

# Hybride Methode zur Vorhersage des Schallübertragungsverlusts für Fahrzeugdämmung unter Berücksichtigung von Komponentenmessdaten in Finiten Elementen Modellen

Markus Brandstetter<sup>1</sup>, Romain Baudson<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Free Field Technologies part of Hexagon, 1435 Mont-Saint Guibert, E-Mail: markus.brandstetter@hexagon.com

## Einleitung

Die Beurteilung des Schallübertragungsverlusts (TL) von mehrschichtigen Materialien ist seit vielen Jahren ein aktives Forschungsthema in der Automobilindustrie. In jüngster Zeit ist aufgrund der Elektrifizierung der Fahrzeugflotten die Isolierung des Fahrzeuginnenraums von vorrangigem Interesse. Der Elektromotor besitzt ein spezielles Geräuschspektrum, welches niedrige, mittlere bis hohe Frequenzen beinhaltet, siehe Abbildung 1.

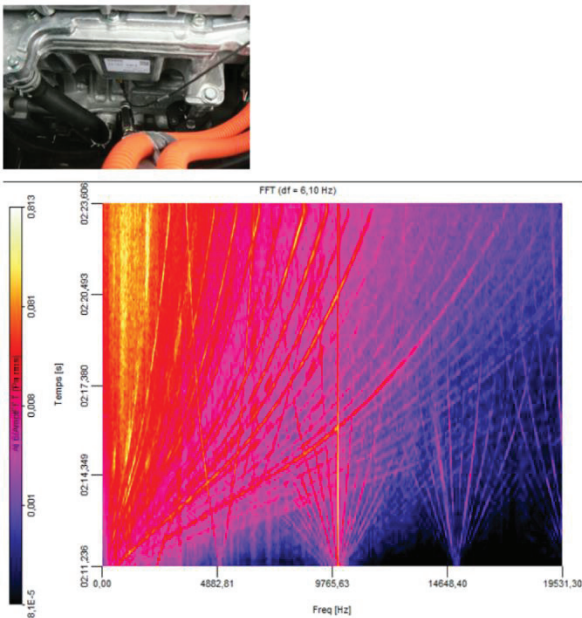


Abbildung 1: Gemessene Schalldruckpegel im Motorraum eines Nissan Leaf [1]

Daher sind präzise Methoden, Messungen und Simulationen erforderlich [3,4,5,6,7], um den Schallübertragungsverlust vorherzusagen. Für den akustischen Komfort im Fahrzeug muss ein bestimmter Übertragungsverlust garantiert werden. In vielen numerischen Modellen wird ein ideales Szenario bewertet, das einen optimistischen Schallübertragungsverlust ergibt. Für eine gute Vorhersagbarkeit ist eine präzise Modellierung der Isolationsmaterialien und der Fahrzeugstruktur unabdingbar, für solche Modelle müssen für den Vergleich mit Messungen alle Leckagen und Stopfen akustisch isoliert werden.

Sollten Öffnungen und Stopfen für beispielsweise HVAC und Lenksäule während der Messung vorhanden sein, müssen diese in der Simulation ebenfalls berücksichtigt werden, um prädiktive Vorhersagen zu erzielen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese Komponenten in ein Simulationsmodell einzubeziehen. Die physikalische Modellierung von Stopfen ist zeitaufwändig und erfordert möglicherweise Materialmesstechniken und garantiert keine

Vorhersagbarkeit. Dieser Artikel stellt ein neues Verfahren vor, bei dem gemessene TL- Werte für Komponenten, beispielsweise Stopfen durch die Transferadmittanzmethode in ein Finite-Elemente-TL-Modell aufgenommen werden. Die Auswirkungen werden auf Finite-Elemente-Modelle in Industriegröße untersucht.

## Methode

Es gibt zwei mögliche Transferpfade für äußere Geräuschquellen, um in den Fahrzeuginnenraum zu gelangen. Einerseits kann die Übertragung über Körperschall oder über Luftschall erfolgen. Bei Luftschall, regt beispielsweise der Elektromotor die Umgebende Luft an, welche danach die Stirwandoberfläche in Vibration versetzt. Man spricht bei der Stirwand also von einer akustischen Barriere, siehe Abbildung 2. Ein Beurteilungskriterium von akustischen Barrieren ist der Schallübertragungsverlust.

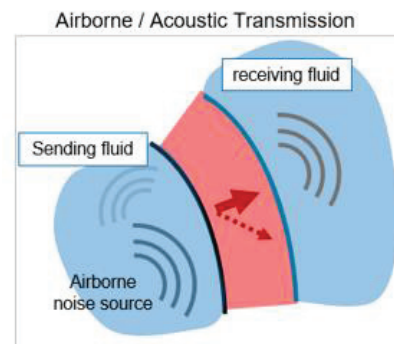


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer akustischen Barriere, die zwei Luftvolumina (sending fluid, receiving fluid) voneinander trennt

## Schallübertragungsverlust

Die akustische Transparenz wird üblicherweise mit dem Schallübertragungsverlust bewertet. In solchen Messungen wird das zu charakterisierende Objekt durchschallt. In den meisten Fällen liegt auf der Anregungsseite ein schallharter Raum auf der Emissionsseite ein schallarmer Raum vor. Die Schallleistung wird auf der Anregungsseite  $\bar{W}_{transmitted}$  und auf der Emissionsseite  $\bar{W}_{incident}$  gemessen. Der Schallübertragungsverlust (TL) ergibt sich dann aus

$$\tau = \frac{\bar{W}_{transmitted}}{\bar{W}_{incident}} \quad [-] \quad (1)$$

$$TL = 10 \cdot \log_{10}(1/\tau) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Mit  $TL$  dem Schallübertragungsverlust und  $\tau$  dem Leistungsverhältnis.

Eine der am meisten verbreitete Methode, um TL zu berechnen ist die Finite Elemente (FE) Methode. Im Vergleich zu statistischen Methoden wie Statistical Energy Analysis (SEA), haben FE eine höhere Präzision, um lokale Phänomene darzustellen. Generell ist FE eine robuste Methode mit weit verbreiteter Anwendung. Erfolgreiche Beispiele für TL der Fahrzeug Stirnwand mit Isolierung sind in [4,7] zu finden. Diese Simulationen berücksichtigen jedoch nicht den Einfluss von akustischen Schwächungen in der Isolierung, wie Leckage oder andere akustisch durchlässige Komponenten. In der Tat werden üblicherweise für Vergleiche Simulation / Messung, diese Bereiche akustisch isoliert [7]. Mit dem Bedarf höhere Frequenzen zu berechnen, steigt auch der Einfluss von solchen akustischen Schwächungen auf den TL.

### Modell

Ein einfaches FE Modell einer Stirnwand wird für die ersten Analysen verwendet. Das Modell besteht aus

- einem Metallblech (structure, 1.5 mm dick)
- einer Schauschicht (foam, 20 mm dick) modelliert mit der Biot Theorie [9] und
- einer Schwerschicht (septum, 3mm dick).

Der schallharte Raum und die Anregung sind mit einem diffusen Schallfeld modelliert. Der schallarme Raum und die abgestrahlte Schalleistung werden mit Finiten Elementen modelliert. Alle Modelle werden mit der kommerziellen Software Actran simuliert [10].

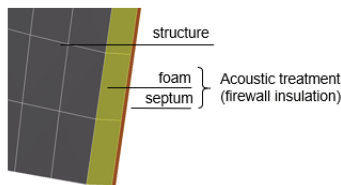


Abbildung 3: Einfaches Stirnwand Modell

### Einfluss von Leckage

Leckage in FE Modellen wird mit finiten Luftpunkten dargestellt. In dem Beispielmmodell werden unterschiedliche Leckagegrößen beurteilt. Das Modell ist in Abbildung 4 dargestellt. Um Leckage berechnen zu können, wird auch das Fluid auf der Anregungsseite modelliert. Das diffuse Schallfeld wird auf dem Fluid aufgegeben.

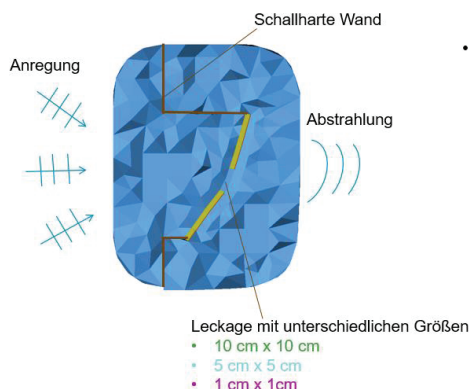


Abbildung 4: Modell zur Bewertung von Leckage

In Abbildung 5 wird der Effekt von unterschiedlichen Leckagegrößen dargestellt. Die Oberfläche der Stirnwand beträgt ca. 1 m². Ab einer Lochgröße von 5 cm x 5 cm wird der Einfluss der Stirnwandisolierung komplett aufgehoben, das Loch bestimmt nun den TL komplett. Bei einer Lochgröße von 1 cm x 1 cm, folgt die Übertragungsverlustkurve bis 600 Hz jener ohne Leckage, ab 600 Hz sinkt jedoch der Übertragungsverlust ab. Die Öffnung schwächt die effizient der Stirnwandisolierung. Mit steigender Frequenz wird der Effekt größer. Vergleichbare Ergebnisse können in [6] gefunden werden.

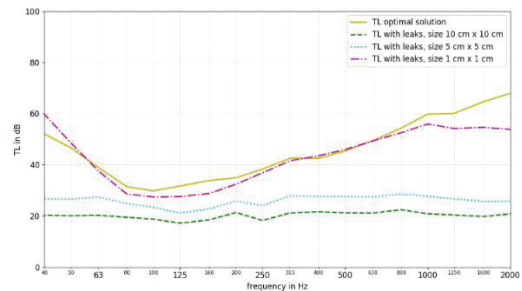


Abbildung 5: Schallübertragungsverlust - Einfluss von Leckage unterschiedlicher Größe

### Berücksichtigung Schallübertragungsverlust von Komponenten

Möchte man den Einfluss von Dichtungen und anderen Komponenten der Stirnwand berücksichtigen, die die Blechöffnungen verschließen (Abbildung 6), dann gibt es mehrere Optionen. Einerseits können diese Komponenten mit Finiten Elementen modelliert werden, andererseits, können diese, wie in diesem Artikel in Form von Komponenten TL Kurven in das FE Modell eingebaut werden. Der Vorteil dieser hybriden Modelle, ist, dass einzelne Komponenten lokal an der richtigen Position berücksichtigt werden können, wodurch ein präzises Ergebnis lokal erzielt werden kann.

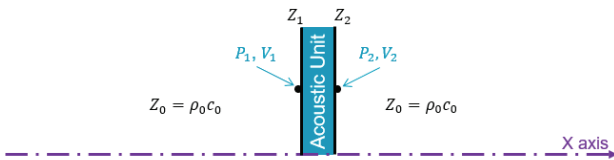


Abbildung 6: Beispiel einer Stirnwand [7]

Um dies realisieren zu können, wird die Admittanzmatrixmethode verwendet welche in der Simulationssoftware Actran verfügbar ist. Sie verwendet die Admittanzmatrix,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

mit der Schallschnelle und dem Schalldruck,  $V_1$  und  $P_1$  linksseitig und  $V_2$  und  $P_2$  rechtsseitig der akustischen Einheit (Abbildung 7), sowie der akustischen Impedanz  $Z_0 = \rho_0 c_0$  und  $A_{ij}$  den Einträgen der Admittanzmatrix.

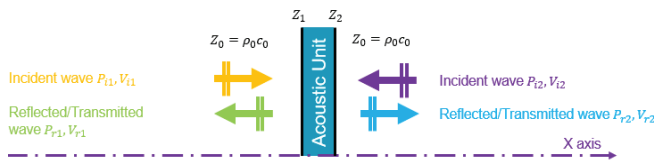


**Abbildung 7:** Darstellung des Schalldrucks und der Schallschnelle links- und rechtsseitig der akustischen Einheit (z.B.: Barriere)

Die Admittanzmatrix wird nun durch die Streumatrix ausgedrückt

$$\begin{bmatrix} P_{r1} \\ P_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \end{bmatrix}, \quad [\text{N/m}^2] \quad (4)$$

mit  $D_{ij}$  den Einträgen der Streumatrix,  $P_{rn}$  der Druck von eintreffenden Schallwellen,  $P_{in}$  der Schalldruck von reflektierten Schallwellen, links ( $n = 1$ ) und rechts ( $n = 2$ ) der akustischen Einheit (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Visualisierung der Variablen benutzt in der Streumatrix (4)

Die Admittanzmatrix kann nun durch die Streumatrix dargestellt werden (5-8). Die Einträge der Streumatrix ergeben sich mit

$$A_{11} = \frac{1}{Z_0} \left[ \frac{D_{12}D_{21} + (1+D_{22})(1-D_{11})}{(1+D_{22})(1+D_{11}) - D_{12}D_{21}} \right], \quad [\text{m}^2/\text{kg}] \quad (5)$$

$$A_{12} = \frac{-1}{Z_0} \left[ \frac{2D_{12}}{(1+D_{22})(1+D_{11}) - D_{12}D_{21}} \right], \quad [\text{m}^2/\text{kg}] \quad (6)$$

$$A_{21} = \frac{-1}{Z_0} \left[ \frac{2D_{21}}{(1+D_{22})(1+D_{11}) - D_{12}D_{21}} \right], \quad [\text{m}^2/\text{kg}] \quad (7)$$

$$A_{22} = \frac{1}{Z_0} \left[ \frac{D_{12}D_{21} + (1-D_{22})(1+D_{11})}{(1+D_{22})(1+D_{11}) - D_{12}D_{21}} \right]. \quad [\text{m}^2/\text{kg}] \quad (8)$$

Aus (1) folgt

$$TL \approx 20 \log \frac{P_{i1}}{P_{r2}}, \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

und daher

$$D_{21} = \frac{1}{10^{20} TL}. \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

Die folgenden Annahmen müssen berücksichtigt werden. Die Herleitung berücksichtigt nur normal auftreffende Schallwellen, die Randbedingungen der akustischen Einheit müssen bereits in der Matrix berücksichtigt werden. Die Phase kann nicht berücksichtigt werden, da diese in dem TL nicht vorhanden ist.

Um alle Einträge der Streumatrix befüllen zu können wird

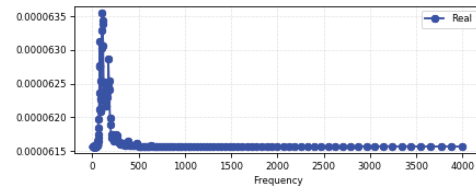
$$D_{21} = D_{12}, \quad [-] \quad (11)$$

$$D_{11} = D_{22} = 0.95, \quad [-] \quad (12)$$

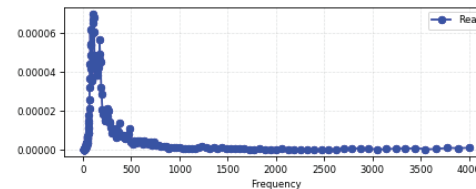
angenommen, also eine Absorption von 5% in den Diagonaleinträgen der Streumatrix. Für  $D_{11}$  und  $D_{22}$  können ebenfalls andere Werte verwendet werden, der Einfluss von  $D_{11}$  und  $D_{22}$  auf den TL ist jedoch sehr gering.  $D_{12}$  könnte ebenfalls numerisch bestimmt werden.

## Ergebnisse

Zwei Beispiele sollen präsentiert werden. Im ersten Modell (Abbildung 3) wird das gesamte Stirnwandmodell mit der Admittanzmatrix ersetzt (Blech und Isolierung). Man bekommt für  $A_{11} = A_{22}$  die frequenzabhängigen Größen siehe Abbildung 9 und für  $A_{12} = A_{21}$  die Werte in Abbildung 10.

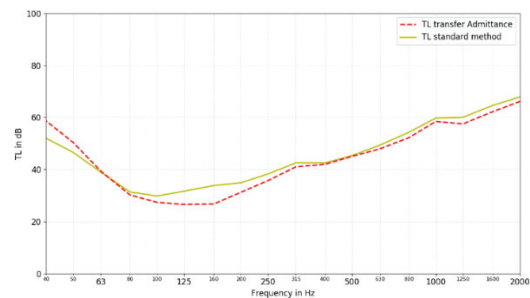


**Abbildung 9:** Werte für  $A_{11} = A_{22}$



**Abbildung 10:** Werte für  $A_{12} = A_{21}$

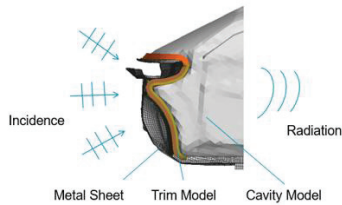
Abbildung 11 zeigt den Vergleich der beiden Modelle – ein Modell mit der Admittanzmatrix und ein Modell mit dem kompletten FE Modell. Beide Kurven haben eine gute Übereinstimmung. Man kann davon ausgehen, dass die Admittanzmethode prädiktive Ergebnisse liefert.



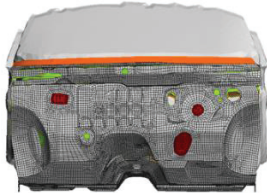
**Abbildung 11:** zeigt den Vergleich des TL der FE Methode in Gelb, und das Ergebnis des Admittanzmodells, welches den gleichen TL verwendet, in Rot

## Industrielles Modell

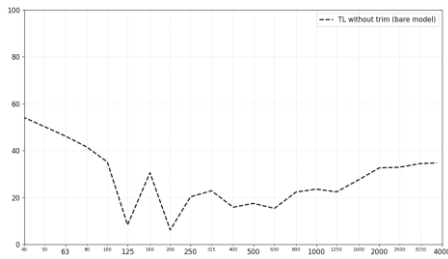
Ein industrielles TL Modell wird in diesem Abschnitt untersucht. Es verwendet an den roten Flächen den TL aus Abbildung 14. Das Modell ist in Abbildung 12 und Abbildung 13 zu sehen.



**Abbildung 12:** Beispiel eines industriellen TL Modells, es besteht aus dem diffusen Schallfeld (Incidence), dem Stirnwandblech (Metal Sheet), porösen Materialien und einem Teil des Fahrzeuginnenraumes, mit einer nicht reflektierender Randbedingung

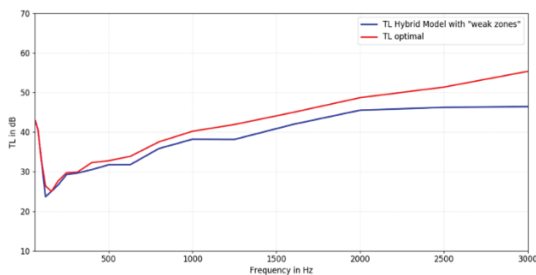


**Abbildung 13** zeigt das gleiche Modell wie in Abbildung 12, an den roten Flächen wird der TL des Stirnwandblechs ohne Isolation in Form von Admittanzmatrix verwendet



**Abbildung 14:** Metallblech TL der Stirnwand

In Abbildung 15 wird ein Vergleich des TL gezeigt, mit und ohne Berücksichtigung akustischer Schwächungen. Man sieht, dass der Einfluss von Bereichen mit schlechter akustischer Isolierung mit steigender Frequenz zunimmt. Des Weiteren demonstriert dieses hybride Modell die Anwendungsmöglichkeiten für industrielle Modelle.



**Abbildung 15:** Vergleich von TL-Kurven mit und ohne akustisch schwache Zonen eines industriellen Modells

## Zusammenfassung

Dieser Artikel präsentiert eine neue Modellierungsmethode, um akustisch schwache Zonen in Schallübertragungsverlust-FE Modellen zu verwenden. Es wurde gezeigt, wie Leakage modelliert werden kann. Des Weiteren wird gezeigt, wie Schallübertragungskurven in bereits bestehende FE Modellen integriert werden können. Diese neue Methode ist in der Lage prädiktive TL Kurven abzubilden und sie macht es möglich

gemessenen TL Kurven in industriellen Modellen wieder zu verwenden.

Einige Vorteile dieser neuen hybriden Methode sind:

- Die zusätzlichen Komponenten müssen nicht aufwendig mit FE modelliert werden.
- Mit diesen hybriden FE Modellen können lokale Indikatoren wie Schalldruckpegel oder Fluidintensitäten bestimmt werden.
- Diese Methode ermöglicht es präzise, lokale Verbesserungen an dem Fahrzeug und der Fahrzeugisolierung durchzuführen.

## Literatur

- [1] Eomys Engineering (ed.): Audio files of electro-magnetically-excited noise. WAV-Format, online: <https://eomys.com/e-nvh/audio-files-of-electromagnetically-excited-noise/>, access: March 23, 2020
- [2] Devillers E, Gning P, Degrendele K, Le Besnerais J. Sound Quality Aspects of Electric Vehicles. ATZ worldwide. 2020 Jul;122(7):26-31.
- [3] Shivle, Smita, and A. V. Murthy. Improvement in Noise Transmission Across Firewall of a Passenger Car. No. 2010-01-0751. SAE Technical Paper, 2010.
- [4] FFT Acoustic Simulation Conference 2018, Enabling innovative concepts for complete front vehicle unit through numerical assessment of acoustic insulation, Ludovic Dejaeger, Minh-Tan Hoang
- [5] Zhang, Jun, Guanni Zhu, Xiaoxuan Zhang, Hongyu Liu, and Congguang Liu. "The vehicle NVH development and engineering application of the lightweight sound package." In Proceedings of SAE-China Congress 2014: Selected Papers, pp. 291-300. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [6] Moritz, Charles, Jennifer Shaw, Armando Carrera, Keyu Chen, and David Herrin. "Measurement and prediction of the sound transmission loss for various sample positions." In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, vol. 250, no. 7, pp. 29-40. Institute of Noise Control Engineering, 2015.
- [7] F. Bissardella et al., Modular NVH – from complete vehicle NVH demands to detailed part design, FFT Acoustic Simulation Conference 2016
- [8] AAC 2015, Development of acoustic STL simulation methodology for automotive door seals: Correlation between simulation and Testing results, I. Iovtchev, J. Jacqmot
- [9] Biot, M.A., "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.
- [10] Free Field Technologies, "Actran 2021 User's Guide Vol. 1: Installation, Operations, Theory and Utilities."