

Bestimmung akustischer Modellparameter mittels Fehlerquadratminimierung

Kai Simanowski¹, Thomas Kletschkowski², Delf Sachau³

¹ Helmut-Schmidt-Universität/UniBwH, 22043 Hamburg, E-Mail: simanowski@hsuhh.de

² HAW Hamburg, 20099 Hamburg, E-Mail: thomas.kletschkowski@haw-hamburg.de

³ Helmut-Schmidt-Universität/UniBwH, 22043 Hamburg, E-Mail: sachau@hsuhh.de

Einleitung

Bei akustischen Nachbildungen, z. B. von Fahrzeugkabinen, werden Modellparameter benötigt. Für deren Bestimmung existieren klar definierte, unzweifelhaft etablierte und darüber hinaus genormte Messvorschriften, z. B. die EN ISO 10534-2 [1], die sogenannte „2-Mikrofon-Methode“.

In dieser Studie wird versucht, Bestandteile eines Modells, z. B. die Sitze, mit Impedanzrändern oder durch ein äquivalentes Fluid mit eigener Dichte, Schallgeschwindigkeit und Dämpfung anzunähern. Hierzu wird ein Verfahren zur Bestimmung der Parameter eines äquivalenten Fluides vorgestellt und mit einem an die 2-Mikrofon-Methode angelehnten Verfahren verglichen.

Versuchsaufbau

Für diese Studie wurde ein nach o. g. DIN gefertigtes Impedanzrohr verwendet (siehe Abbildung 1 oben). Hier kann die Ausbreitung ebener Wellen an verschiedenen Positionen unter breitbandiger Anregung erfasst und aus dem Druckübertragungsverhältnis die komplexe Impedanz des Rohrabschlusses berechnet werden.

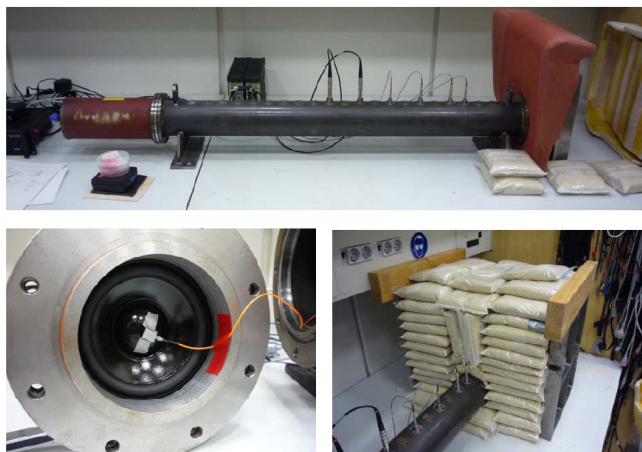


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung der komplexen Schalldrücke im Impedanzrohr, oben: Rohr mit offener Probe, unten links: Beschleunigungsaufnehmer auf der Lautsprechermembran, unten rechts: mit Sandpaketen umhülltes Rohrende

Der Rohrinnendurchmesser beträgt 100mm und die Länge 1200mm. Rosa Rauschen in einem Frequenzband zwischen 0Hz und 1,6kHz wurde als Anregungssignal auf einen Lautsprecher (Visaton W 100 s) am Rohranfang gegeben. Ein Miniatur-Beschleunigungsaufnehmer (Brüel&Kjaer, Typ 4517) diente zur Messung der Beschleunigung auf der

Lautsprechermembran (siehe Abbildung 1 unten links). An sechs Stellen entlang des Rohres wurde der Schalldruck mit Messmikrofonen (Brüel&Kjaer, Typ 4935 und Ono Sokki MI-1233, alle kalibriert mit einem Kalibrator von Brüel&Kjaer, Typ 4231) erfasst. Das Rohrende wurde, abhängig von der jeweiligen Konfiguration, mit Paketen aus Quarzsand umschlossen (siehe Abbildung 1 unten rechts) um die Schallabstrahlung an die Umgebung zu unterbinden. Als Prüfling diente ein Sitzpolster aus Schaumstoff mit Stoffüberzug.

Die Messwerterfassung erfolgte mit zwei Frontends des Herstellers Brüel&Kjaer, Typ 3560B, die Analyse und Datenexport mit PULSE LabShop wurde in 1Hz Auflösung durchgeführt.

Rechenmodelle

Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Modelle des eindimensionalen Wellenleiters der Länge l_1 . In beiden Fällen ist die Anregung am Rohranfang ($x=0$) als Schnellerandbedingung und das Rohrvolumen mit den Standardwerten für Luft (Schallgeschwindigkeit $c_L = 343\text{m/s}$, Dichte $\rho_L = 1,25\text{kg/m}^3$ und Dämpfung $\xi_L = 1,4\%$) belegt.

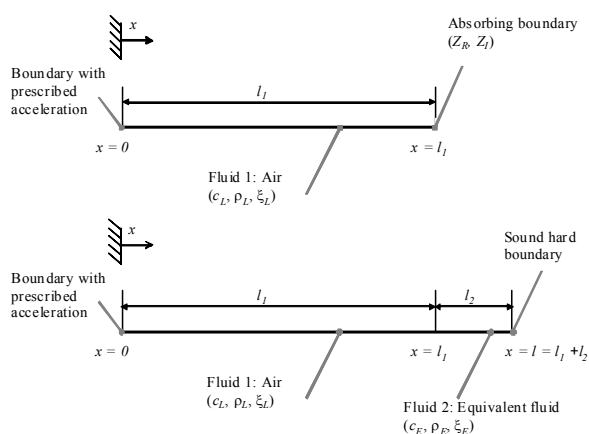


Abbildung 2: Modelle des eindimensionalen Wellenleiters, oben: mit absorbierendem Rohrende (Modell A), unten: mit angekoppeltem Äquivalentfluid (Modell B)

Beim oberen Modell (A) ist das Rohrende als absorbierende Grenzfläche mit komplexer Impedanz (Realteil Z_R und Imaginärteil Z_I) definiert, beim unteren (Modell B) ist ein zusätzliches Luftvolumen der Länge l_2 mit eigenen Parametern für Schallgeschwindigkeit, Dichte und

Dämpfung (c_E, ρ_E und ξ_E) mit dahinter liegendem schallhartem Rand angekoppelt.

Die analytischen Lösungen basieren auf der Helmholtz-Gleichung. Modell A ist in Formel (1) dargestellt, Modell B in Formel (2). Hier kommen, neben den bereits erwähnten Parametern, die komplexen, frequenzabhängigen Amplituden von Schallwechseldruck \hat{P} und Schallschnelle \hat{V} , sowie die komplexen Wellenzahlen $k_{L,E} = \omega / c_{L,E} \cdot (1 + j\xi_{L,E}) / (1 + j\xi_{L,E}^2)$, vor.

$$\hat{P} = \frac{[c_L^2 \rho_L^2 \cdot (e^{j2k_L h} - e^{j2k_L x}) + c_L \rho_L \cdot Z(j\omega)(e^{j2k_L h} + e^{j2k_L x})] \cdot e^{-jk_L x}}{c_L \rho_L \cdot (1 + e^{j2k_L h}) + Z(j\omega) \cdot (e^{j2k_L h} - 1)} \cdot \hat{V} \quad (1)$$

$$\hat{P} = \frac{c_E \rho_E (e^{j2k_E h} + 1)(e^{j2k_L h} + e^{j2k_L x}) + c_L \rho_L (e^{j2k_L h} - 1)(e^{j2k_L h} - e^{j2k_L x})}{c_E \rho_E \cdot (e^{j2k_E h} - 1)(1 + e^{j2k_L h}) + c_L \rho_L \cdot (e^{j2k_L h} + 1)(e^{j2k_L h} - 1)} c_L \rho_L e^{-jk_L x} \hat{V} \quad (2)$$

Mit beiden Modellen wurde eine Anpassung der Parameter an die Messwerte mit dem Ziel der kleinsten quadratischen Abweichungssumme durchgeführt.

Ergebnisse

Die Pegeldifferenz (Fit Error) zwischen angepasster (*ang*) und gemessener (*gem*) Impedanz wurde mit Gleichung (3) berechnet und in Abbildung 3 dargestellt. Zwischen 140Hz und 320Hz beträgt sie weniger als -20dB, die Abweichung ist somit kleiner als 1%.

$$L_E = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^6 |Z_i^{gem}(j\omega) - Z_i^{ang}(j\omega)|^2}{\sum_{i=1}^6 |Z_i^{gem}(j\omega)|^2} \right) \quad (3)$$

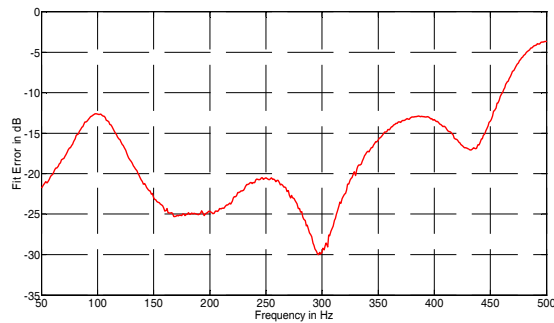


Abbildung 3: Pegeldifferenz zwischen angepasster und gemessener Impedanz nach Gleichung (3)

In Abbildung 4 sind exemplarisch für 209Hz Mess- und Berechnungsergebnisse als komplexe, ortsabhängige Frequenzantwort zwischen der Beschleunigungsanregung und dem Druck dargestellt. Die Ergebnisse stimmen sowohl im Realteil (Dreieck und rote Linie) als auch im Imaginärteil (Kreis und grüne Linie) gut überein.

Die Anpassung bei Model B mit drei unabhängigen Parametern zeigt die starke Abhängigkeit von Schallgeschwindigkeit und Dichte in Form von sehr unregelmäßigen Frequenzgängen. Exemplarisch ist in Abbildung 5 die Schallgeschwindigkeit dargestellt. Durch Festsetzung eines Parameters (für Abbildung 6 wurde für die Dichte der Wert des Luftvolumens verwendet) glätteten sich die Frequenzgänge.

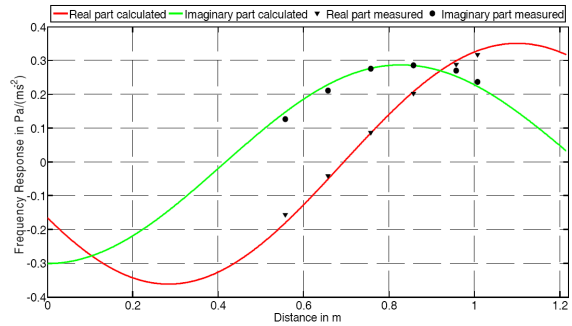


Abbildung 4: Ortsabhängige Frequenzantwort zwischen Schallwechseldruck und Beschleunigung am Anregungsort bei 209Hz, Linien: Rechnung (rot = Realteil, grün = Imaginärteil), Symbole: Messung (Dreieck = Realteil, Punkt = Imaginärteil)

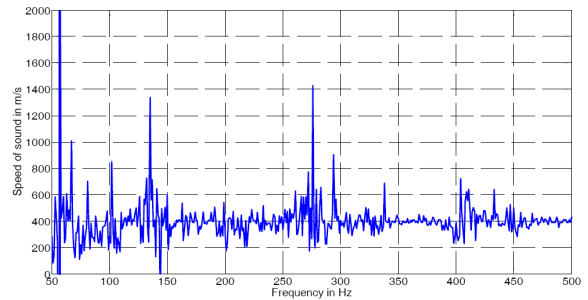


Abbildung 5: Frequenzgang der optimierten Schallgeschwindigkeit für Model B mit unabhängig optimierten Parametern

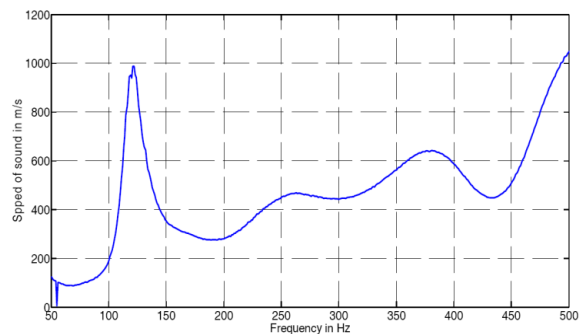


Abbildung 6: Frequenzgang der optimierten Schallgeschwindigkeit für Model B mit festgesetzter Dichte

Zusammenfassung

Beide Modelle konnten mit Standard-Software implementiert werden. Da Model A direkt mit bewährten Verfahren überprüft werden kann, ist dieser Ansatz zu bevorzugen.

Literatur

- [1] EN ISO 10534-2, „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktionen“