

Simulation der inneren Struktur von Lärmschutzwänden mit der Finite Elemente Methode

Paul Reiter^{1,2}, Reinhard Wehr¹, Harald Ziegelwanger¹

¹ AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Mobility Department, Transportation Infrastructure Technologies, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria, Email: paul.reiter.fl@ait.ac.at

² Technische Universität Wien, Institut für Angewandte Physik, Wiedner Hauptstr. 8-10/134, 1040 Wien, Austria

Einleitung

Lärmschutzwände sind eine weit verbreitete technische Maßnahme zur Lärmreduktion des Straßen und Schienenverkehrs (Möser, 2012). Die simulationsgestützte Vorhersage intrinsischer akustischer Eigenschaften (in Anlehnung an die in-situ Methoden zur Messung von Reflexionsindex, Schalldämmindex und Schallbeugungsindex) ermöglicht eine kostengünstige Produktoptimierung im Entwicklungsprozess von Lärmschutzwandelementen.

Eine Möglichkeit den Beugungsindex mittels Computersimulation zu bestimmen bietet die Randintegralmethode. Um jedoch den Reflexionsindex und den Schalldämmindex bestimmen zu können, muss die innere Struktur einer Lärmschutzwand berücksichtigt werden, wozu die Finite Elemente Methode (FEM, Marburg and Nolte, 2008) sehr gut geeignet ist. Um zusätzlich die Anforderungen der Prüfnormen EN 1793-5 (in-situ Reflexion) und EN 1793-6 (in-situ Schalldämmung) auch in den FEM-Berechnungen zu berücksichtigen, müssen diese bis zur Obergrenze des 5000 Hz Terzbands durchgeführt werden. In Kombination mit der umfassenden Abbildung des Messaufbaus in der Simulation ergibt sich ein hoher Rechenaufwand. Der Rechenaufwand kann durch Ausnutzung der periodischen Struktur eines Lärmschutzwandelementes in einer Einheitszelle mit periodischen Randbedingungen reduziert werden. Das reduzierte FEM-Modell erlaubt die Simulation von feinen Strukturen und verschiedenen Materialien im Lärmschutzwandelement (z.B. Lochbleche und poröse Absorber).

In dieser Arbeit wird die zur Bestimmung des Reflexionsindex notwendige FEM Formulierung und deren Anwendung auf einen einfachen Testfall gezeigt. Die Ergebnisse werden mit einer Messung verglichen um die die FEM Formulierung vorläufig zu evaluieren.

Messung des Reflexionsindex

Die Messung des Reflexionsindex wurde in Anlehnung an die EN 1793-5 durchgeführt (Wehr et al., 2013).

Für die Messung wurde ein Lautsprecher in 1,5 m Entfernung vor dem Zentrum einer Lärmschutzwand aufgebaut. Anders als in der CEN/TS 1793-5 vorgesehen, wurde für eine bessere Vergleichbarkeit mit der FEM-Berechnung nur die zentrale Mikrofonposition auf der Verbindungslinie

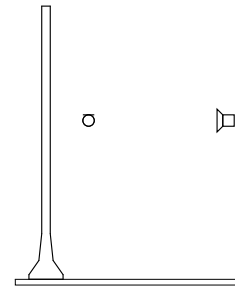


Abbildung 1: Aufbau der RI-Messmethode in Anlehnung an CEN/TS 1793-5

nie zwischen Lautsprecher und Lärmschutzwand verwendet. Das Mikrofon wurde in 0,25 m Entfernung vor der Lärmschutzwand positioniert (siehe Abbildung 1) und die Impulsantwort gemessen. Mittels Subtraktion wurde der von der Lärmschutzwand reflektierte Schallanteil (h_r) vom Direktschall (h_i) getrennt. Dafür wurde eine Impulsantwort mit der selben Mikrofon-Lautsprecher Anordnung im Freifeld ohne Lärmschutzwand gemessen. Durch energetischen Vergleich der reflektierten und der direkten Komponente wurde der Reflexionsindex (RI) bestimmt.

$$RI_j = \frac{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_r(t) \cdot w_r(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_i(t) \cdot w_i(t)]|^2 df} \quad (1)$$

Das Resultat ist ein Frequenzspektrum des RIs für die Terzbänder (Δf_j) des Verkehrslärmspektrums ab 200 Hz. Unterhalb 200 Hz ist aufgrund der Zeitfensterung (w_r, w_i) keine Aussage möglich.

FEM Modell

Der Ausgangspunkt für eine FEM Formulierung, welche auch poröse Absorber enthalten kann wie sie z.B. in Lärmschutzwänden vorkommen, ist eine modifizierte Form der Helmholtzgleichung:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_a^2 p = 0, \quad (2)$$

welche sich von der gewöhnlichen Helmholtzgleichung durch die Verwendung einer komplexen Wellenzahl:

$$k_a = kz = k \sqrt{\kappa - i \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho}} \quad (3)$$

unterscheidet. Die komplexe Wellenzahl k_a , welche eine Dämpfung bewirkt, setzt sich aus der reellen Wellenzahl k multipliziert mit einem komplexen Faktor z zusammen. In diesen komplexen Faktor gehen neben der Kreisfrequenz ω und der Dichte von Luft ρ die Parameter eines porösen Absorbers (Ξ der längenspezifische Strömungswiderstand, κ der Strukturfaktor, σ die Porosität) ein.

Zur Ableitung der FEM Formulierung aus der modifizierten Helmholtzgleichung wird diese mit einer Testfunktion w multipliziert und über das Simulationsvolumen integriert:

$$\int (\Delta p) w dV + k_a^2 \int p w dV = 0. \quad (4)$$

Durch partielle Integration kann die Ableitung des Schalldrucks auf die Testfunktion w verschoben werden, wodurch ein Oberflächenterm $\int d\vec{S}$ entsteht.

$$\int (\vec{\nabla} p) w d\vec{S} - \int (\vec{\nabla} p) (\vec{\nabla} w) dV + k_a^2 \int p w dV = 0 \quad (5)$$

Zur Implementierung in FEniCS¹ muss diese Formulierung in Real- und Imaginärteil getrennt werden. Hierfür werden Schalldruck p und der komplexe Faktor z in $p_r + ip_i$ und $z_r + iz_i$ aufgeteilt.

$$\int \vec{\nabla} (p_r + ip_i) w d\vec{S} - \int \vec{\nabla} (p_r + ip_i) (\vec{\nabla} w) dV + k^2 (z_r + iz_i) \int (p_r + ip_i) w dV = 0 \quad (6)$$

Dadurch erhält man aus der komplexwertigen Integralgleichung zwei gekoppelte reellwertige Gleichungen:

$$k^2 \int (z_r p_r - z_i p_i) w_1 dV - \int (\vec{\nabla} p_r) (\vec{\nabla} w_1) dV - \int (\vec{\nabla} p_r) w_1 d\vec{S} = \quad (7)$$

$$k^2 \int (z_i p_r + z_r p_i) w_2 dV - \int (\vec{\nabla} p_i) (\vec{\nabla} w_2) dV - \int (\vec{\nabla} p_i) w_2 d\vec{S}. \quad (8)$$

Resultate

Als Testbedingung wurde das Absorbermaterial einer Lärmschutzwand vor einer voll reflektierenden Wand positioniert. Der Reflexionsindex wurde messtechnisch und mit dem FEM Modell bestimmt.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Ergebnisse. Die Berechnung über das FEM Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Messung.

Ausblick

Das FEM Modell kann in weiterer Folge auf komplexere Geometrien und Materialien ausgeweitet werden womit der Reflexionsindex einer kompletten Lärmschutzwand bestimmt werden kann.

¹Open-source FEM Software, verfügbar unter <http://fenicsproject.org/> (zuletzt besucht: 15.03.2016)

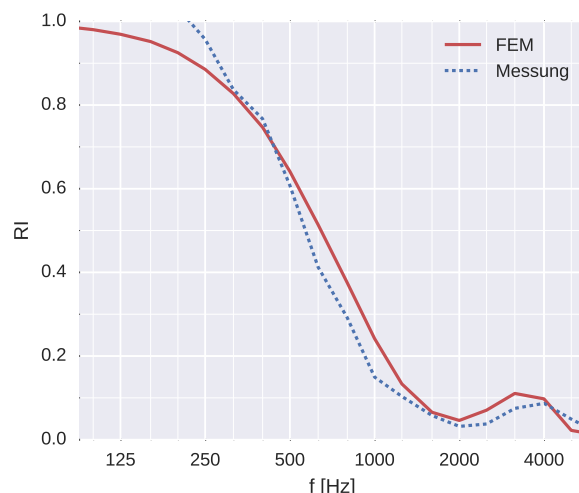


Abbildung 2: Terzbandwerte des Reflexionsindex von Absorberplatten auf reflektierender Oberfläche.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des FFG finanzierten Projekts IBIS durchgeführt. Die Autoren möchten sich bei der Firma Forster Metallbau GmbH, im Speziellen bei Robert Reichartzeder und Hannes Starkl, für die Zusammenarbeit im Bereich Konstruktion und Prototypenbau und für das zur Verfügungstellen des Absorbermaterials bedanken.

Literatur

- EN 1793-5, 2003. Road traffic noise reducing devices - test method for determining the acoustic performance - part 5: Intrinsic characteristics - In situ values of sound reflection under direct sound field conditions.
- EN 1793-6, 2013. Road traffic noise reducing devices - test method for determining the acoustic performance - part 6: Intrinsic characteristics - in situ values of airborne sound insulation under direct sound field conditions
- Marburg, S., Nolte, B. (Eds.), 2008. Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77448-8>
- Möser, M., Sep. 2012. Technische Akustik. Springer-Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30933-5>
- Wehr, R., Haider, M., Conter, M., Gasparoni, S., Breuss, S., 2013. Measuring the sound absorption properties of noise barriers with inverse filtered maximum length sequences. Applied Acoustics 74 (5), 631 – 639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.11.006>