

Fehlerabschätzung und Reduktion der Messpunkte bei inverser Schallquellenortung

Delf Sachau¹, Thomas Kletschkowski²

¹ Professur für Mechatronik, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: sachau@hsuhh.de

² Professur für Mechatronik, 22043 Hamburg, Deutschland, Email: kletsch@hsuhh.de

Einleitung

Um störenden Kabinenlärm erfolgreich bekämpfen zu können, müssen zunächst die Orte des Schalleintrags identifiziert werden. Da sich im Gegensatz zum Freifeld stehende Wellen ausbilden, stellt die direkte Lokalisierung von Lärmquellen in schwach gedämpften Innenräumen eine besondere Schwierigkeit dar. Dieses Problem wird beim Einsatz der in [1] und [3] beschriebenen Ortungstechniken durch das Einbringen schallabsorbierender Materialien gelöst.

Die Lokalisierung von Lärmquellen mit Hilfe der inversen Finite Elemente Methode (IFEM), siehe [2], bietet eine zeit- und kostengünstige Alternative. Ihre Anwendung erfordert zunächst das Vermessen des Schallfeldes in der Kabine. Anschließend sind die Schalldrücke des Messgebietes (M) den Knoten eines FE-Modells zuzuordnen. In einem letzten Schritt kann das resultierende Gleichungssystem derart umsortiert werden, dass mit Hilfe von Regularisierungsverfahren die Berechnung der unbekanntenen Schalldrücke im Übertragungsgebiet (T) sowie der unbekanntenen Lasten auf dem Rand (B) möglich wird. Weitere Details sind in [4] ausgeführt.

In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung dieser neuartigen Ortungsmethode am Beispiel eines vereinfachten numerischen Modells, das dem Querschnitt eines Flugzeugrumpfes angepasst ist, erläutert. Insbesondere wird auf Fehlerinflüsse bei der Rückrechnung eingegangen. Weiterhin wird ein Verfahren zur Reduktion des Messaufwandes vorgestellt.

Fehlerabschätzung

Um das inverse Verfahren zu verifizieren und die bei der Rückrechnung entstehenden Fehler beurteilen zu können, wurde die IFEM auf ein zweidimensionales Berechnungsmodell angewendet, das den Querschnitt einer Flugzeugkabine repräsentiert.

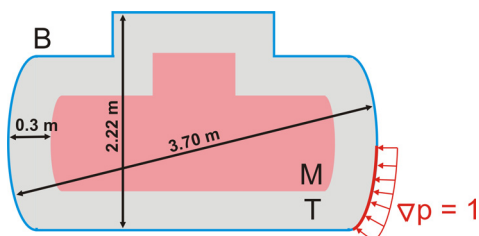


Abbildung 1: Vereinfachtes Querschnittsmodell eines Flugzeugrumpfes mit Randlast zur Verifikation der IFEM.

Abbildung 1 verdeutlicht die Dimensionen des Messgebietes (M), des Übertragungsgebietes (T) sowie die Form des äußeren Randes (B).

Auf diesem wurde für die zur Generierung der Messdaten erforderliche Vorwärtsrechnung ein Druckgradient von $\nabla p = 1 \text{ Pa/m}$ auf dem rot markierten Randabschnitt aufgebracht. Die blau gekennzeichneten Randabschnitte wurden in der Vorwärtsrechnung als schallhart angenommen. Die Berechnung erfolgte im Frequenzbereich für eine Anregung von $f = 250 \text{ Hz}$. Das FE-Netz bestand aus 430 Dreieckselementen mit quadratischen Formfunktionen und 241 Knoten (50 auf B, 58 in T und 133 in M). Die Rückrechnung erfolgte auf Basis der an den Knoten des Messgebietes entnommenen Schalldrücke, denen ein Amplitudenfehler von 5% aufgebracht wurde.

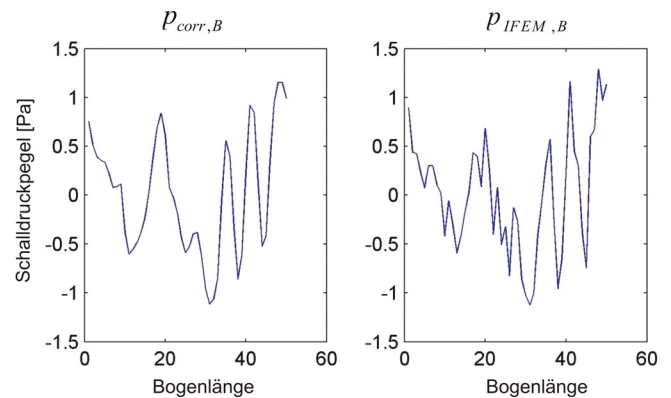


Abbildung 2: Korrekter Verlauf des Schalldruckes auf dem Rand (links) und invers berechneter Druckverlauf (rechts).

Abbildung 2 stellt den in der Vorwärtsrechnung ermittelten Verlauf des Schalldruckes auf dem Rand $p_{corr,B}$ dem mit Hilfe der IFEM ermittelten Randschalldruck $p_{IFEM,B}$ gegenüber. Die Ergebnisse belegen, dass die Anwendung einer Tikhonov-Regularisierung, siehe [4], eine zufrieden stellende Reproduktion des Schalldruckverlaufes auf dem Rand ermöglicht.

Um den Fehler der Rückrechnung zu quantifizieren und effektiv zwischen realen Schallquellen und Phantomquellen, die infolge der inversen Berechnung auftreten können, zu unterscheiden, wurde eine gefilterte Fehlerzahl e_{si} eingeführt. Diese wurde für jeden i -ten Randknoten bestimmt.

$$e_{si} = \begin{cases} p_{IFEM,Bi} - p_{corr,Bi} & \text{if } \left| \frac{p_{IFEM,Bi}}{\max(p_{corr,Bi})} \right| > 0,2 \\ 0 & \text{if } \left| \frac{p_{IFEM,Bi}}{\max(p_{corr,Bi})} \right| \leq 0,2. \end{cases} \quad (1)$$

Das Vorgehen begründet sich in der Annahme, dass die Qualität der Rückrechnung im Wesentlichen von signifikanten Unterschieden zwischen $p_{corr,B}$ und $p_{IFEM,B}$ bestimmt wird und erlaubt die Definition einer auf die Knotenanzahl bezogenen quadratischen Fehlernorm

$$g := \frac{1}{n_p} \sum_i e_{si}^2 \quad (2)$$

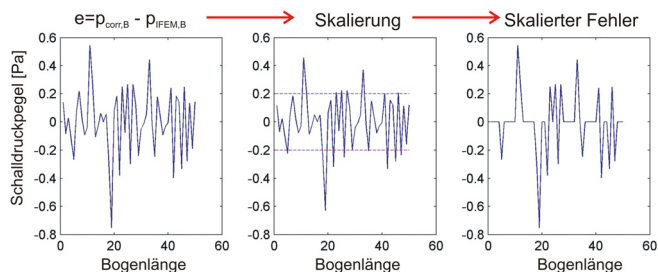


Abbildung 3: Beurteilung des Fehlers bei Rückrechnung.

Abbildung 3 verdeutlicht, dass sich die Einführung einer gefilterten Fehlerzahl nach Gleichung (1), zur Steuerung der Rückrechnung eignet, da der Berechnungsaufwand gezielt auf die Orte signifikanter Fehler konzentriert werden kann.

Tabelle 1: Gefilterte Fehlernorm und klassisches Residuum

Amplitudenfehler	Skalierte Fehlernorm	Residuum
2 %	0.0295 Pa	0.0330 Pa
5 %	0.0363 Pa	0.0411 Pa
8 %	0.0397 Pa	0.0447 Pa

In Tabelle 1 wird die skalierte Fehlernorm für unterschiedliche Amplitudenfehler mit dem klassischen Residuum verglichen. Die moderaten Unterschiede beider Fehlerindikatoren von weniger als 12% belegen, dass eine Rückrechnung auf Basis des gefilterten Fehlers statthaft ist.

Reduktion des Messaufwandes

Um den Einfluss von Messfehlern zu begrenzen und den experimentellen Aufwand moderat zu gestalten, ist eine geringe Anzahl von Messpunkten wünschenswert. Aus diesem Grund wurde am Beispiel eines kreisförmigen Berechnungsgebietes ein innerer Rand eingeführt, siehe [5].

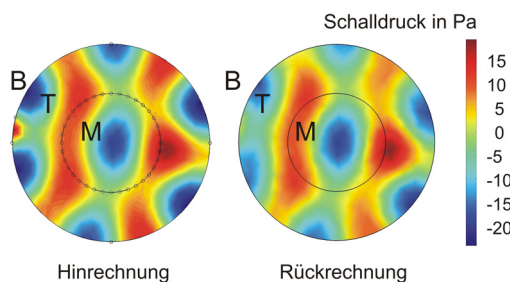


Abbildung 4: Kreismodell für modifizierte Rückrechnung mit innerem Rand ($R_a = 1m$, $R_i = 0,5m$).

Dieser umschließt, siehe Abbildung 4, das ursprüngliche Messgebiet vollständig. Sind die Schallwechseldrücke auf dem inneren Rand bekannt, lassen sich für diesen in einer

einfachen Vorwärtsrechnung, die nur für das Messgebiet M ausgeführt wird, konsistente Druck-Schnelle-Paare ermitteln, die als Randwerte für die Rückrechnung vom dann vollständig beschriebenen inneren auf den unbekanntem äußeren Rand benötigt werden.

Die Anwendung dieses Verfahrens reduziert einerseits die Anzahl der Messpunkte, die nun nur noch auf dem inneren Rand und nicht mehr im gesamten Messgebiet liegen. Folglich werden auch die in die inverse Berechnung einfließenden Messungenauigkeiten verringert. Andererseits reduziert sich der Aufwand der inversen Berechnung selbst, da nur noch die im Übertragungsgebiet (T) befindlichen Elemente einen Beitrag zu Systemmatrix liefern.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse einer Musterlösung für eine Frequenz von $f = 400\text{Hz}$ und eine Diskretisierungsdichte von 6 Knoten pro Wellenlänge. Der den Messdaten aufgeprägte Amplitudenfehler wurde auf 10% begrenzt. Die Rückrechnung erfolgte, wie in [4], unter Verwendung einer Tikhonov-Regularisierung.

Die qualitativ übereinstimmenden Berechnungsergebnisse belegen, dass die Rekonstruktion des Schallfeldes auch bei deutlicher Reduktion der Messdaten möglich ist, sofern konsistente Druck-Schnelle-Paare als Eingangsgrößen für die IFEM ermitteln werden.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einsatz der IFEM zur Rekonstruktion von Schallfeldern an einfachen Beispielen erläutert. Insbesondere wurde auf die Fehlerabschätzung auf Basis einer gefilterten Fehlerzahl und die Reduktion des Messaufwandes Bezug genommen. Die Einführung einer gefilterten Fehlerzahl erlaubt es, den Aufwand der Rückrechnung gezielt auf die Orte großer Abweichungen zwischen korrekter und invers berechneter Lösung zu konzentrieren. Die Reduktion des Messaufwandes gelingt durch die Einführung eines inneren Randes, für den mit Hilfe einer Vorwärtsrechnung in das ursprüngliche Messgebiet konsistente Druck-Schnelle-Paare zu ermitteln sind.

Literatur

- [1] Christensen, J. J.; Hald, J.: Beamforming. Tech. Review, Brüel & Kjaer, No. 1, (2004)
- [2] Drenckhan, J. D.; Sachau: Identification of Sound Sources using Inverse FEM. 7-th International Symposium TRANSPORT NOISE AND VIBRATION (2004), St. Petersburg, Russland
- [3] Maynard, J. D.; Williams, E. G.; Lee, Y.: Nearfield Acoustic Holography: Theory of generalized holography and the development of NAH. J. Acoust. Soc. Am., 78(4) (1985), 1395-1413
- [4] Sachau, D. ; Drenckhan, J.: Sound Sources Localization in Cabins by Inverse Finite Element Analysis. DAGA'06 Braunschweig
- [5] Pahlow, L. R.: Optimierung eines Inversen Finite-Elemente-Verfahrens zur Schallquellenidentifizierung in Kabinen. Diplomarbeit, HSU/UnibwH (2006)