

## **Untersuchungen zur Erfassung von Absorption bei gekoppelten Fluid/Struktur-Analysen von Gesamtkraftfahrzeugmodellen**

Dr.-Ing. **Carsten Schedlinski**, ICS Engineering GmbH, D-63206 Langen  
Dipl.-Ing. **Cedric Arzul**, Audi AG, D-85045 Ingolstadt  
Dipl.-Ing. **Klaus Bohnert**, Porsche AG, D-71287 Weissach  
Dr.-Ing. **Dirk Clasen**, Volkswagen AG, D-38436 Wolfsburg  
Dr.-Ing. **Christian C. Glandier**, Daimler AG, D-71059 Sindelfingen  
Dipl.-Math. **Andreas Kropp**, BMW AG, D-80788 München  
B.Eng. **Emiel Tijs**, Microflown Technologies, NL-6826 CC Arnhem

### **1. Kurzfassung**

Um treffsichere Aussagen über das akustische Verhalten im Innenraum von Kraftfahrzeugen zu erhalten, ist eine ausreichende Kenntnis des Absorptionsverhaltens erforderlich. In dieser Veröffentlichung werden Möglichkeiten vorgestellt, die einen vergleichsweise einfachen Weg zur lokalen Erfassung von Absorption bei Gesamtkraftfahrzeugmodellen aufzeigen. Die Anwendung wird am Beispiel einer Rohkarosserie mit Anbauteilen demonstriert.

### **2. Einleitung**

Um treffsichere Aussagen über das akustische Verhalten im Innenraum von Kraftfahrzeugen zu erhalten, ist, neben der Kenntnis der Massen, Dämpfungen und Steifigkeiten der Struktur, auch eine ausreichende Kenntnis des Absorptionsverhaltens erforderlich.

Da eine globale Erfassung des Absorptionsverhaltens, z. B. über eine globale modale Dämpfung des Fluids, nur schwer auf unterschiedliche Aufbauzustände übertragen werden kann, ist eine lokale und individuelle Erfassung der Absorption der relevanten Trim-Komponenten von Vorteil. In dieser Veröffentlichung werden daher zwei Strategien zur lokalen und individuellen Erfassung der Absorption von Trim-Komponenten vorgestellt.

Der Einsatz der Methoden wird am Beispiel einer Rohkarosserie mit Anbauteilen aufgezeigt.

### 3. Berücksichtigung der Absorption im Innenraum von Kraftfahrzeugen

Zur Modellierung der Absorptionseigenschaften von Trim-Komponenten sollen im Folgenden zunächst drei gängige Verfahren vorgestellt werden.

Eine Möglichkeit die Absorptionseigenschaften im FE-Modell zu erfassen, ist die Modellierung als so genanntes „äquivalentes Fluid“ [1]. Hierbei erfolgt die Beschreibung über die Helmholtzgleichung für das akustische Fluid. Lediglich die Schallgeschwindigkeit sowie die Dichte werden durch Werte ersetzt, die sich aus den Materialparametern des porösen Stoffes ergeben. Für die Ermittlung dieser Parameter gibt es unterschiedliche Ansätze z. B. nach Delany und Bazley [2]. Das Verfahren eignet sich jedoch nur für poröse Materialien mit starrem oder sehr weichem Festkörperskelett, bei denen sich alleine Druckwellen ausbreiten.

Eine allgemeine Formulierung basiert auf der Theorie nach Biot [3]. Hierbei wird die Wellenausbreitung sowohl im Festkörperskelett als auch der Fluidphase beschrieben. Zudem wird die Interaktion der Phasen untereinander berücksichtigt. Dieser Ansatz ist in verschiedenen Software-Werkzeugen (z. B. Rayon VTM [4], CDH Exel oder Actran/VA) implementiert.

Der einfachste Ansatz zur Beschreibung des Absorptionsverhaltens besteht in der Modellierung als Impedanzrandbedingung [5] und soll im Folgenden genutzt werden. Dieser Ansatz ist, im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Verfahren, nicht auf poröse Materialien begrenzt, sondern kann zur Modellierung verschiedenster Materialien eingesetzt werden. Er ist zudem praktisch in allen gängigen FE-Programmen implementiert. Die Impedanz beschreibt das Verhältnis in Amplitude und Phase von einlaufender und reflektierter Welle. Sie ist in der Regel komplexwertig und frequenzabhängig.

Eine verlässliche Modellierung der lokalen Absorption von Trim-Komponenten ist dabei auf Grund von Schwierigkeiten bei der experimentellen Bestimmung der Impedanzen (und damit Absorptionswerte) nicht immer einfach zu erreichen. So besteht eine Schwierigkeit darin, dass zum Teil nur kleine Proben der Komponenten, z. B. im Impedanzrohr, untersucht werden, und dass die derart ermittelten Absorptionswerte von denen der gesamten Komponente abweichen können. Und selbst wenn größere Proben untersucht werden (Hallraummethode,  $\alpha$ -Kabine), kann das Absorptionsverhalten im Einbauzustand durch die umgebenden Materialien weitere Veränderungen erfahren.

Es wäre also von Vorteil, das Absorptionsverhalten direkt im eingebauten Zustand zu untersuchen, um sämtliche relevanten Einflüsse zu erfassen. Hier werden daher zwei neue Ansätze vorgestellt, die genau dazu in der Lage sind: zum einen handelt es sich um ein Verfahren, dass die Absorptionswerte aus gemessenen Schalldrücken im Fahrzeuginnenraum identifiziert; zum anderen um eine Methode, die mittels einer speziellen Apparatur Absorptionswerte direkt aus Impedanzmessungen im Fahrzeuginnenraum ermittelt.

### **3.1. Identifikation aus gemessenen Frequenzgängen**

Die Identifikation der lokalen Absorption von Trim-Komponenten aus gemessenen Schalldrücken im Fahrzeuginnenraum ist eine direkte Erweiterung des Verfahrens zur Identifikation von lokalen Strukturdämpfungen, das in [6] ausführlich beschrieben wird. Speziell werden hier mit Hilfe der Optimierung Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Schalldrücken infolge von Schallanregung im Fahrzeuginnenraum im Frequenzbereich minimiert.

Die lokale Absorption wird dabei in MD.Nastran mit Hilfe spezieller akustischer Absorber-Elemente (CAABSF) modelliert. Hier können beliebige frequenzabhängige und komplexwertige akustische Impedanzen auf der zugehörigen Property-Karte (PAABSF) definiert werden. Für praktische Anwendungen werden a priori Schätzungen der frequenzabhängigen Impedanzcharakteristik, die beispielsweise aus bereits bekannten Kurven ähnlicher Trim-Komponenten gewonnen werden, als Startwerte verwendet und in der Folge lediglich Skalierungsfaktoren identifiziert. Dies bietet den Vorteil, dass die Anzahl der zu identifizierenden Parameter erheblich reduziert werden kann, was wiederum die numerische Stabilität und Eindeutigkeit der Ergebnisse verbessert.

Da MD.Nastran aktuell keine direkte Optimierung akustischer Absorber-Elemente unter Solution 200 (Optimierung) erlaubt, wurde ein spezielles Matlab-Programm entwickelt. Dieses basiert auf einem differenziellen Sensitivitätsansatz und erlaubt eine Optimierung der Absorber-Parameter außerhalb von MD.Nastran.

### **3.2. Identifikation mit Microflown-Apparatur**

Eine experimentelle Methode zur direkten Messung lokaler akustischer Impedanzen – und damit der Absorption – im Einbauzustand (In Situ) ist die so genannte „PU Freifeld-Methode“.

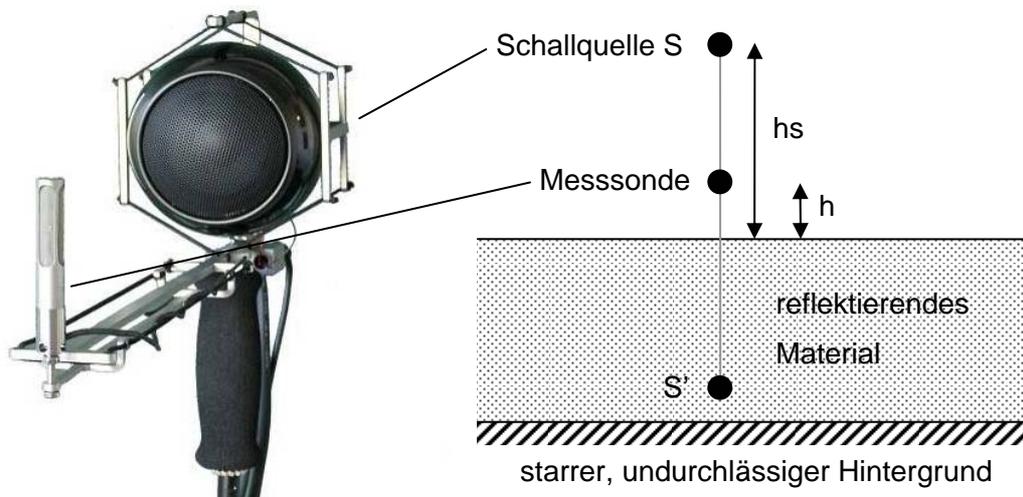


Bild 1: Links: Typischer Messaufbau. Rechts: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

Die Methode nutzt insbesondere ein Mikrofon zur Schallmessung in Kombination mit einem speziellen Sensor zur Messung der Partikelgeschwindigkeit (Messsonde Bild 1) und wird z. B. in [7-10] detailliert beschrieben. In einem gewissen Abstand  $h_s$  zur Messsonde wird eine Schallquelle S (Lautsprecher) platziert, und es werden simultan an der selben Stelle Schalldruck und Partikelgeschwindigkeit nahe der Oberfläche des Materials (Abstand  $h$ ) gemessen. Die Impedanz  $Z$  kann sofort aus den beiden gemessenen Signalen gemäß Gleichung (1) ermittelt werden. Um den Reflexionskoeffizienten  $R$  der ebenen Welle zu erhalten, wird der Einfluss der kugelförmigen Wellenausbreitung nach Gleichung (2) entsprechend korrigiert (siehe auch [7-9]). Danach kann der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  mit Hilfe von Gleichung (3) abgeleitet werden.

$$Z = \frac{P}{\dot{u}} \quad (1)$$

$$R = \frac{Z - 1}{Z \left( \frac{h_s - h}{h_s + h} \right) \left( \frac{ik(h_s + h) + 1}{ik(h_s - h) + 1} \right) + 1} \frac{h_s + h}{h_s - h} e^{ik2h} \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3)$$

Die Messungen selber können von zusätzlichen Schallquellen gestört werden, die durch stark reflektierende Komponenten im Innenraum verursacht werden. Im Frequenzbereich führt dies zu zahlreichen Resonanzen, wobei die „wahre“ Impedanz an verschiedenen Frequenzen jeweils über- oder unterschätzt wird. Durch Berechnung eines gleitenden

Durchschnittswertes (Moving Average) kann die wahre Impedanz schließlich ermittelt werden (siehe auch Bild 2).

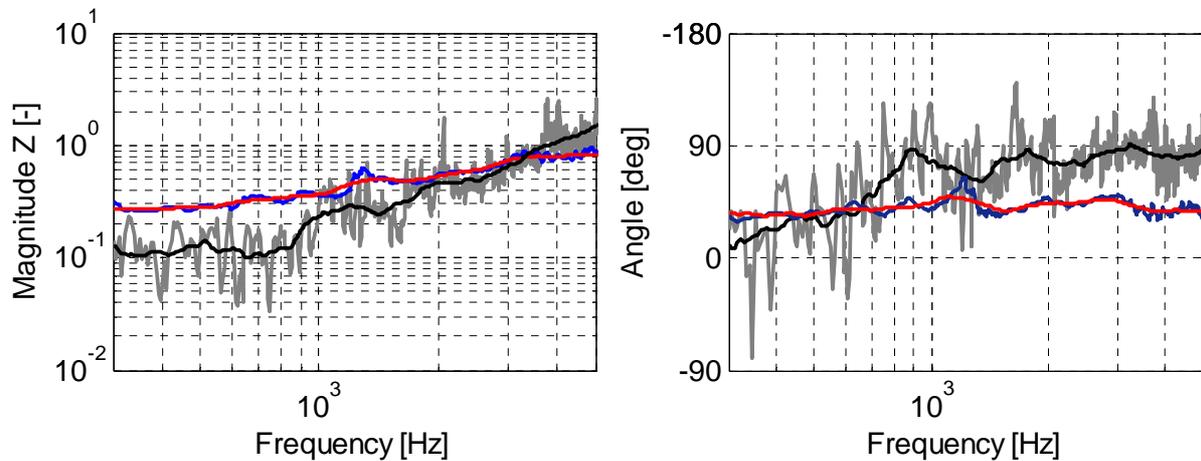


Bild 2: Impedanzmessungen an Dachhimmel (grau) and Sitz (blau) mit zugehörigen Moving Average Schätzungen (schwarz und rot). Links: Amplitude, rechts: Phase.

Viele Komponenten besitzen keine homogene Oberflächenimpedanz. Die effektiv wirkende Absorption ist daher nicht das Ergebnis der Impedanz an einer bestimmten Stelle, sondern vielmehr das Ergebnis der Interaktion einer größeren Fläche. In [10] wird daher vorgeschlagen, eine über viele Punkte gemittelte Impedanz zur Berechnung der mittleren Absorption heranzuziehen.

#### 4. Anwendung

Zur Erprobung der Methoden wird aktuell eine Rohkarosserie mit Anbauteilen im Rahmen des Arbeitskreises 6.1.19 „Strukturoptimierung Akustik“ der deutschen Automobilindustrie in verschiedenen Ausbaustufen untersucht. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse für die Trim-Komponente „Teppich mit Dämmmatten“ gezeigt.

##### 4.1. Messungen

In Bild 3 wird links ein typischer Messaufbau zur Messung von Schalldrücken im Innenraum der Karosserie gezeigt, wobei die Mikrofonmessungen auf Basis eines gleichförmigen 3D Netzes durchgeführt werden (Bild 3 rechts). Die hier ermittelten Schalldrücke dienen in erster Linie dem Vergleich zwischen Versuch und Analyse. Zusätzlich können die Daten jedoch auch zur Identifikation von Absorptionswerten mittels der Optimierung verwendet werden.

Die Schallanregung erfolgt an zwei verschiedenen Stellen im Innenraum: erstes im Bereich des Fahrerohrs und zweitens im Bereich des Beifahrerohrs hinten rechts. Die Mikrofone werden mit Hilfe einer speziellen Aufhängevorrichtung im Fahrzeug platziert, die die Innenraumakustik sowie die relevanten Oberflächenschwingungen nur minimal stört.

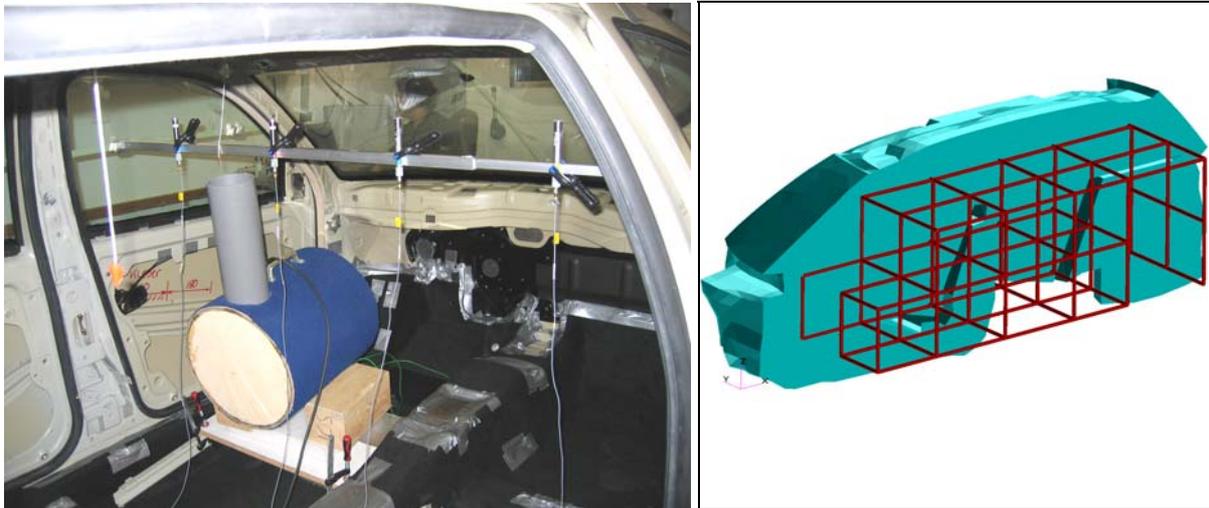


Bild 3: Schallmessung bei Schallanregung (Schallquelle blau im Bild)

Links: Typischer Messaufbau mit Ausstattung Teppich, rechts: Mikrofonpositionen.

Darüber hinaus wurden Impedanzmessungen zur Bestimmung der Absorptionskoeffizienten im Innenraum mittels der oben beschriebenen PU Freifeld-Methode durchgeführt. Bild 4 zeigt einen typischen Messaufbau. Alternativ zur gezeigten Variante der Stativaufstellung der Apparatur kann auch eine handgehaltene Variante eingesetzt werden.

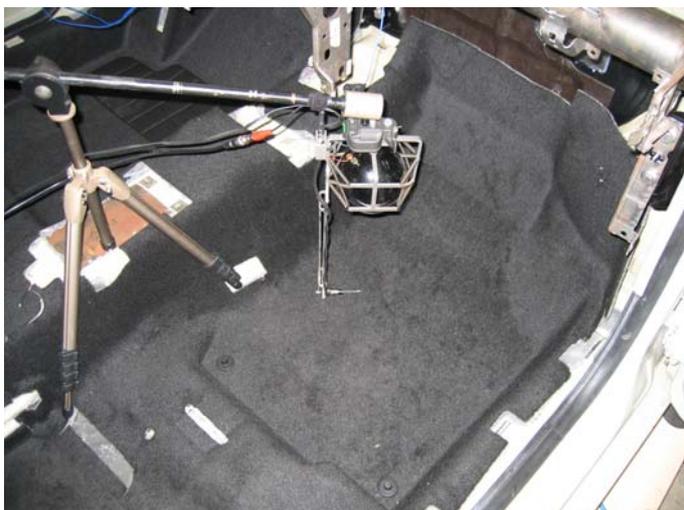


Bild 4: Impedanzmessung mittels PU Freifeld-Methode

## 4.2. Identifikation der Absorption

Die Identifikation der Absorption wird im Folgenden anhand der klassischen Impedanzrohrmessung sowie anhand der PU Freifeld-Methode gezeigt. Die Identifikation mittels der Optimierung wird aus Platzgründen nicht mehr explizit vorgestellt. Hierzu wird an dieser Stelle auf das Beispiel in [11] verwiesen.

Bild 5 links zeigt typische Proben des untersuchten Teppichs für die Impedanzrohrmessung. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Bild 5 rechts gezeigt. Die deutlichen Unterschiede bei den einzelnen Proben lassen bereits erahnen, dass sich im realen Fahrzeug – je nach Belegungsstatus – zum Teil deutliche Unterschiede der lokalen Absorption einstellen werden.

Bild 6 zeigt einen direkten Vergleich zwischen Impedanzrohrmessung und der PU Freifeld-Methode für den Teppich mit Dämmmatte vorne. Obwohl die prinzipielle Charakteristik ähnlich ist, sind lokal erhebliche Unterschiede zu erkennen. Insbesondere zeigen sich bei der PU Freifeld-Methode mehrere Absorptionsüberhöhungen insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz, die bei der Impedanzrohrmessung nicht auftreten. Gründe hierfür können zum einen das geänderte Verhalten und/oder die bessere Erfassung des Verhaltens im Einbauzustand sein (z. B. bessere Erfassung der Membranabsorber-eigenschaften des Mehrschichtaufbaus). Zum anderen ist denkbar, dass die Einflüsse von Blechschwingungen unterhalb der Ausstattung mit gemessen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine große Streubreite der Eingangsdaten für die FE-Analyse erkennbar ist.

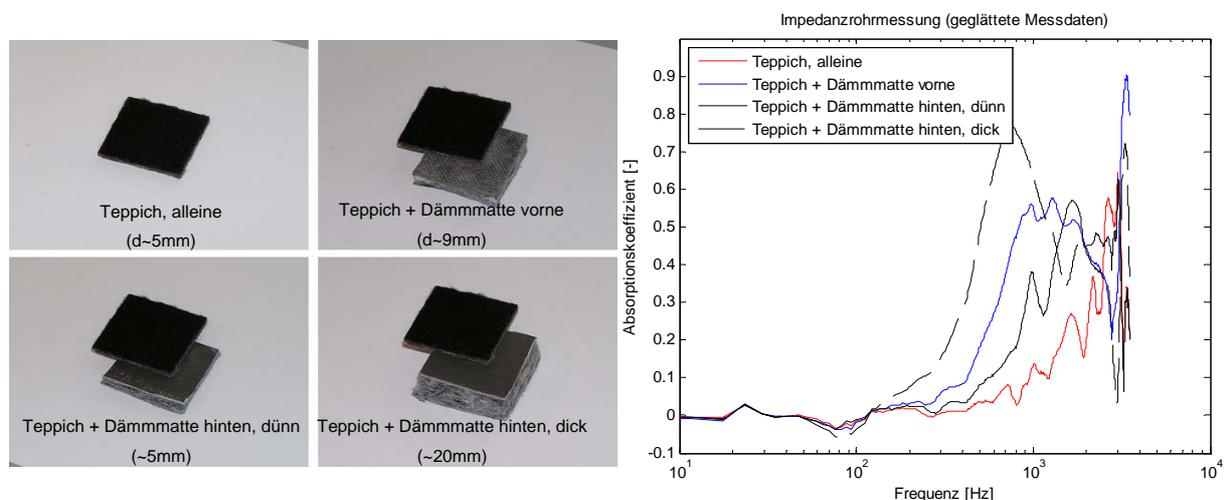


Bild 5: Links: Teppichproben, rechts: Ergebnisse der Impedanzrohrmessung.

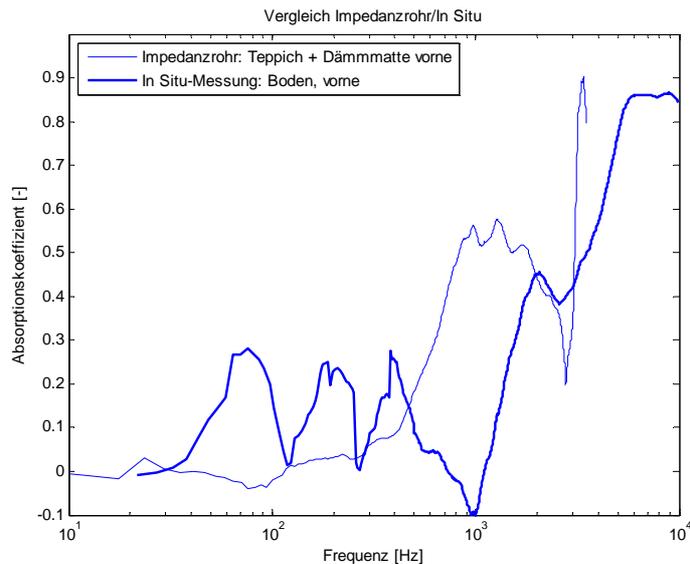


Bild 6: Vergleich Impedanzrohr und PU Freifeld-Methode für Teppich mit Dämmmatte vorne

#### 4.3. Vergleich Versuch/Analyse

Bild 7 zeigt Vergleiche der Einhüllende der gemessenen beziehungsweise berechneten Schalldrücke bei Schallanregung. Insgesamt kann bereits eine recht gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Analyse erreicht werden. Die Streuung der Analyseergebnisse selbst ist eher gering (für Schalldruckeinhüllende < 3 dB bis 400 Hz) trotz teilweise großer Unterschiede in den Eingangsdaten. Insgesamt liefert die Absorption aus der PU Freifeld-Methode die besten Ergebnisse, was vermutlich auf die bessere Erfassung der tatsächlichen Einbausituation zurückzuführen ist.

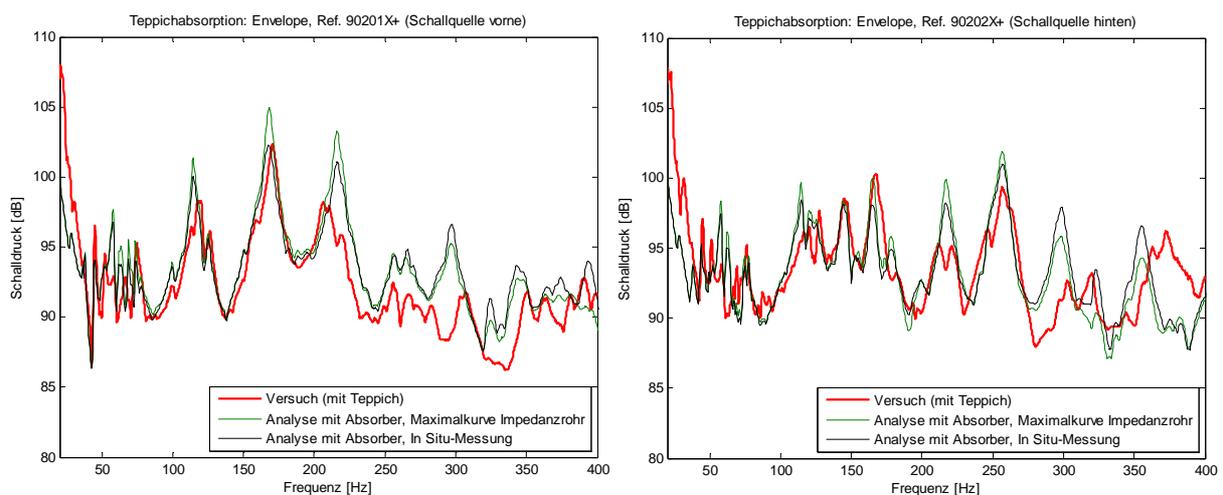


Bild 7: Vergleich Versuch/Analyse (Einhüllende der gemessenen/berechnete Schalldrücke)  
Links: Schallanregung Fahrerohr, Rechts Schallanregung Beifahrerohr hinten rechts.

#### 4.4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurden zwei Strategien zur lokalen und individuellen Erfassung der Absorption von Trim-Komponenten vorgestellt, die auf einer Erfassung der Absorption im FE-Modell als Impedanzrandbedingung beruhen. Beide Strategien zeichnen sich durch eine relativ leichte und universelle Handhabbarkeit aus und können im industriellen Umfeld mit FE-Modellen entsprechender Größenordnung ohne Schwierigkeiten eingesetzt werden.

Speziell die PU Freifeld-Methode ermöglicht eine schnelle, zerstörungsfreie Ermittlung der akustischen Impedanz direkt am Bauteil. Es sind jedoch noch zusätzliche Untersuchungen erforderlich, um die ermittelten Werte besser verstehen zu können: so sind z. B. die genauen Einflüsse der (elastischen) Unterlage sowie der akustischen Hohlraumresonanzen noch unklar. Auch ist der Einfluss von Messungenauigkeiten, insbesondere im tieffrequenten Bereich unterhalb von 800 Hz, noch weitergehend zu untersuchen.

#### 5. Literatur

- [1] A. Craggs: *A finite element method for rigid porous absorbing material*, Journal of Sound and Vibration, 61:101–111, 1978
- [2] M. E. Delany, E. N. Bazley: *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, Applied Acoustics, 3, 1970
- [3] M. A. Biot: *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range*, Journal of the Acoustical Society of America, 28(2):168–178, 1956
- [4] A. Duval et al.: *Trim FEM simulation of a dash and floor insulator cut out modules with structureborne and airborne excitations*, Acoustics Paris, 2008
- [5] C. Zwikker, C. W. Kosten: *Sound absorbing materials*, Elsevier, Amsterdam, 1949
- [6] F. Wagner et al.: *Computerunterstützte Dämpfungsidentifikation einer Rohkarosserie mit Anbauteilen auf Basis gemessener Frequenzgänge*, VDI-Berichte Nr. 2003, 2007
- [7] R. Lanoye et al.: *A practical device to determine the reflection coefficient of acoustic materials in situ based on a Microflown and microphone sensor*, ISMA, 2004
- [8] R. Lanoye et al.: *Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor*, JASA, 2006
- [9] H. E. de Bree: *The Microflown E-Book*, <http://www.microflown.com>, 2010
- [10] E. Tijs et al.: *Non destructive and in situ acoustic testing of inhomogeneous materials*, ERF33, Kazan, Russia, 2007
- [11] C. Schedlinski et al.: *Computational Model Updating of Structural Damping and Acoustic Absorption for Coupled Fluid-Structure-Analyses of Passenger Cars*, ISMA 2008