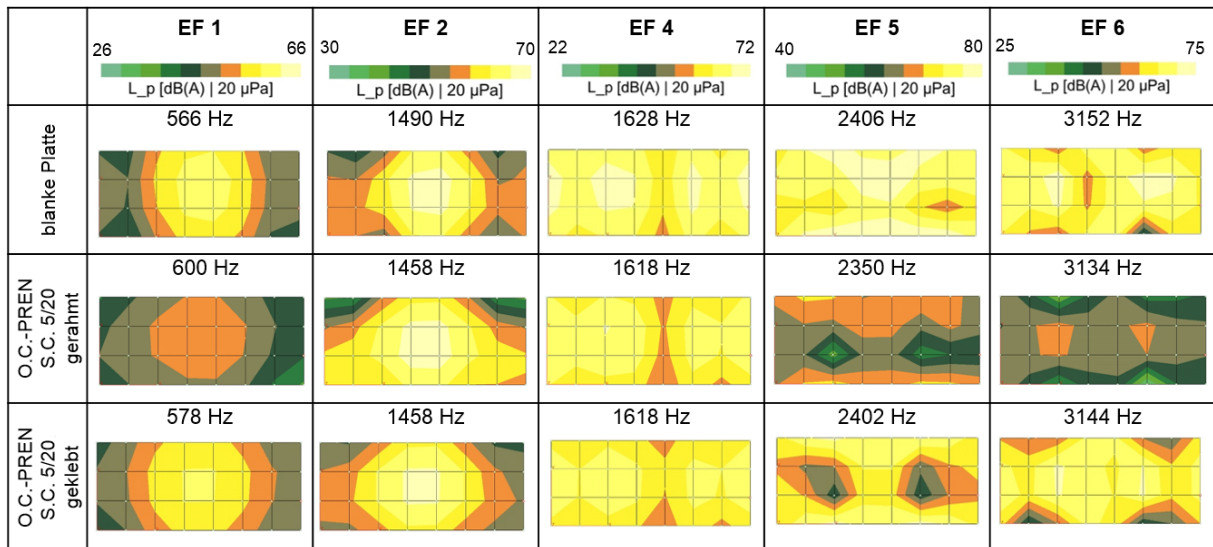
### *Einfluss der Befestigungsart*

Auf der dicken Platte wurden die Dämmmaterialien sowohl flächig aufgeklebt als auch mithilfe eines Kunststoffrahmens an den Rändern fixiert. Die letztere Möglichkeit entfällt bei der dünnen Platte. Hier wurden lediglich flächig aufgeklebte Schäume untersucht. Die Klebung erfolgte mit Hilfe einer auf die Platte aufgetragenen Klebestreifenschicht, wodurch die Dämmmaterialien nach der Messung leicht wieder entfernt werden konnten.

Bild 10 stellt die Auswirkung der Befestigungsart auf den Schalldruckpegel und die Schalldruckpegelreduktion durch imprägnierte Schäume dar. Augenfällig ist die stärkere Pegelreduktion im Falle des in einem Rahmen befestigten Schaumes (z.B. in den Ausschnitten A1 und A2). Bei der Rahmenbefestigung ist der Schaum lediglich an den Rändern mit der Platte gekoppelt, während die Klebung für eine vollflächige Verbindung des Schaums mit Platte sorgt. Die Schalldruckverteilung für ausgesuchte Eigenfrequenzen, welche Bild 11 darstellt, zeigt im Vergleich zum aufgeklebten Schaum eine deutlich schlechtere Übertragung der Schwingung besonders bei der dominierenden 5. Eigenfrequenz, welche im Ausschnitt A2 von Bild 10 dargestellt ist. Insgesamt ergibt sich bei der Rahmenbefestigung eine Summenpegelreduktion von 5 dB, während sie beim geklebten Schaum lediglich 2 dB beträgt. Eine Befestigung der Schäume an wenigen ausgewählten Stellen ist daher einer vollflächigen Klebung vorzuziehen.



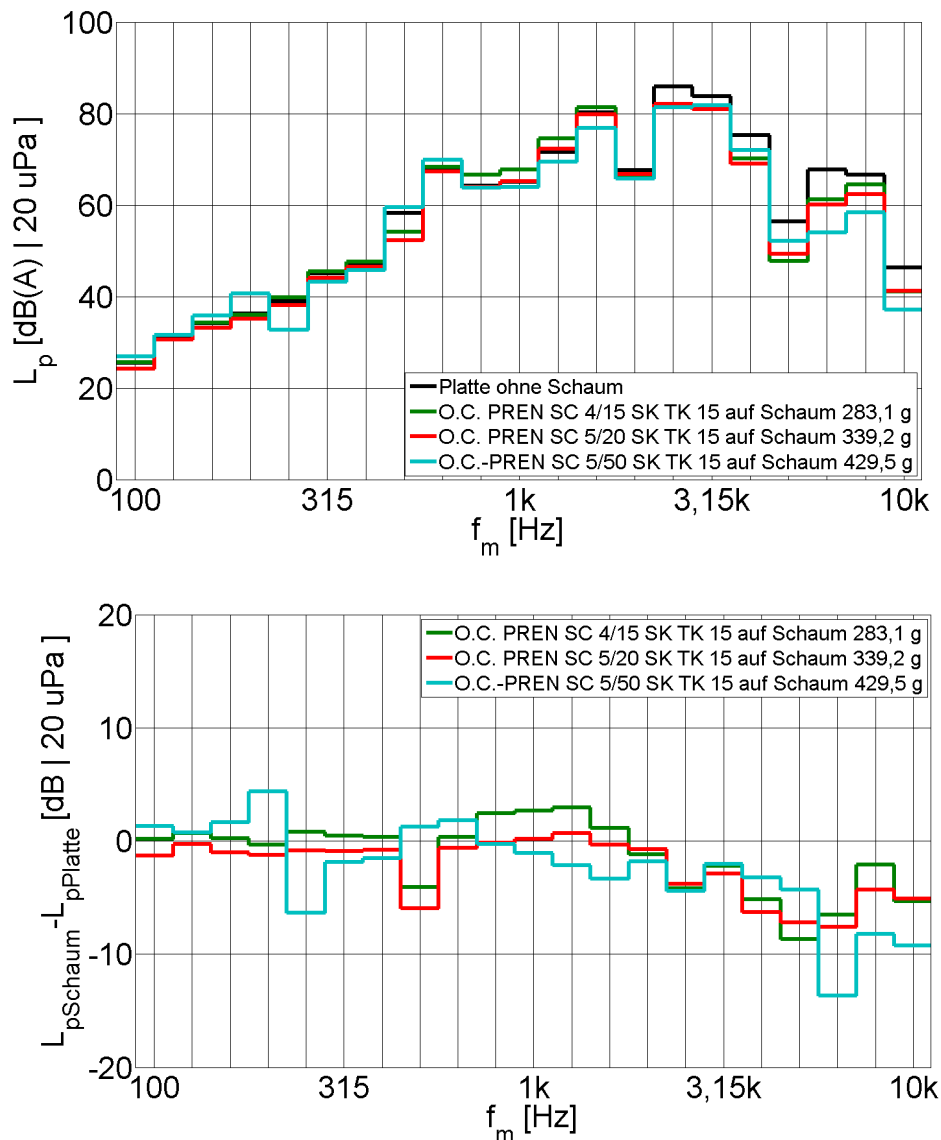
**Bild 10:** Schalldruckpegel im Nahfeld für einen mit Rahmen befestigten (grün) und aufgeklebten Schaum (rot) gleicher Dicke und Imprägniertiefe gegenüber der Platte ohne Schaum (schwarz)



**Bild 11:** Schalldruckverteilung im Nahfeld für die blanke Platte (oben), einem aufgeklebten Schaum (Mitte) und dem mit einem Rahmen befestigten gleichen Schaum (unten) an den dominierenden Schalldruckmaxima

### Einfluss der Schaumdicke

Den Einfluss der Schaumdicke zeigt in Bild 12 die Terzpegeldarstellung von drei Experimenten mit unterschiedlich dicken Schäumen als Dämmschicht. Die A-bewerteten Schalldruckpegel sind im oberen und die Pegelerhöhungen im unteren Diagramm dargestellt.

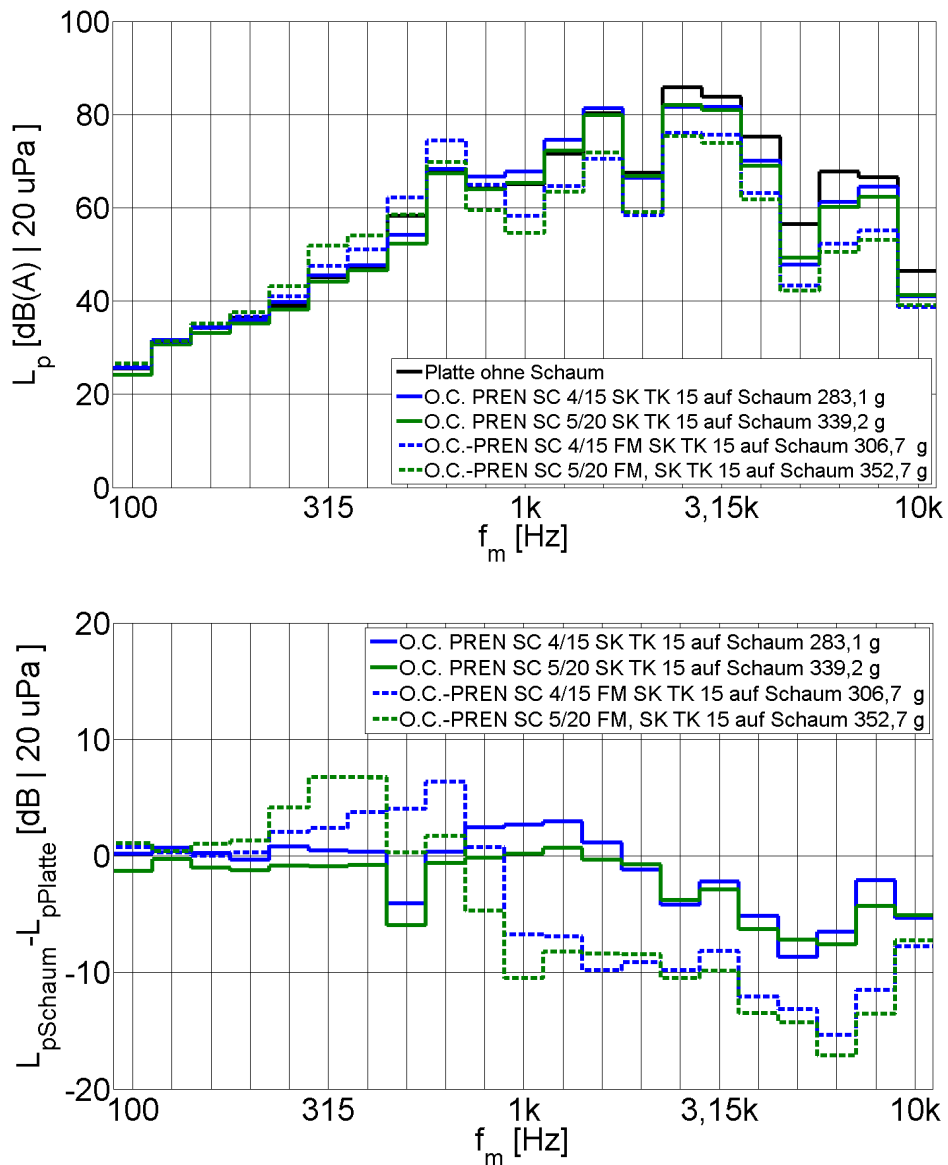


**Bild 12:** Terzpegel (oben) und Terzpegelerhöhung (unten) des Schalldrucks im Nahfeld für Schäume der Dicke 15 (grün), 20 (rot) und 50 mm (türkis) mit imprägnierter Oberflächenschicht

Eine Erhöhung der Schaumdicke führt zu einer besseren Dämmung, vor allem aber auch zu einer Verbesserung im unteren Frequenzbereich, was der rote und der blaue Graph gegenüber dem grünen Graphen in Bild 12 zeigen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Simulation. Untersucht wurden oberflächenimprägnierte Schäume der Dicke 15, 20 und 50 mm, wobei der 50 mm dicke Schaum die besten Resultate ergab.

#### *Einfluss einer Oberflächenkaschierung*

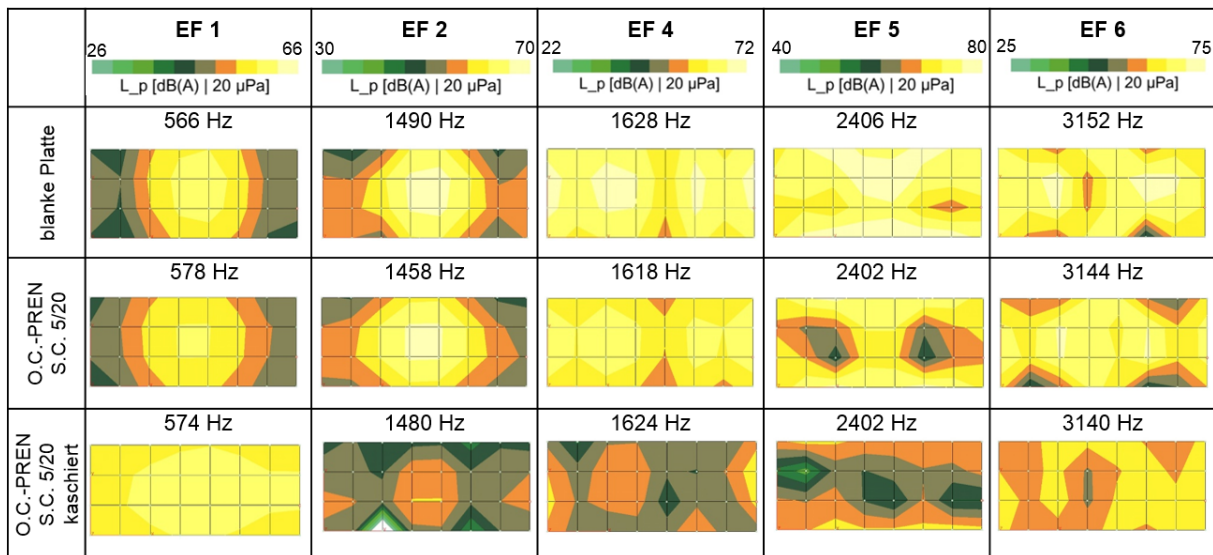
Es folgt die Untersuchung des Einflusses einer zusätzlichen Beschichtung der imprägnierten Oberfläche mit einer dünnen Kunststoffolie (Oberflächenkaschierung). Bild 13 zeigt die Terzpegelerhöhung im Nahfeld der Platte für zwei verschiedene Schaumdicken. Bei Frequenzen oberhalb von 1000 Hz zeigen die Schäume mit einer Oberflächenkaschierung deutliche Pegelreduktionen von bis zu 15 dB, wie die rechte Darstellung in Bild 13 zeigt.



**Bild 13:** Terzpegel des Schalldruckes im Nahfeld und Pegelerhöhungen für oberflächenimprägnierte Schäume der Dicke 15 (blau) und 20 mm (grün) mit (gestrichelt) und ohne Oberflächenkaschierung (durchgezogen)

Bei niedrigen Frequenzen ist jedoch eine leichte Erhöhung der Schalldruckpegel zu konstatieren, welche mit Zunahme der Schaumdicke und damit der Masse zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben wird. Eine solche Erhöhung tritt nicht bei allen Messungen mit kaschierten Materialien auf, lässt sich also nicht eindeutig auf die Kaschierung zurückführen.



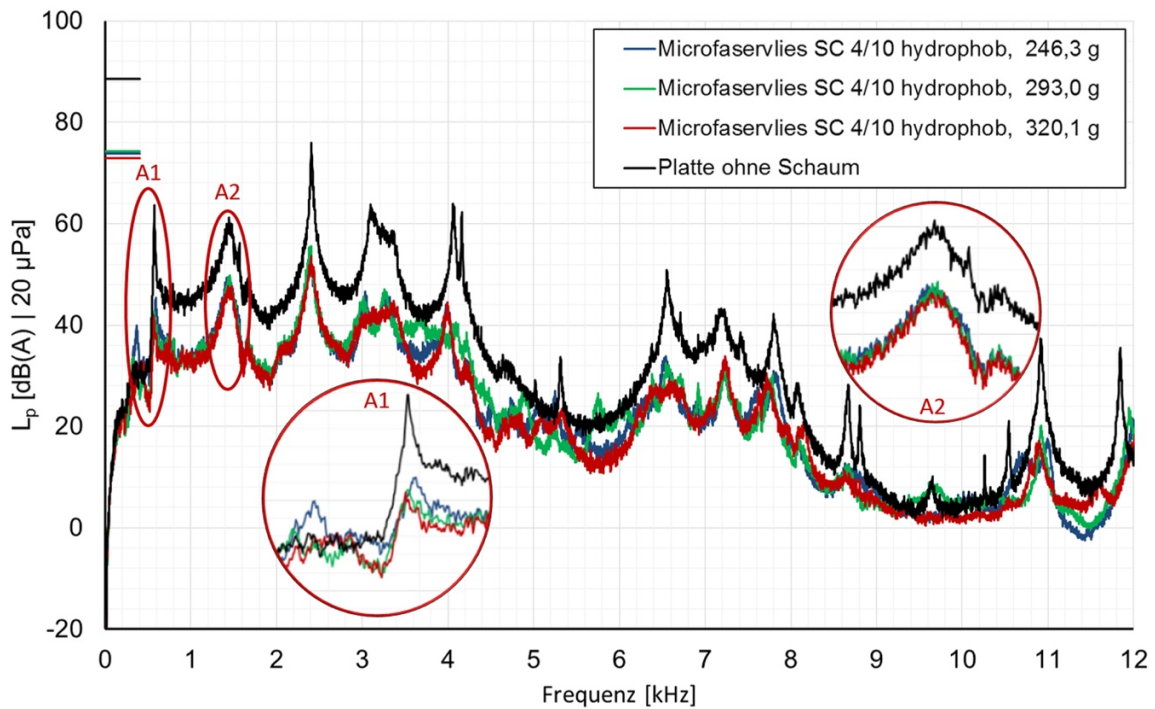


**Bild 14:** Schalldruckverteilung im Nahfeld für die blanke Platte (oben), einem unkaschierten Schaum (Mitte) und seiner kaschierten Variante (unten) an den dominierenden Schalldruckmaxima

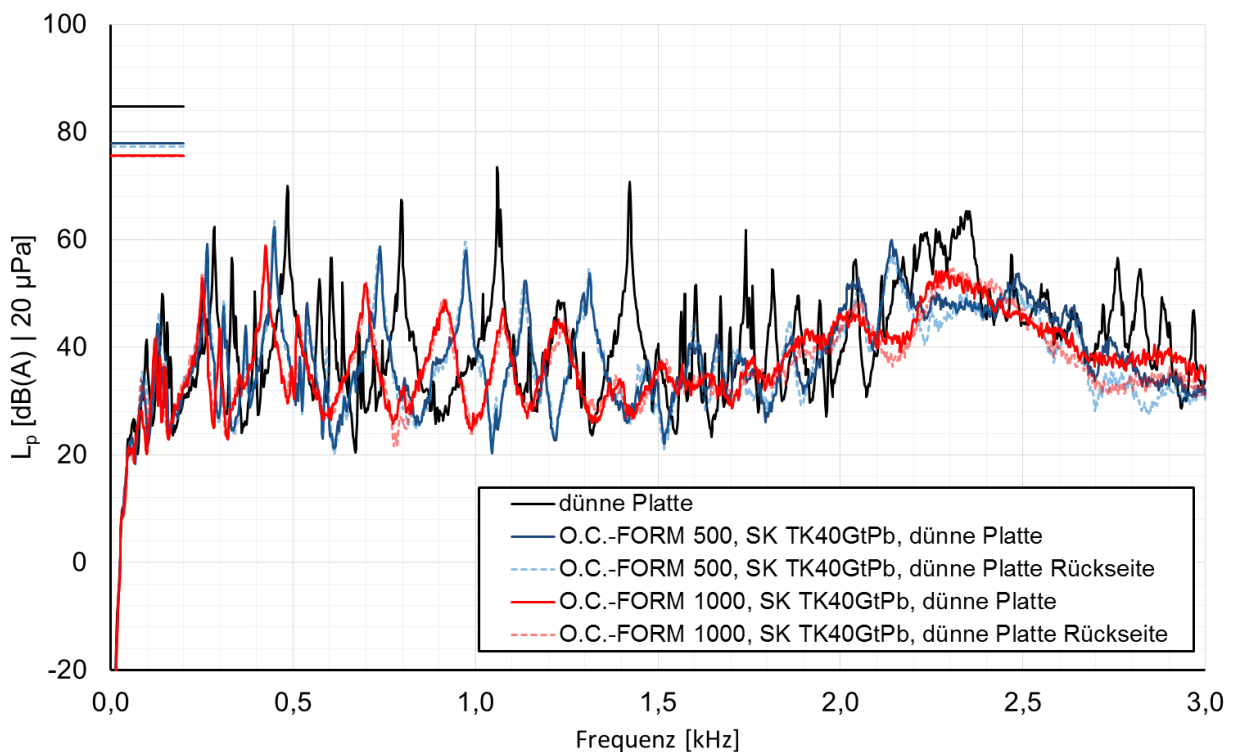
Der positive Einfluss der Oberflächenkaschierung kann auf drei Einflüsse zurückgeführt werden: (i) die Versteifung der Schaumoberfläche, (ii) eine Erhöhung der Masse der Oberfläche (die sich in einer Masseerhöhung des Schaumes niederschlägt) und damit zu einer Erhöhung der inneren Dämpfung des unimprägnierten Schaumes führt und (iii) die innere Reflexion des sich im offenporigen Material ausbreitenden Schalls durch eine quasi-schallharte Oberfläche, welche sich besonders bei höheren Frequenzen zeigt. Dies verdeutlicht auch das Bild 14, das die Schalldruckverteilung im Nahfeld für die dominanten Frequenzen des Schalldruckpegels für die blanke Platte, den nicht-kaschierten Schaum und den kaschierten Schaum zeigt. Dieser zeigt lediglich beim ersten Schalldruckmaximum bei 570 Hz einen größeren Schalldruckpegel. Bei höheren Frequenzen wird die positive Wirkung der Kaschierung deutlich sichtbar, wobei der Unterschied zweier Farbstufen 4 dB oder sogar 5 dB (EF 4 und 6) beträgt.

#### *Einfluss der Dichte des Dämmmaterials*

In der Simulation wurde der Einfluss einer Änderung der Dichte des *gesamten* Materials untersucht, wobei eine Verzehnfachung der Dichte angenommen wurde. Das führt, wie Bild 6 zeigt, zu einer deutlichen Absenkung des Schalldruckpegels. Bei der experimentellen Untersuchung wurde zum Nachweis des Dichteinflusses imprägnierte Mikrofaservliese mit einer Dichte zwischen 469 und 610 kg/m<sup>3</sup> und einer Dicke von 10 mm verwendet. Das führte allerdings nur zu einer Dichteerhöhung auf lediglich das 1,3-fache der Ursprungsdichte. Die unter Nutzung dieses Materials für die dicke Platte erzielte Schalldruckpegel im Nahfeld zeigt Bild 15. Während die Mikrofaservliese mit Oberflächenkaschierung insgesamt eine hohe Pegelreduktion bewirken, fällt der Unterschied bei der Verwendung von Matten verschiedener Dichte relativ gering aus. Der Unterschied im Summenpegel beträgt hier nur etwas mehr als 1 dB. Der Verlauf der Graphen in Bild 15 sowie die dort angegebenen Ausschnittsvergrößerungen A1 und A2 zeigen, dass mit zunehmender Dichte des Materials die Dämpfung zunimmt. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Simulationsergebnissen.



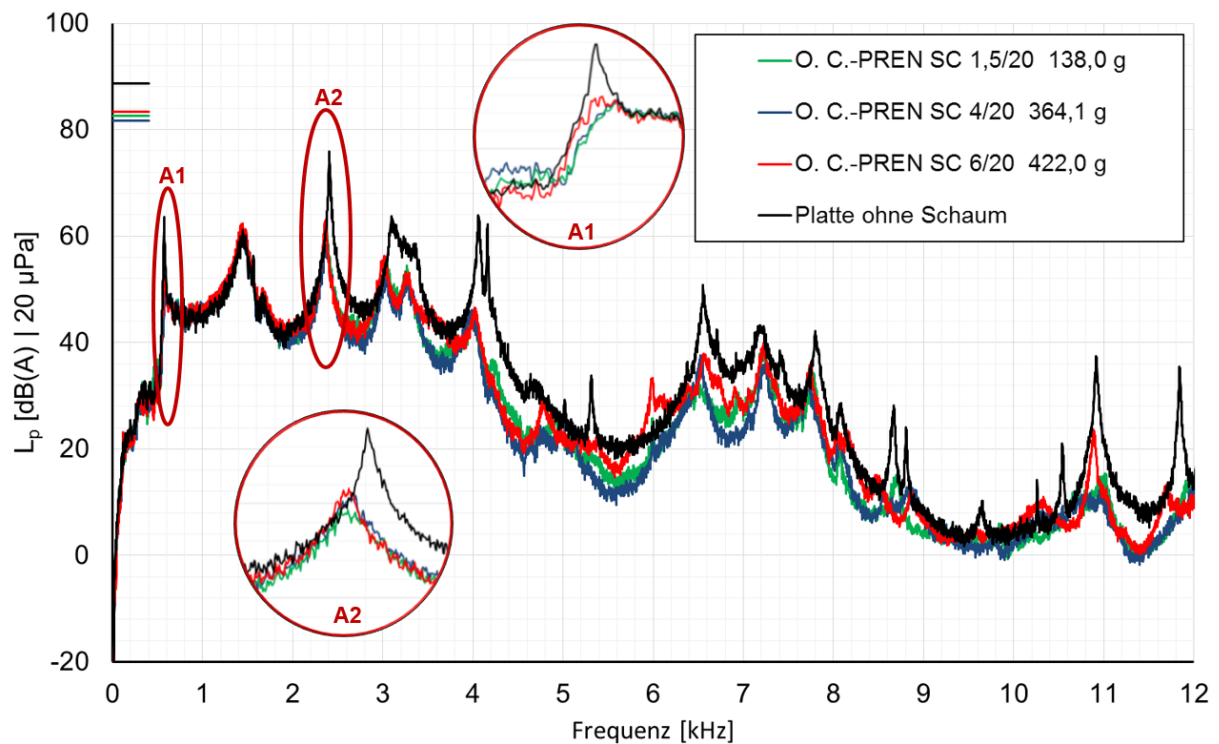
**Bild 15:** Schalldruckpegel (Nahfeld) im Frequenzbereich für Microfaservliese der Dicke 10 mm mit der Dichte 469 (blau), 558 (grün) und 610 kg/m<sup>3</sup> (rot) gegenüber der Platte ohne Verkleidung



**Bild 16:** Schalldruckpegel (Nahfeld) im Frequenzbereich bis 3 kHz für vollimprägnierte Schäume der Dicke 3 mm mit der Dichte 670 (blau) und 1340 kg/m<sup>3</sup> (rot) gegenüber der dünnen Platte ohne Verkleidung. Die gestrichelten Graphen: Schaum auf die Rückseite der Platte geklebt

Noch deutlichere Unterschiede ergeben sich, wenn sich die Dichten um den Faktor 2 unterscheiden. Dazu wurden Versuche an einer 1 mm dünnen Platte durchgeführt. Diese wurde vollständig mit 3 mm dicken, imprägnierten Schäumen beklebt. Es wurden Schäume mit 2 verschiedenen Dichten von  $670 \text{ kg/m}^3$  und  $1340 \text{ kg/m}^3$  untersucht. Durch die Verdopplung der Schaumdichte wurde eine Summenpegelreduktion von 2,5 dB erzielt, wie die Linien zur Darstellung des Summenpegels an der Ordinate von Bild 16 verdeutlichen. Die Vorteile des schwereren Schaumes gegenüber dem leichteren zeigen sich vor allem im Frequenzbereich unter 2500 Hz. Aufgrund der geringeren Steifigkeit der Platte werden durch die Dämmmaterialien auch niedrigere Eigenfrequenzen unterhalb von 500 Hz gut gedämpft. Für die Dämpfungswirkung ist es unerheblich, ob der Schaum auf der Vorder- oder der Rückseite der Platte angebracht wird, wie die fast vollständige Übereinstimmung der gestrichelten und nicht-gestrichelten Graphen in Bild 16 zeigt.

### Einfluss der Imprägniertiefe



**Bild 17:** Schalldruckpegel (Nahfeld) für mit Rahmen befestigte Schäume der Dicke 20 mm mit Imprägniertiefen von 2 (blau), 6 (grün) und 10 mm (rot) gegenüber der dicken Platte ohne Verkleidung (schwarz).

In den Versuchsergebnissen für 20 mm dicke Grundschäume mit Imprägniertiefen von 2, 6 und 10 mm zeigt der Schaum mit 10 mm Tiefe interessanterweise die schlechtesten Ergebnisse. Sein Gesamtschalldruckpegel liegt 1,6 dB oberhalb des Schaumes mit einer Imprägniertiefe von 6 mm. Auch der Summenpegel des Schaums mit einer Imprägniertiefe von lediglich 2 mm führt noch zu einem besseren Ergebnis als der 10 mm tief imprägnierte Schaum. Die Ergebnisse sind in Bild 17 für den Fall dargestellt, dass der Schaum jeweils mit einem Rahmen auf der Platte befestigt wurde. Auch bei einer Klebefestigung liefert der Schaum mittlerer Imprägniertiefe das beste Ergebnis mit einer Pegeldifferenz von 1,7 dB gegenüber den beiden anderen

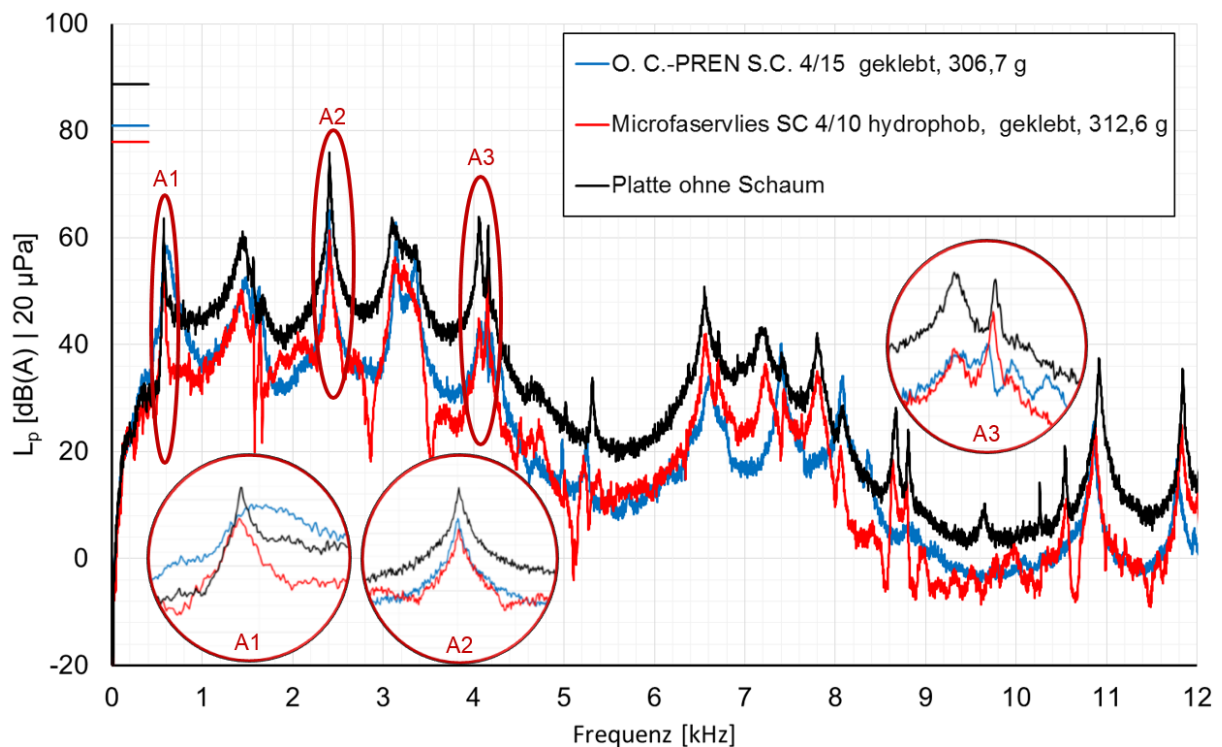
Imprägniertiefen. Somit scheint bei der Imprägnierung der Schäume nicht eine vollständige, sondern eine Imprägnierung von etwa 1/3 der Schaumdicke optimal für die Schallabsorption an schwingenden Oberflächen zu sein.

### *Einsatz von Mikrofaservlies*

Als Grundmaterialien wurden neben offenporigen Polyurethanschäumen auch Microfaservliese eingesetzt, welche ebenfalls mit einer Oberflächenimprägnierung versehen wurden und teilweise auch eine Oberflächenkaschierung aufwiesen. Letztere zeigten ähnlich positive Effekte wie sie schon bei den Kunststoffschäumen beschrieben wurden. Insgesamt zeigten die Microfaservliese gegenüber Kunststoffschäumen ähnlichen Gewichts, gleicher Befestigungsart und gleicher Oberflächenbeschichtung durchweg höhere Summenpegelreduktionen bei geringerer Materialdicke (10 mm). Es wurden Summenpegelreduktionen bis zu 15 dB gegenüber der unverkleideten dicken Platte gemessen. Wie bereits Bild 15 zeigt, ist eine geringfügige Pegelreduktion bei höherer Masse zu erkennen. Bild 18 stellt die akustische Wirkung eines durchschnittlichen Mikrofaservlieses derjenigen eines PUR-Schaumes mit gleicher Masse, gleicher Oberflächenbeschichtung und gleicher Befestigungsart gegenüber. Mit dem Microfaservlies wird gegenüber dem Schaum eine Pegelreduktion von zusätzlich 3,2 dB erzielt. Bereits bei den ersten dominanten Frequenzen zeigt das Vlies eine bessere dämpfende Wirkung als der PUR-Schaum mit Oberflächenimprägnierung (Ausschnitte A1 und A2). Bei höheren Frequenzen tritt teilweise eine Erhöhung des Schalldruckes gegenüber dem PUR-Schaum auf (z. B. Ausschnitt A3), was auf die größere Steifigkeit des Vlieses zurückgeführt werden kann. Die Verbesserung der akustischen Dämmung ist auf eine vergrößerte innere Reibung der Vliese zurückzuführen, welche einen größeren Teil der Schwingungsenergie in Wärme umwandelt.

Die oberflächenimprägnierten Microfaservliese, deren Wirkung hier erörtert wurde, weisen eine gegenüber den oben untersuchten PUR-Schäumen eine hohe Dichte und grobe, enggepackte Fasern auf. An der dünnen Platte wurde eine vergleichende Untersuchung für Vliese mit feineren, weniger dicht gepackten Fasern, einem geringeren Flächengewicht und einer größeren Dicke (25 mm) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigt das Bild 19 in dem akustisch dominierenden Frequenzbereich der dünnen Platte von 0 bis 3000 Hz. Die Ergebnisse für die feineren Microfasern sind violett und hellblau dargestellt. Das violett dargestellte Microfaservlies weist gegenüber dem blau dargestellten Vlies zusätzlich noch eine Masseschicht aus einem 3 mm dicken elastischen Kunststoff mit einer Vlies-Oberfläche auf. Das Ergebnis für den dichten aber groben Microfaservlies wurde in Bild 19 mit einem grünen Graphen dargestellt. Der rote Graph zeigt die Wirkung eines PUR-Schaumes mit einer 3 mm dicken Kunststoffschicht auf der Oberfläche. Dieser Schaum lieferte bei den vorhergehenden Untersuchungen der Kunststoffschäume ähnlich gute Ergebnisse wie ein oberflächenimprägnierter und -kaschierter Schaum der Dicke 20 mm und weist im Vergleich zu diesem Schaum ein geringeres Gewicht von 308,1 g (5,87 kg/m<sup>2</sup>) auf.

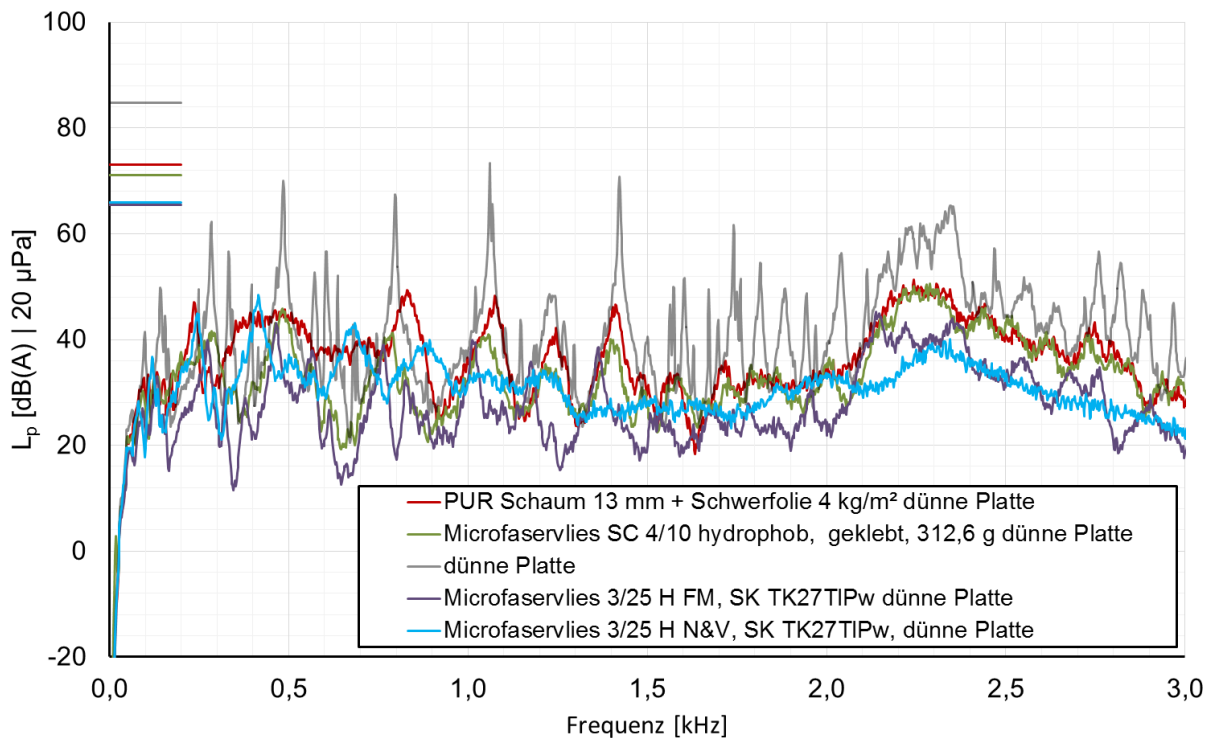




**Bild 18:** Schalldruckpegel (Nahfeld) bei einer Verkleidung mit einem imprägnierten PUR-Schaum (blau) und einem Microfaservlies ähnlicher Masse und Oberflächenbeschaffenheit gegenüber der unverkleideten dünnen Platte

Mit der Summenpegeldarstellung an der Ordinate kann die Pegelreduktion durch die einzelnen Dämmmaterialien verglichen werden. Gut erkennbar ist in Bild 19 die Summenpegelreduktion von 3 dB für das dicht gepackten Microfaservlieses SC 4/10 gegenüber dem PUR Schaum mit Schwerfolie. Gegenüber dem dichten Microfaservlies weist der Schaum mit dem geringeren Oberflächengewicht, den dünneren Fasern und der wenig dichten Packung noch einmal eine um 6 dB größere Summenpegelreduktion auf. Im Vergleich zu unverkleideten Platte wird durch den Schaum insgesamt eine Summenpegelreduktion von über 18 dB erreicht. Bei genauerer Betrachtung des violetten und des blauen Graphen fällt auf, dass das Microfaservlies mit einer Masseschicht bei niedrigen Frequenzen eine bessere Wirkung zeigt als das Vlies ohne eine solche Massenschicht (blau). Ab Frequenzen über 1 kHz erscheint hingegen das Microfaservlies ohne eine Massenschicht eine bessere Wirksamkeit zu erreichen. Für Anwendungen mit dominierenden Schalldrücken im unteren Frequenzbereich ist somit die Anwendung einer Masseschicht auf der Oberfläche des Microfaservlieses empfehlenswert. Insgesamt zeigt die Betrachtung, dass durch die Verwendung dünnerer Fasern und einer weniger dichte, aber voluminösere Packung die schalldämmende Wirkung der Microfaservliese deutlich und hörbar zunimmt.

### Schalldruckpegel Nahfeld Einfluss dünne Platte

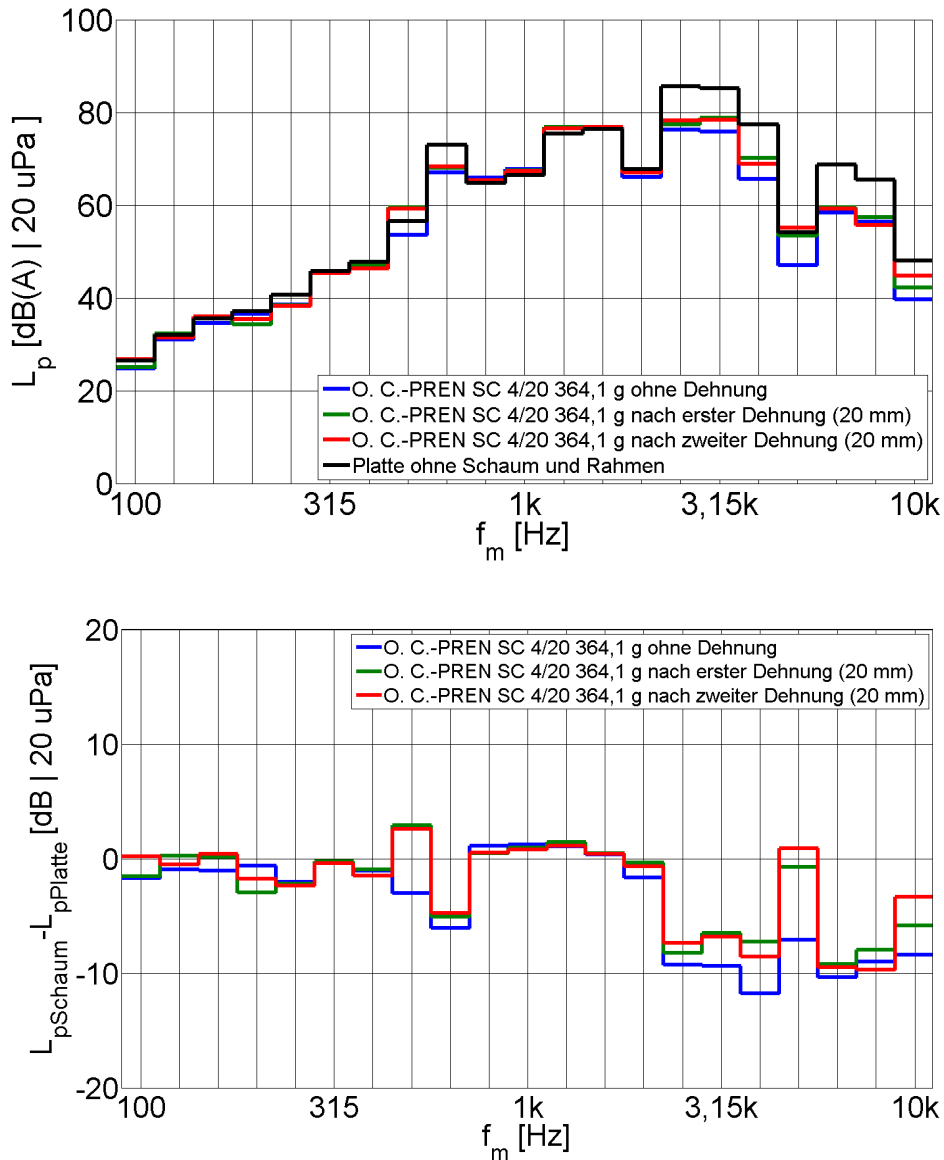


**Bild 19:** Schalldruckpegel (Nahfeld) im Frequenzbereich 0-3 kHz für verschiedene Microfaservliese (grün, violett, blau) gegenüber dem optimalen PUR-Schaum (rot) und der dünnen, unverkleideten Platte (grau)

Microfaservlies ohne eine Massenschicht eine bessere Wirksamkeit zu erreichen. Für Anwendungen mit dominierenden Schalldrücken im unteren Frequenzbereich ist somit die Anwendung einer Masseschicht auf der Oberfläche des Microfaservlieses empfehlenswert. Insgesamt zeigt die Betrachtung, dass durch die Verwendung dünnerer Fasern und einer weniger dichte, aber voluminösere Packung die schalldämmende Wirkung der Microfaservliese deutlich und hörbar zunimmt.

#### *Einfluss einer Vordehnung von imprägnierten Schäumen*

In einer abschließenden Untersuchung wurde die akustische Wirkung einer Materialdehnung von 20 mm bei einer Einspannlänge von etwa 330 mm an einem unkaschierten PUR-Schaum mit Oberflächenimprägnierung ermittelt. Ein solcher Fall tritt in der dämmtechnischen Praxis nur selten auf. Mit den Versuchen sollte vielmehr die Wirkung einer Absenkung des Elastizitätsmoduls der Masseschicht untersucht werden. Anhand von Bild 4 im Abschnitt „Simulation“ wurde bereits eine Schwächung des imprägnierten Schaummaterials durch eine aufgebraute Vordehnung nachgewiesen. Beim unimprägnierten Material konnte der Einfluss einer Vordehnung nicht nachgewiesen werden. Mit der Minderung der Steifigkeit der Imprägnierschicht könnte die akustische Wirkung des Materials insgesamt nachlassen. Deshalb wurde der erwähnte Schaum zunächst im Anlieferzustand, dann nach einer Dehnung und Entspannung, sowie nach einer zweiten Dehnung auf die dicke Grundplatte aufgebracht, vermessen und danach mit Hilfe eines Rahmens befestigt. Die Ergebnisse dieser Messung sind in Bild 20 sind in Form einer Terzpegeldarstellung angegeben.



**Bild 20:** Terzpegel (oben) und Terzpegelerhöhung (unten) des Schalldrucks im Nahfeld eines imprägnierten PUR-Schaumes im Ausgangszustand (blau), nach einmaliger Dehnung (grün) und nach zweimaliger Dehnung (rot) um jeweils 20 mm

Sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Frequenzen zeigt die einmalige und zweimalige Dehnung eine negative Wirkung auf das Dämpfungsverhalten des Schaumes. Eine Absenkung des E-Moduls der Imprägnierschicht führt somit im Experiment zu einer Verminderung der akustischen Wirksamkeit des Materials, welche sich in der Simulation erst bei deutlich größeren Veränderungen des E-Moduls zeigt (siehe Bild 6). Der Summenpegel erhöht sich nach der ersten Dehnung um 1,1 dB erhöht und erhöht sich nach der zweiten Dehnung nochmals zusätzlich um 0,1 dB.

### 3. Fazit und Ausblick

Die folgenden Schlussfolgerungen können aus der simulativen und experimentellen Untersuchung gezogen werden:

1. Auf einer schwingenden Oberfläche bietet die Fixierung eines Dämmmaterials an den Rändern gegenüber einer flächigen Klebung einen akustischen Vorteil im gesamten Frequenzbereich, besonders aber bei Frequenzen über 2000 Hz.
2. Die Erhöhung der Masse/Dichte eines Dämmmaterials führt zu einer Reduktion des abgestrahlten Schalls. Die Wirkung ist sowohl bei steifen als auch bei wenig steifen Oberflächen im unteren Frequenzbereich am größten.
3. Eine Schwächung des E-Moduls der Oberflächenschicht bewirkt eine Absenkung der dämmenden Wirkung des Materials, besonders bei höheren Frequenzen.
4. Eine Oberflächenkaschierung des Dämmmaterials liefert ab Frequenzen oberhalb von 1000 Hz eine Reduktion des Schalldruckpegels und ist sowohl bei Microfasern als auch PUR-Schäumen akustisch vorteilhaft.
5. Mit zunehmender Dicke eines Schaumes nimmt seine akustische Wirksamkeit zu.
6. Die Imprägniertiefe oder das Dickenverhältnis der Masseschicht zur Dämpfungsschicht liefert bei einem Verhältnis von 1:2 die besten Ergebnisse. Sowohl eine zu dünne Dämpfungsschicht, als auch eine zu dünne Massenschicht mindert die Absorptionsfähigkeit des monosubstraten Twinlayers.
7. Microfaservliese mit und ohne Oberflächenimprägnierung haben auch bei geringerer Materialstärke eine bessere akustische Wirkung als PUR-Schäume gleicher Masse, auch bei niedrigen Frequenzen. Diese Wirkung wird verstärkt, wenn die Microfasern fein und wenig dicht gepackt sind. Durch die Verwendung einer Massenschicht an der Oberfläche wird das Absorptionsverhalten der Microfaser bei niedrigen Frequenzen verbessert.

Durch die Untersuchungen gelang es, vorteilhafte Materialkonfigurationen für die Anwendung an schwingenden Motoroberflächen zu ermitteln. Die leichten Microfaservliese erscheinen beispielsweise unmittelbar für die Dämmung der Ölwanne und von Teilen des ZKG geeignet. Weiterführende Untersuchungen müssen daher die Applikation der entsprechenden Materialien am Motor, ihre Anwendung als Teil- oder Vollkapselung und die Auswirkung dieser Maßnahmen auf die abgestrahlte Schalleistung ermitteln. Ebenfalls von Interesse ist in diesem Zusammenhang die psychoakustische Verbesserung des Motorgeräusches hinsichtlich solcher Parameter wie Lautheit, Impulshaltigkeit, Schärfe, Schwankungsstärke sowie Rauigkeit des Geräusches.

#### **4. Danksagung**

Die hier durchgeführten Untersuchungen wären ohne die Bereitstellung von Dämmmaterialien in umfangreicher Anzahl und in einer Vielzahl von Variationen durch die Odenwald-Chemie GmbH nicht möglich gewesen.



## Literatur

- [1] P. Schrader, F. Duvigneau, T. Luft, U. Gabbert, H. Rottengruber: Entwicklung einer funktionsintegrierten wärme- und schalldämmten Ölwanne, 40. *Jahrestagung für Akustik - DAGA*, Oldenburg, 2014
- [2] 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