

Parameterstudie zur Identifikation von Schallquellen an einem 2D-Akustikversuchsstand mittels inverser Finite-Elemente-Methode

Alexander Irmischer¹, Matthias Weber², Delf Sachau³

¹ SUZ, c/o EADS Deutschland GmbH, 88039 Friedrichshafen, E-Mail: alexander.irmischer.external@eads.com

² Professur für Mechatronik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 22043 Hamburg, E-Mail: mweber@hsuhh.de

³ Professur für Mechatronik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 22043 Hamburg, E-Mail: sachau@hsuhh.de

Einleitung

In vielen motorisierten Fahrzeugen werden durch Störschallquellen stehende Wellenfelder im niedrigen Frequenzbereich angeregt. Dabei ist es vor allem im Personenverkehr von Bedeutung, dass die akustischen Bedingungen in den Transportmitteln den modernen Komfortansprüchen und Schutzbestimmungen gerecht werden. Im Rahmen des Forschungsförderprogramms Luftfahrttechnik Hamburg wird an der HSU Hamburg in Kooperation mit EADS Airbus das Forschungsprojekt „Entwicklung von Messtechniken zur Lärmquellen-identifizierung in Kabinen“ durchgeführt. Ziel dieses Projekts ist es, ein schnelles automatisiertes Messverfahren zur Bestimmung von akustischen Hot-Spots im Innenraum von Flugzeugkabinen zu entwickeln. Dazu kann u.a. die inverse Finite-Elemente-Methode (IFEM) eingesetzt werden.

Aufbauend auf die Ergebnisse in [1] und [2] wurde das IFEM-Verfahren im Rahmen dieser Untersuchungen an einem 2D-Akustikversuchsstand (Abbildung 1) umfassend validiert. Die Konzeptionierung des Versuchsstandes wurde dabei so umgesetzt, dass die Ergebnisse mit den Resultaten der Messungen am Flugzeug-Mock-up des Flugmusters Airbus A340 abgeglichen und das 3D-IFEM-Verfahren dadurch besser interpretiert werden können.



Abbildung 1: 2D-Akustikversuchsstand der HSU Hamburg in zwei verschiedenen Konfigurationen

Inverse Finite-Elemente-Formulierung

Für die Anwendung des IFEM-Verfahrens zur Schallquellenlokalisierung wird der komplexe Schalldruck in einem inneren Teilbereich des angeregten Akustikraums gemessen und als Randbedingung in die IFEM-Rechnung eingespeist. Diese liefert die unbekanntes Randgrößen (Druck und Schnelle). Abbildung 2 zeigt beispielhaft zwei mögliche Aufteilungen der Rechendomänen für die beiden verwendeten Versuchsstandkonfigurationen: K₁ bildet grundlegend die skalierten Höhen- und Breitenabmaße der Kabine eines Airbus A340 nach, K₂ beinhaltet außerdem die Modellierung der Sitze und der Gepäckablagen.

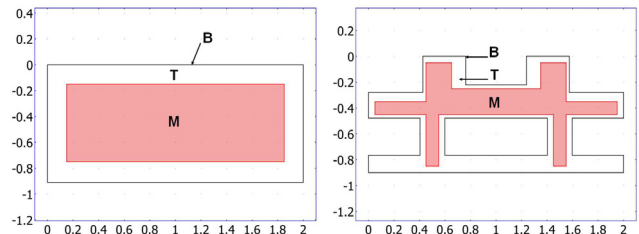


Abbildung 2: Berechnungsdomäne für K₁ (links) und K₂ (rechts; Achsenbeschriftung in m):

M: Messgebiet (engl.: measurement area)
T: Übergangsgebiet (engl.: transition area)
B: Randgebiet (engl.: boundary area)

Unter Beachtung dieser Gebiete lässt sich durch Partitionierung der allgemeinen Finite-Elemente- (FE-) Formulierung nachfolgende Matrizen Gleichung aufstellen [1]:

$$\begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \\ K_4 & K_5 & K_6 \\ K_7 & K_8 & K_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{MB} \\ p_{TU} \\ p_{BU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{MB} \\ v_{TB} \\ v_{BU} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Darin bezeichnen die Matrizen K_1 bis K_9 die partitionierten Untermatrizen der globalen Steifigkeitsmatrix K . Druckvektor p und Schnellevektor v sind entsprechend der gekennzeichneten Gebiete in drei Subvektoren eingeteilt. Dabei bezeichnet der erste Index den gleichnamigen Domänenbereich, wohingegen der zweite Index angibt, ob die entsprechende Größe bekannt (B) oder unbekannt (U) ist. Unter der Voraussetzung, dass es innerhalb des betrachteten Gebiets keine Schallquellen gibt, sind die aufgebrachten Schnellegrößen im gesamten Gebiet außer dem Rand gleich Null. Damit kann Gleichung 1 nach bekannten und unbekanntes Größen sortiert und nach Druck und Schnelle aufgeteilt werden:

$$\begin{bmatrix} K_2 & K_3 \\ K_5 & K_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{TU} \\ p_{BU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_1 p_{MB} \\ -K_4 p_{MB} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K_7 p_{MB} + K_8 p_{TU} + K_9 p_{BU} = v_{BU} \quad (3)$$

Die Gleichungen 2 und 3 werden nacheinander gelöst. Somit können Quellen auf B über die Berechnung von v_{BU} lokalisiert werden. Da bei realen Messungen jedoch stets Fehler in die Messkette eingestreut werden und das IFEM-Verfahren in diesem Fall unbrauchbare Ergebnisse liefert, muss eine Regularisierung der Lösung erfolgen. Diese dient der Stabilisierung von schlecht gestellten Problemen.

IFEM-Schallquellenlokalisierung

Von beiden Versuchsstandkonfigurationen wurde zur weiteren Untersuchung ein FE-Modell mit COMSOL Multiphysics erstellt. Die mit unterschiedlichen Anregungen aufgenommenen Messdatensätze für K_1 und K_2 wurden vorab zur Verifizierung mit einer COMSOL-Simulation als Referenz verglichen. Die Messdaten wurden anschließend auf die Knoten des FE-Modells interpoliert. Das Parameterfeld beinhaltet die Größe des Messgebiets, die Diskretisierung (mit Auswirkungen auf die Bestimmtheit der Lösungsgleichung) und die Anzahl der Freiheitsgrade, sowie drei verschiedene Regularisierungsverfahren. Die gesamten Untersuchungen wurden für zwei, entsprechend des Maßstabs zur A340-Kabine errechnete Vergleichsfrequenzen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt ein bezüglich Lokalisierung und Abgrenzung der Schallquelle gegenüber Phantomquellen sehr gut zu bewertendes Rückrechnungsergebnis für K_1: Wie aus der Schalldruckverteilung (links) hervorgeht, befindet sich die lauteste Stelle im Schallfeld an der oberen Schallwand bei einem laufenden Umfang von $x \approx 1,5$ m. Allein aus der Kartierung könnte der Anwender somit vermuten, dass sich in diesem Bereich eine Quelle befindet; erst die Darstellung der Normalbeschleunigung auf dem Rand (rechts) lokalisiert die Störquelle bei $x = 0,55$ m.

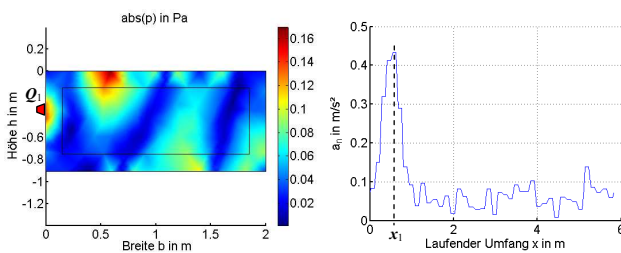


Abbildung 3: Optimum der Untersuchungen für K_1 und Anregung mit einer Quelle bei $x_1 = 0,55$ m ($f = 238$ Hz)

Ein ausgewähltes Rückrechnungsergebnis für K_2 ist in Abbildung 4 dargestellt. Aufgrund der fehlenden Eingangsinformation im Bereich unter den Sitzen sind die berechneten Schalldruckwerte in dieser Zone gleich Null; das Druckmaximum im linken Gang des Modells muss jedoch gemäß Energieerhaltung plausibel berechnet werden, was die gefundene Phantomquelle am Boden des linken Ganges begründet. Nichtsdestotrotz kann das Verfahren, angewendet durch einen erfahrenen Benutzer, beide Quellen lokalisieren; die Phantomquelle kann erst nach vertiefender Untersuchung der Ergebnisse als solche eingestuft werden.

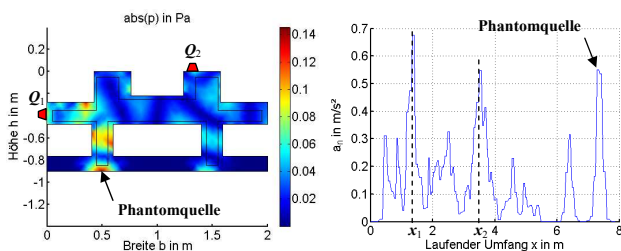


Abbildung 4: Optimum der Untersuchungen für K_2 und Anregung mit zwei Quellen bei $x_1 = 1,33$ m und $x_2 = 3,53$ m ($f = 528$ Hz)

Fazit

Das IFEM-Verfahren konnte anhand realer 2D-Messdaten in unterschiedlich realitätsnahen Konfigurationen erfolgreich validiert werden. Im Rahmen der Analyse aller Rückrechnungsergebnisse konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Rückrechnungen mit den besten Ergebnissen lokalisieren die Quellen annähernd perfekt. Problematisch stellt sich bezüglich der Detektion der Quellen u.a. das Auftreten von Geometrie-Ecken dar, da aus diesen eine Verfälschung des Verlaufs der Normalbeschleunigung auf dem Rand resultiert.
- Für Frequenzen oberhalb von $f = 500$ Hz fällt die Qualität der Ergebnisse etwas ab. Vor allem aber steigt die Instabilität der Lösung, d.h. kleine Änderungen in den Parametern der Rückrechnung haben große Unterschiede in den Resultaten zur Folge. Erfolgreiche Lokalisierungen der Quellen können somit nur in begrenzten Bereichen des Lösungsraums erzielt werden.
- Allgemein kann geschlossen werden, dass das Messgebiet relativ zur Gesamtfläche nicht zu groß werden darf, sonst oszilliert die Normalbeschleunigung auf B und behindert damit die Ortung der Quellen.
- Die Optimierung der Diskretisierung stellt die größte Schwierigkeit für den Anwender dar. Ein zu bevorzugender Bereich des Lösungsraumes, definiert durch die Anzahl der Knoten je Wellenlänge, konnte nicht gefunden werden. Direkte Querschlüsse lassen sich zwischen unterschiedlichen Anwendungsfällen nur ziehen, wenn die Geometrie der Modelle ähnlich ist, da die Struktur des zu lösenden Gleichungssystems direkt von den Eigenschaften des Modells abhängt.
- Bezüglich der Stabilisierung der Lösung fällt die Conjugated Gradient Least Squares - Regularisierungsmethode deutlich gegenüber Tikhonov- und Truncated Singular Value Decomposition - Verfahren ab.
- Das Messgebiet sollte möglichst homogen in der gesamten Fläche bzw. im gesamten Raum verteilt sein. Annähernd vollständig abgegrenzte Kanäle komplexer Geometrien ohne Eingangsdaten in die Rückrechnung produzieren im Ergebnis gegebenenfalls Phantomquellen am Ein- oder Ausgang dieser Kanäle.

Eine Nachvalidierung der Rückrechnungsergebnisse durch eine erneute Simulation und die Untersuchung der Intensitätsverteilung auf dem Rand können die IFEM-Störquellenlokalisierung weiter präzisieren.

Literatur

- [1] J. Drenckhan, D. Sachau, *Identification of Sound Sources using Inverse FEM*. Eleventh International Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, Russia, 2004.
- [2] M. Weber, T. Kletschkowski, D. Sachau, *Noise Source Identification in a Cross-Section of a Long-Range Airliner by Means of the Inverse Finite Element Method*, Proceedings, NAG/DAGA, Rotterdam, 2009.