

Auslegung und experimentelle Vermessung eines aktiven gekrümmten CFK - Paneels

Oliver Unruh, Malte Misol, Thomas Haase, Stephan Algermissen

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 38108 Braunschweig, Deutschland, Email: oliver.unruh@dlr.de

Einleitung

In der kommerziellen Luftfahrt werden in immer stärkerem Maße kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eingesetzt, welche sich gegenüber Metallen durch ihre geringe Masse und ihre hohe Steifigkeit auszeichnen. Jedoch resultiert aus diesen Eigenschaften auch ein schlechteres vibroakustisches Verhalten, da die Koinzidenzfrequenz gering ist und somit tieffrequenter Schall (bis 500 Hz) effizient in die Flugzeugkabine transmittiert wird. Da die passiven Dämmmaßnahmen bei tiefen Frequenzen weniger effektiv sind, wäre die effiziente Schalldämmung mit bedeutender Gewichtszunahme verbunden. Um das Leichtbaupotential der neuen Bauweisen nicht zu gefährden, und gleichzeitig eine effiziente Reduktion des niederfrequenten Schalls zu erreichen, wird an aktiven Systemkonzepten mit integrierter Sensorik und Aktuatorik geforscht. Der vorliegende Beitrag stellt aktuelle Forschungsergebnisse des DLR aus dem Bereich der aktiven Lärm- und Schwingungsreduktion an gekrümmten Faserverbundstrukturen vor, wobei der Ansatz der aktiven Struktur-Akustik-Regelung (ASAC) verfolgt wird. Der Schwerpunkt dieser Veröffentlichung liegt auf dem Vergleich und der Validierung von verschiedenen Ansätzen zur Berechnung der Schalleistung von gekrümmten Strukturen.

Analytische Schalleistungsberechnung

Zur effizienten Auslegung eines aktiven Systems wird am DLR eine ASAC-Prozesskette entwickelt. Diese beschreibt den gesamten physikalischen Übertragungspfad, bestehend aus der Anregung (Diffusfeld, turbulente Grenzschicht), Strukturmechanik, Schallabstrahlung, Aktuatorik und Sensorik sowie den adaptiven Regelungs- und Steuerungsalgorithmen. Die Aktuator- und Sensorplatzierung erfolgt mit Hilfe der genetischen Optimierung, wobei zur Berechnung der aktiven Schalleistung der Näherungsansatz von Bevan [1] verwendet wird, der auf einer diskreten Formulierung des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals [2] basiert. Der Ansatz wird im Folgenden kurz beschrieben, für eine detaillierte Herleitung wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Wird die schallabstrahlende Oberfläche in viele Elementarstrahler der Fläche S aufgeteilt, so berechnet sich die aktive Schalleistung P im Frequenzbereich aus folgender Beziehung

$$\mathbf{P} = \mathbf{v}^H \mathbf{R} \mathbf{v} \quad \mathbf{R} = \frac{S}{2} \text{Re}[\mathbf{Z}], \quad (1)$$

dabei sind \mathbf{v} die Strukturschnellen, \mathbf{R} die Resistanzmatrix und \mathbf{Z} die Impedanzmatrix. Für den Fall einfach gekrümmter Strukturen kann die Matrix \mathbf{R} wie folgt for-

muliert werden

$$\mathbf{R} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \mathbf{M} \quad (2)$$

wobei \mathbf{I} die Einheitsmatrix ist. Die Monopol- und Dipolkoeffizienten \mathbf{M} und \mathbf{D} sind am Referenzpunkt i zum Element j definiert als

$$M_{ij} = \frac{\omega^2 L^2 a}{2\pi c^2} \left(\frac{\sin kr_{ij}}{r_{ij}} \right) \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{\omega^2 L^2 a}{2\pi c^2} \left(\frac{\cos kr_{ij}}{(kr_{ij})^2} + \frac{\sin kr_{ij}}{kr_{ij}} \right) \cos \gamma_{ij} \quad (4)$$

r_{ij} ist dabei der Abstand zweier Punkte auf der Strukturoberfläche, γ_{ij} der Winkel zwischen den Oberflächennormalen, ω die Kreisfrequenz, c die Schallgeschwindigkeit, k die Wellenzahl, $a = S/L^2$ die dimensionslose Fläche und L die Länge des Elementarstrahlers.

Numerische Validierung

In diesem Abschnitt wird die aktive Schalleistung nach Bevan [1] mit einer in der kommerziellen FE-Software ANSYS durchgeführten harmonischen Analyse des gekoppelten Systems (Struktur-Fluid) verglichen. Der Gegenstand der Untersuchungen ist eine gekrümmte CFK-Schale mit den Abmessungen von 1.5 x 1.3 Meter und Krümmungsradius von 1 Meter. Die Teststruktur wurde, samt Elastomerlagerung, einseitiger Fluid-Struktur-Kopplung und Luftvolumen, in ANSYS modelliert. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Diffusfeldanregung, die Strukturantwort und das Schalldruckfeld auf einer Hüllfläche in 1.3 Meter Abstand bei einer Frequenz von 600 Hz.

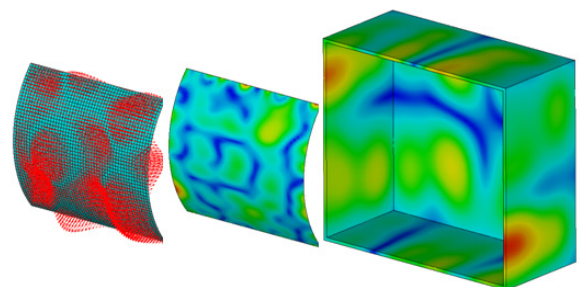


Abbildung 1: Diffusfeldanregung (links), Strukturschnellen (mitte) und Schalldruckfeld (rechts) bei 600 Hz.

Zur analytischen Berechnung der Schalleistung nach dem Bevan-Ansatz wurde das ANSYS-Modell der Struktur ohne Akustikkopplung in modaler Form in die ASAC-

Prozesskette integriert. Daraus werden die Strukturschnellen und das Schalldämmmaß (Bevan-Ansatz) berechnet und anschließend mit einer vollständig gekoppelten und wesentlich rechenintensiveren Simulation in ANSYS verglichen (Abbildung 2). Die Abweichungen der beiden Verfahren können durch die Annahme der reflexionsfreien Ränder im analytischen Fall begründet werden. Hinzu kommt, dass bei tiefen Frequenzen die Freifeldannahme auf dem kubischen Mikrophonnetz in ANSYS verletzt wird.

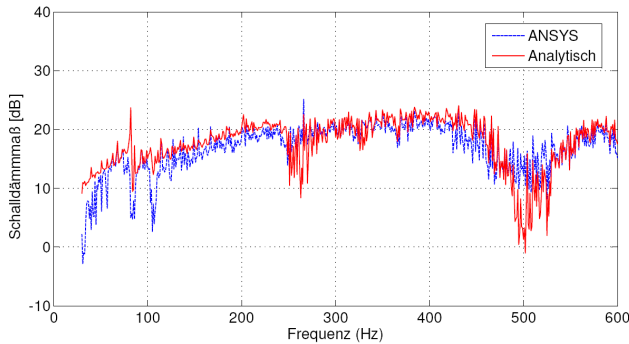


Abbildung 2: Schalldämmmaß des gekrümmten Paneels.

Experimentelle Validierung

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde das gekrümmte Paneel im Akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig (ATB) vermessen (Abbildung 3).



Abbildung 3: Reflexionsarmer Raum des ATB.

Zur experimentellen Bestimmung der Schalleistung wurden die Messungen nach ISO 9614-2 mit einer Schallintensitätssonde durchgeführt. Die im Experiment verwendete Punktkraftanregung wurde bei den beiden Simulationsverfahren ebenfalls umgesetzt und zur Normierung der Schalleistung verwendet. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der entsprechenden Terzpegel.

Zur abschließenden Validierung des Bevan-Ansatzes wurde eine Vibrationsmessung mit dem Laser-Scanning-Vibrometer (LSV) auf 2300 Punkten vorgenommen. Aus den gemessenen Strukturschnellen konnte mit der Resistanzmatrix nach Gleichung 1 die Schalleistung berech-

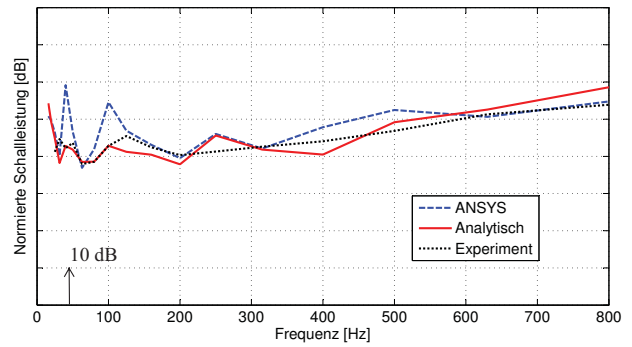


Abbildung 4: Normierte Schalleistung (Shaker-Anregung).

net werden (Abbildung 5). Dieses Vorgehen erlaubt eine direkte Quantifizierung der akustischen Approximationsgüte des Ansatzes, unabhängig von den Unsicherheiten des strukturdynamischen Modells der Schale. Im Frequenzbereich zwischen 100 und 600 Hz zeigt der berechnete Verlauf eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Abweichungen ab 600 Hz sind vermutlich auf den Diskretisierungsfehler der Resistanzmatrix zurückzuführen.

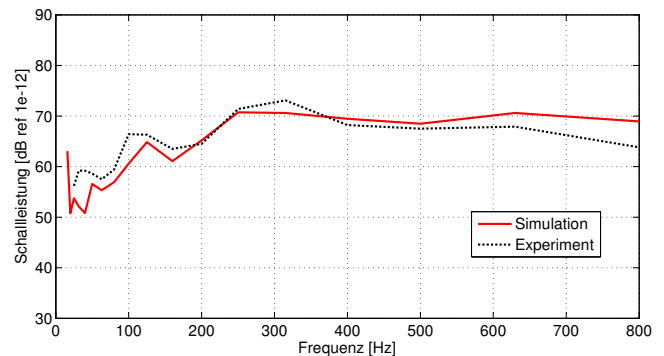


Abbildung 5: Gemessene und berechnete Schalleistung (LSV-Strukturschnellen und Bevan-Ansatz) bei Shaker-Anregung.

Zusammenfassung

Der analytische Ansatz zur effizienten Berechnung der Schalleistung innerhalb der genetischen Optimierung der ASAC-Prozesskette wurde mittels FEM und vibroakustischen Messungen im Transmissionsprüfstand validiert. Im nächsten Schritt wird anhand des Gütekriteriums der aktiven Schalleistung eine optimierte Aktuatorplatzierung abgeleitet, ein ASAC-System ausgelegt und vermessen.

Literatur

- [1] J.S.Bevan: Piezoceramic actuator placement for acoustic control of panels. Old Dominion University and Langley Research Center 2001
- [2] G.H.Koopmann, H.Benner: Method for computing the sound power of machines based on the Helmholtz integral. The Journal of the Acoustical Society of America 1982