

Vergleich verschiedener Absorbermodelle zur Berechnung von Flugzeuginnenlärm unter Beachtung poröser Materialien

Andreas Gündel¹, Dr-Ing. Sigurd Häusler², Dr-Ing. Steffen Marburg³

¹ EADS Deutschland GmbH, 85521 Ottobrunn, Deutschland, Email: andreas.guendel@eads.net

² EADS Deutschland GmbH, 85521 Ottobrunn, Deutschland, Email: sigurd.haeusler@eads.net

³ TU-Dresden, Professur für Maschinendynamik und Schwingungslehre, Email: marburg@ifkm.mw.tu-dresden.de

Einleitung

Zur Beurteilung theoretischer Ansätze für Absorbermaterialien wurde eine experimentelle Studie zum akustischen Verhalten eines Flugzeugrumpfes mit und ohne Isolation durchgeführt. Die ermittelte Schalldruckreduktion durch die Schicht Microlite (0,6pcf) wird im zugehörigen NASTRAN-FE-Modell über Modifikation akustischer Anteile in Massen- und Steifigkeitsmatrix nachempfunden. Die verwendeten äquivalenten Fluid-Parameter zur Beschreibung des Absorbermaterials entstammen einem eindimensionalen Biot-Modell, sowie einer oft verwendeten Modell-Beschreibung nach Allard-Champoux.

Experimentelle Innenlärmreduktion

Der Rumpf einer Dornier-328 wird durch verschiedene elektrodynamische Schwingungserreger, sowie ein Propellernahfeld zum Schwingen gebracht. Die Kabinenausstattung wurde entfernt und die nackte Aluminium-Zelle in zwei Zuständen pro Anregung vermessen:

- Rumpf-Aussenhaut ohne Isolation,
- Rumpf-Aussenhaut mit 8cm Microlite. (Abb. 1)

820 etwa gleichverteilte Mikrophone erfassen das akustische Feld im Inneren. Abbildung 2 zeigt die erreichten Reduktionen durch Absorption in Terzbändern für zwei ausgewählte Anregungen. Sie dienen den nachfolgenden Simulationen als Zielvorgabe.



Abbildung 1: Innenansicht der isolierten Hautfelder des Testrumpfes einer Dornier-328.

Allgemeines zu Porösen Materialien

Poröse Materialien werden entsprechend der elastischen Eigenschaften der Matrix in drei prinzipiellen Varianten modelliert.

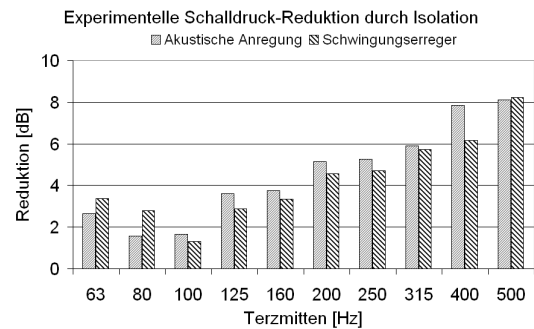


Abbildung 2: Über 820 Positionen gemittelte experimentelle Schalldruckreduktion in Testrumpf durch 8cm Microlite entlang der Außenschale unter zwei akustischen Anregungen.

- **Modell des starren Rahmens** → Bewegungen der Matrix \ll Bewegung des Fluids,
- **Elastische poröse Absorber** → Bewegungen der Matrix \approx Bewegung des Fluids
- **Massegehemmtes Verhalten** → Steifigkeit der Matrix \ll Steifigkeit des Fluids

Die Modelle „starrer Rahmen“, sowie „Massegehemmtes Verhalten“ lassen sich durch ein äquivalentes Fluid beschreiben. Dabei charakterisieren die komplexen Größenpaare Ausbreitungskonstante $\Gamma(\omega)$ und Wellenwiderstand $Z(\omega)$, oder Bulk Modul $K(\omega)$ und Dichte $\rho_{eff}(\omega)$ das System vollständig. Biots erweiterter Ansatz zur Beschreibung elastischer poröser Absorber berücksichtigt neben den Kompressionswellen im Fluid auch Kompressions- und Scherwellen der Matrix.

Äquivalentes Fluid aus dem Biot-Modell

Für den eindimensionalen Fall können unter Vernachlässigung der Scherwellen aus dem Biot Modell äquivalente Fluidparameter ermittelt werden. Dazu wird ein

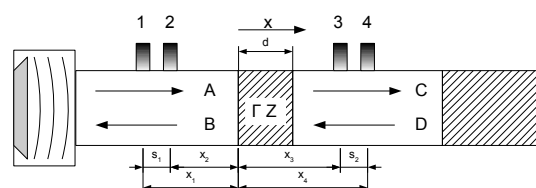


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung komplexer Materialparameter Γ und Z des Absorbers.

Experiment zur Bestimmung komplexer Materialpara-

meter analytisch nachempfunden in dem der Absorber nach Biot modelliert ist. Der Aufbau liefert die Transfer-Matrix mit dem Druck P und der Schnelle V

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d}, \quad (1)$$

aus deren Einträgen T_{11} , T_{12} und T_{21} die komplexen Materialparameter $\Gamma(\omega)$ und $Z(\omega)$ ermittelt werden. Daraus ergeben sich $\rho_{eff}(\omega)$ und $c_{eff}(\omega)$ wie sie für das verwendete Microlite in Abbildung 4 (oben) dargestellt sind.

Starrer Rahmen nach Allard-Champoux

Das Modell nach Allard und Champoux bezieht sich auf das Konzept der charakteristischen Längen nach Jonson et. al. Es definiert einen frequenzabhängigen Kompressionsmodul $K(\omega)$ sowie die effektive Dichte $\rho_{eff}(\omega)$ aus den messbaren Größen Porosität ϕ , Strömungswiderstand Ξ , Strukturfaktor α_∞ , sowie den Porenformfaktoren s_v und s_t .

$$K(\omega) = f(\alpha_\infty, \phi, \Xi, \mu, \rho_0, \omega, Pr, s_v, s_t) \quad (2)$$

$$\rho_{eff}(\omega) = f(\alpha_\infty, \phi, \Xi, \mu, \rho_0, \omega, s_v, s_t) \quad (3)$$

Zusätzlich finden sich der statische Druck P_0 , die dynamische Zähigkeit von Luft μ , die Prandtlzahl Pr sowie die Adiabaten-Konstante γ wieder. Der untere Teil der Abbildung 4 stellt die effektive Schallgeschwindigkeit sowie die Dichte im verwendeten Absorber nach Allard-Champoux dar.

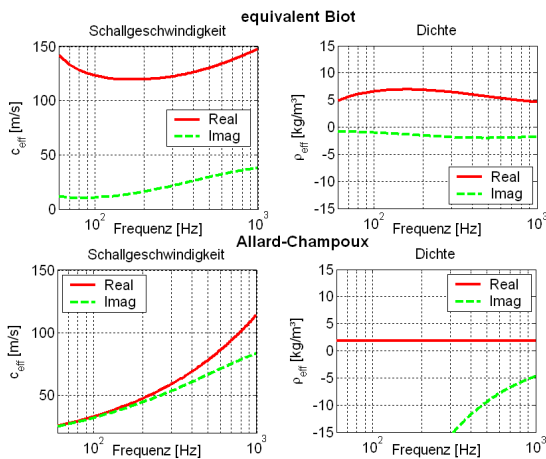


Abbildung 4: Effektive Schallgeschwindigkeiten und Dichten für Microlite nach Biot (oben) und Allard-Champoux (unten).

Umsetzung in Nastran

Dichte und Schallgeschwindigkeit finden sich in Massen- und Steifigkeitsmatrix wieder.

$$\underline{K} \propto 1/\rho c^2 \quad \underline{M} \propto 1/\rho \quad (4)$$

Die komplexen Materialparameter erfordern komplexwertige Matrizeneinträge. Da Nastran keine komplexe Massenmatrix unterstützt, werden alle imaginären Anteile auf die Steifigkeitsmatrix gelegt. Pro Frequenz ergeben

sich folgende Elementmatrizen:

$$\underline{\tilde{K}}_E = Re(\underline{K}_E) + i [Im(\underline{K}_E) - \omega^2 Im(\underline{M}_E)] \quad (5)$$

$$\underline{\tilde{M}}_E = Re(\underline{M}_E) \quad (6)$$

Vergleich Simulation - Experiment

Die äusseren Elemente des Luftvolumens des gekoppelten Modells werden wahlweise durch die äquivalenten Materialmodelle ersetzt oder als Luft modelliert. Entsprechend dem Versuch, liefern 820 Knoten akustische Drücke. Die in der Simulation erreichten Schalldruckreduktionen sind im Vergleich zur experimentellen Reduktion für eine Anregung in Abbildung 5 dargestellt.

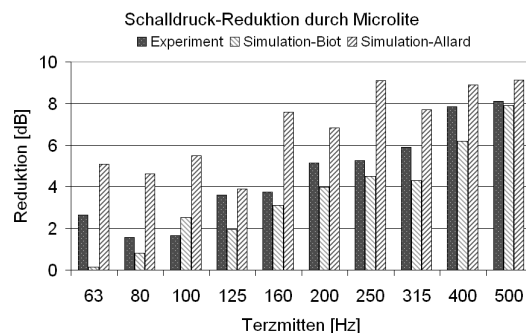


Abbildung 5: Mittlere Schalldruckreduktionen in Experiment sowie den Simulationen mit Absorbern nach equivalent Biot und Allard-Champoux.

Schlussfolgerung

Das aus dem Biot Modell extrahierte äquivalente Fluid liefert konservativere Ergebnisse und beschreibt das akustische Verhalten leichter Glaswolle deutlich besser als das starre Rahmen Modell nach Allard-Champoux. Trotz der Vernachlässigung der Schwerwellen in der Matrix liegen die Ergebnisse für das äquivalente Fluid aus dem Biot-Modell im akzeptablen Bereich. Die in Abbildung 4 dargestellten Verläufe deuten ebenfalls darauf hin. Gemessene Materialkennwerte für leichte Glaswollen ähneln wesentlich mehr den oberen Materialparametern als dem „Starren Rahmen“ Modell.

Literatur

- [1] Allard, J.-F.: Propagation of Sound in Porous Media. Elsevier Applied Science London and New York (1993)
- [2] Biot, M.A.: Theory of propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. The Journal of the Acoustical Society of America (1956), 28 / 2
- [3] Song, B.H.,Bolton J.S.: A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials, Journal of the Acoustic Society of America (2000), 107 / 3
- [4] Allard, J.-F.,Champoux, Y.: New empirical equations for sound propagation in rigid fibrous materials. The Journal of the Acoustical Society of America (1992), 91