

Schnittstelle für die Verwendung von FE-Daten zur Bestimmung von SEA-Parametern in OpenSourceSEA

C. Gabriel¹, S. Müller², J. Grabinger¹, S. Becker², R. Lerch¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland

Email: Christoph.Gabriel@lse.eei.uni-erlangen.de

² Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik

Einleitung

Das Programmpaket OpenSourceSEA [2] wurde als Open-Source-Projekt an der Universität Hamburg-Harburg entwickelt und stellt eine offen zugängliche Entwicklungsumgebung für die Implementierung von Problemstellungen aus der Akustik dar, welche mittels Statistischer Energieanalyse (SEA) gelöst werden können. Im Rahmen des Forschungsverbundes FORLärm wurde dieses Open-Source-Projekt nun dahingehend erweitert, dass mit dem am Lehrstuhl für Sensorik entwickelten FE-Code CFS++ (Coupled Field Simulation) [4] berechnete Ergebnisdaten einer Finite-Elemente(FE)-Simulation eingebunden werden können. Die Erweiterung soll die Basis für die Entwicklung einer neuen SEA-FE Kopplung für den Fahrzeugbau bilden, um den strömungsinduzierten Schall in der Fahrgastzelle eines PKWs, der über Seiten- und Frontscheibe eindringt, numerisch zu bestimmen.

Theoretischer Hintergrund

Im Gegensatz zur klassischen Vibrationsanalyse, die auf Größen wie Auslenkung und Kraft basiert, bedient sich das Verfahren der Statistischen Energieanalyse energetischer Größen wie Energie, Energiedichte und Leistung. Diese Methode eignet sich vor allem für Frequenzbereiche, in denen kleine Wellenlängen eine FE-Berechnung sehr aufwendig machen. Zur Modellierung unterteilt man

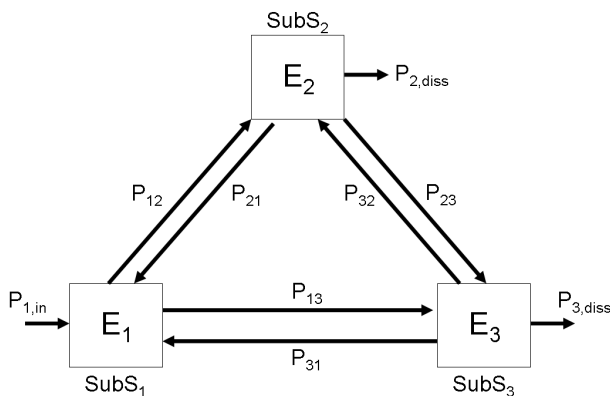


Abbildung 1: SEA-Modell für 3 Subsysteme

das zu untersuchende Gesamtsystem, wie in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt, in einzelne Subsysteme. SubS₁ und SubS₃ stellen hierbei akustische Kavitäten dar, SubS₂ eine die beiden trennende Plattenstruktur. Die

Leistungsübertragung zwischen zwei definierten Subsystemen i und j lässt sich wie folgt beschreiben [3]

$$P_{ij} = 2\pi f \eta_{ij} E_i, \quad (1)$$

wobei E_i die im Subsystem i gespeicherte Energie, P_{ij} den Leistungsfluss von Subsystem i zu Subsystem j und η_{ij} den Kopplungsverlustfaktor zwischen den Systemen beschreibt. Je nach angeschlossenen Subsystemen kann die Berechnung der Kopplungsverlustfaktoren sehr komplex werden. In dieser Arbeit soll daher das Augenmerk auf Flächenkopplungen gelegt werden. Für die Schallübertragung zwischen zwei durch eine Plattenstruktur verbundenen akustischen Subsystemen sind im SEA-Modell zwei Energietransmissionspfade maßgebend: Der resonante Energietransfer findet an den Kopplungsstellen zweier Subsysteme statt und berücksichtigt das resonante Verhalten der Kopplung. In Abbildung 1 ist der Leistungsfluss über diese Kopplung als P_{12} , P_{21} , P_{32} und P_{23} dargestellt. Zusätzlich wird der nicht-resonante Energietransfer, auch Massengesetz-Transmission genannt, betrachtet, der als indirekter Energieaustausch zwischen akustischen Subsystemen stattfindet. Der Kopplungsübertragungsfaktor für den nicht-resonanten Pfad lässt sich wie folgt beschreiben [3]

$$\eta_{ij} = \frac{c_0 S \tau_{ij}}{8\pi f V_i}. \quad (2)$$

Hierbei bezeichnet c_0 die Schallgeschwindigkeit, S die Kopplungsfläche, V_i das Volumen der akustischen Kavität i und τ_{ij} den Transmissionsgrad zwischen den Kavitäten. τ_{ij} ist im betrachteten Bereich vor allem von der flächenbezogenen Bauteilmasse abhängig. In Abbildung 1 beschreibt P_{13} und P_{31} den Leistungsfluss über die nicht-resonante Kopplung. Der Kopplungsverlustfaktor für den resonanten Pfad wird folgendermaßen dargestellt [3]

$$\eta_{ij} = \frac{\rho_0 c_0}{\omega m''} \sigma. \quad (3)$$

ρ_0 bezeichnet die Dichte des Fluids, m'' die flächenbezogene Masse und σ den Abstrahlgrad. Bei einfachen Systemen wie homogenen Plattenstrukturen sind analytische Lösungen für den Abstrahlgrad zu finden. Für komplexere Strukturen, wie beispielsweise versteifte Platten, lassen sich keine derartigen Methoden anwenden.

Für allgemeine Plattenstrukturen, die längs der Kanten frei aufliegend gelagert sind, berechnet sich der Abstrahlgrad für die jeweilige Modenzahl nach Wallace [3] wie folgt

$$\sigma_{m,n} = \frac{256f^2 S}{c_0^2 \pi^2 m^2 n^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{\xi_1 \xi_2}{A^2 B^2} \right]^2 \sin \theta d\theta d\zeta$$

mit $A = \left(\frac{\alpha}{m\pi} - 1\right)^2$, $\alpha = k_0 l_x \sin \theta \cos \zeta$ (4)
 $B = \left(\frac{\beta}{n\pi} - 1\right)^2$, $\beta = k_0 l_y \sin \theta \sin \zeta$

$m = 1, 3, 5, \dots$ gilt $\xi_1 = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ sonst $\xi_1 = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$
 $n = 1, 3, 5, \dots$ gilt $\xi_2 = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$ sonst $\xi_2 = \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$.

m und n bezeichnen jeweils die Modenordnung in x - und y -Richtung. Der Abstrahlgrad lässt sich somit unter Verwendung von Gl. 4 bestimmen, wenn die Moden bekannt sind. Im Folgenden soll beschrieben werden, wie aufbauend auf den Arbeiten in [2] der Abstrahlgrad auf Basis einer FE-Eigenfrequenzanalyse berechnet werden kann.

Durchführung

Die Eigenfrequenzanalyse wird mit dem FE-Programm CFS++ durchgeführt. Als Ergebnisse werden die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Auslenkungen jedes Knotens des Gitters im Format hdf5 [1] gespeichert. Für das Programmpaket OpenSourceSEA wurde ein Modul implementiert, welches es ermöglicht, die gespeicherten Ergebnisse der Eigenfrequenzanalyse einzulesen. Wie in [2] beschrieben, wird zunächst das Gitter der gegebenen Plattenstruktur auf ein internes zweidimensionales Gitter projiziert. Jede Schwingform wird nun mittels zweidimensionaler DFT in den Wellenzahlbereich transformiert. So können anhand der detektierten Maxima im Wellenzahlspektrum die dominierenden Wellenzahlen bestimmt werden. Daraus wird der Abstrahlgrad bei der jeweiligen Frequenz berechnet. Da in der Statistischen Energieanalyse zumeist Terzbänder Anwendung finden, werden im Anschluss die Abstrahlgrade innerhalb eines Frequenzbandes gemittelt, wobei sich für jedes Terzband ein entsprechender Abstrahlgrad ergibt.

Abbildung 2 zeigt vergleichend den berechneten Abstrahlgrad einer Plattenstruktur auf Basis analytischer Formeln und dem hier vorgestellten Verfahren.

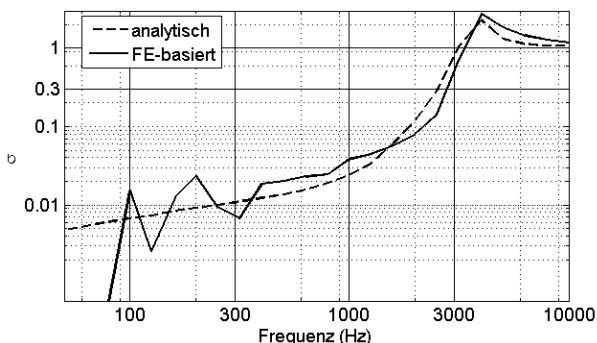


Abbildung 2: Vergleich der Berechnung des Abstrahlgrades einer Plattenstruktur: analytisch und basierend auf FE-Daten

Numerisches Beispiel

Zur Verifizierung des Verfahrens soll die Schallübertragung durch eine Aluminiumplatte der

Abmessungen $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 3,3 \text{ mm}$ untersucht werden. Dabei wird das konventionelle Verfahren auf Basis von analytischen Lösungen mit dem vorgestellten Verfahren verglichen. Die Platte ist frei aufliegend zwischen zwei quadratischen Hallräumen (SubS₁ und SubS₂) der Kantenlänge 2 m gelagert. Als Dämpfungsverlustfaktor wird für alle Subsysteme 1 % angenommen. Der Senderraum wird mit weißem Rauschen angeregt. Abbildung 3 zeigt die Übertragungsfunktion vom Sende- zum Empfangsraum für die analytische Berechnung und die auf FE-Daten basierende.

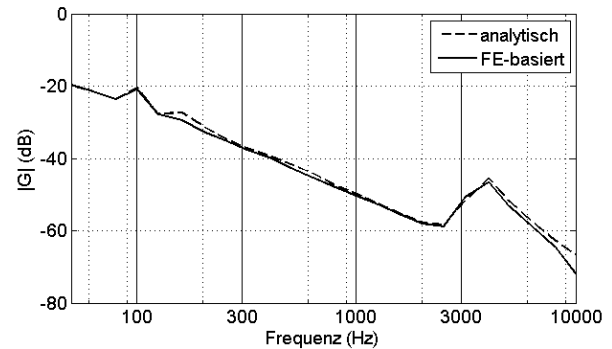


Abbildung 3: Vergleich der Übertragungsfunktion einer Plattenstruktur: analytisch und basierend auf FE-Daten

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein neues Modul für OpenSourceSEA vorgestellt, mit dem es möglich ist, die mit CFS++ erstellten Ergebnisdaten einer Eigenfrequenzanalyse zu importieren. Auf Basis dessen wurde der Übertragungsverlustfaktor η_{ij} zwischen akustischer Kavität und Plattenstruktur berechnet. Es wurde mit dieser Methode für ein einfaches Modell der Abstrahlgrad und die Übertragungsfunktion berechnet und anhand der analytischen Lösung verifiziert.

Danksagung

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsstiftung (BFS) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsverbundes „FORLärm“.

Literatur

- [1] <http://www.hdfgroup.org>.
- [2] S. Callsen. *Zum Einsatz der Statistischen Energieanalyse bei Schalldämmmaßberechnungen im Flugzeugbau*. Dissertation, Universität Hamburg-Harburg, 2009.
- [3] R. Craik. *Sound Transmission Through Buildings*. Hower Publishing Limited, 1996.
- [4] M. Kaltenbacher. Advanced simulation tool for the design of sensors and actuators. *Procedia Engineering*, 5:597–600, 2010.