

Simulation zu aktiven Lärminderungsmaßnahmen an einem Propellerflugzeug

Andreas Gündel¹, Dr. Sigurd Häusler, Dr. Steffen Marburg

¹ EADS Innovation Works, 81663 München, Email: andreas.guendel@eads.net

Einleitung

Der Lärm in Kabine oder Frachtraum von Turboprop-Flugzeugen wird durch den Propellergrundton sowie den zugehörigen Harmonischen dominiert[1]. Im gemittelten akustischen Spektrum treten die tonalen Anregungen bis zu 20dB aus dem durchschnittlichen Schalldruckpegel hervor. Der Propellergrundton liegt gewöhnlich bei 100Hz. Im Bereich der ersten drei Propellertöne (BPF) ist das Verhalten von Struktur und akustischem Fluid von globalen Moden bestimmt. Bei der Berechnung derartiger gekoppelter Probleme wird daher zunehmend auf die Finite-Elemente-Methode zurückgegriffen.

Zur Minimierung tonaler akustischer Störungen eignen sich passive, sowie aktive Maßnahmen. Typischerweise kommen Schwingungstilger (Dornier 328, C-130) sowie poröse Materialien als passive Methoden zum Einsatz. Aber auch aktive Lärmreduzierung, wie beispielsweise *Active Noise Control* in der SAAB2000 findet zunehmend Anwendung[3].

Die dargestellte Arbeit befasst sich mit der Auslegung aktiver Lärmreduktionsmaßnahmen anhand eines viermotorigen Propellerflugzeuges durch Finite-Elemente-Simulationen. Anforderungen an simultan auftretende Propellertöne werden gewichtet bewertet und in einer gemeinsamen Zielfunktion vereint.

Simulationsmodell

Das gekoppelte Finite-Elemente-Modell zur Berechnung strukturdynamischer und akustischer Antworten besteht aus 1200000 Freiheitsgraden. Der Strukturanteil repräsentiert den zylindrischen Rumpfteil ohne Cockpit und Heck. Etwa 800000 Freiheitsgrade beschreiben den Rumpf im angeregten Bereich um die Propellerebene. Entsprechend dem Innendruck bei 8000m Flughöhe ist die Struktur statisch vorgespannt. Das Modell ist mittels experimenteller Vergleiche bis 200Hz validiert.

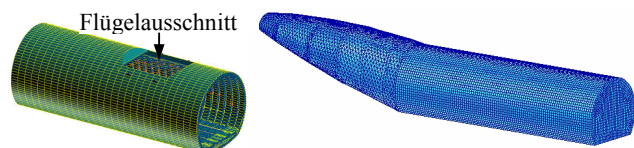


Abbildung 1: Struktur und Fluid des gekoppelten FE-Modells

Etwa 400000 Freiheitsgrade beschreiben das in seiner vollen geometrischen Ausdehnung modellierte Fluid. Die porösen Anteile der offenen Isolation sind durch ein äquivalentes Fluid berücksichtigt[4]. Beide Modellteile

koppeln über Hautfelder, Boden, Spant- und Stringerknoten.

Die Propelleranregung stellt eine Überlagerung der vier Einzelpropeller dar. Die absoluten Drücke basieren auf Daten des Propellerherstellers. Die Phasenverteilung der bis zu 150dB(A) starken Anregung entspricht den geometrischen Verhältnissen und berücksichtigt die Vorwärtsbewegung in Flugrichtung.

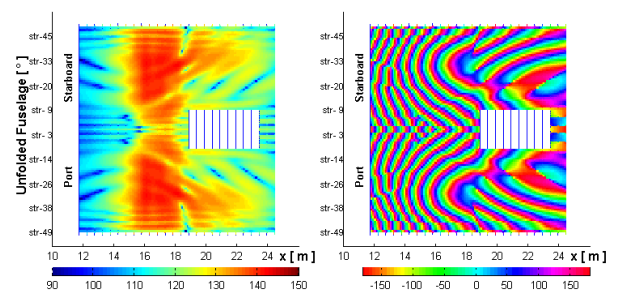


Abbildung 2: Druck und Phasenverteilung der Propelleranregung bei 184Hz auf der abgewickelten Struktur

Aktive Lärminderungsmaßnahme

Das aktive System zur Minimierung des Kabinenlärms basiert auf der Verwendung elektrodynamischer Schwingungserreger, sowie Mikrofonen als Sensoren.

In Transportflugzeugen kommt die Platzierung von Sensormikrofonen im offenen Frachtraum nicht in Frage. Eine Installation ist nur entlang der Außenhaut möglich. Die Spezifikation minimalen Schalldrucks bezieht sich jedoch auf eine virtuelle Ebene (Monitor-Ebene), die sich im offenen Frachtraum etwa 1m über dem Boden befindet.

Im Vorfeld der Berechnungen wurden 150 Positionen zur Platzierung von Aktuatoren auf den Spanten des Rumpfes festgelegt. Jedem Aktuator werden zwei Mikrofone innerhalb 1,5m Radius zugeordnet, wobei die exakte Positionierung frei wählbar ist. Die Aufgabe besteht darin, geeignete Mikrofonpositionen zu finden, die im kontrollierten Zustand für maximale Reduktion des Schalldrucks in der Monitor-Ebene bei den ersten drei Propellertönen sorgen.

Mittels LMS-Algorithmus werden die nötigen Aktuatorkräfte berechnet. Vordefinierte Maximalkräfte von

$$150N \rightarrow 1BPF, \quad 70N \rightarrow 2BPF, \quad 25N \rightarrow 3BPF$$

werden durch Manipulation der Singulärwerte der Transfermatrix entsprechend

$$\mathbf{f} = -\mathbf{V} (\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{p}_0 \rightarrow \mathbf{V}, \mathbf{S}, \mathbf{U} = \text{svd}(\mathbf{T})$$

erreicht, wobei \mathbf{f} den Vektor der Aktuatorkräfte, \mathbf{T} die Transfermatrix der Aktuatoren auf die Mikrofone, \mathbf{p}_0 das Primärschallfeld an den Sensormikrofonen, λ den additiven Anteil zur Kraftbegrenzung und \mathbf{Q} den Einfluss der Mikrofone darstellt.

Optimierung von Mikrofonpositionen

Aus einer Vielzahl möglicher Kombinationen paarweiser Mikrofone wird mittels des stochastischen Verfahrens „Simulated Annealing“ eine Mikrofonverteilung optimiert[2]. Eine gewichtete Zielfunktion berücksichtigt die simultan auftretenden Anregungen von 1BPF, 2BPF und 3BPF zur Minimierung des Schalldrucks im Monitor-Bereich.

Bei zufälliger Verteilung der Mikrofone erreicht das System Reduktionen von -8dB, 0dB und 0dB für 1BPF, 2BPF und 3BPF. Werden die entsprechend optimierten Mikrofonpositionen zugrunde gelegt, liefert das Modell mit entsprechend aufgebrauchten Aktuatorkräften -10dB, -4dB bzw. -2dB für 1BPF, 2BPF und 3BPF.

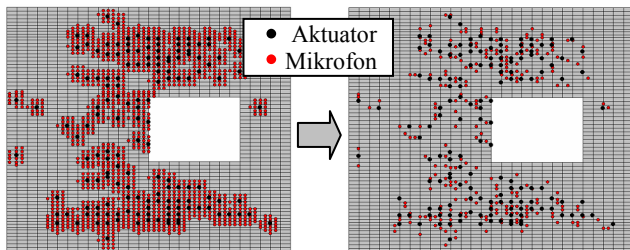


Abbildung 3: Abgewickelte Struktur mit Aktuator- und Mikrofonpositionen – links: mögliche Auswahl – recht: optimierte Positionen

Für Frequenzen um die BPFs sind die gemittelten Schalldrücke mit und ohne aktive Maßnahme in Abbildung 4 dargestellt.

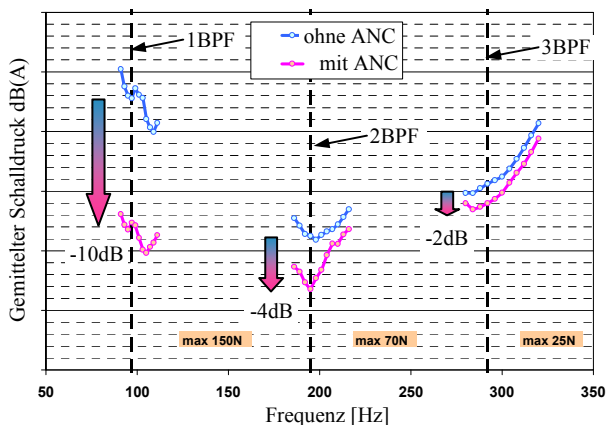


Abbildung 4: Gemittelter Monitor-Schalldruck mit und ohne ANC unter Verwendung positionsoptimierter Mikrofone

Optimierung auf Mikrofonwichtungen

Die ermittelten Mikrofonpositionen stellen einen Kompromiss zwischen den einzelnen Anregungen dar. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems werden die Sensormikrofone mit Wichtungsfaktoren multipliziert. Mit diskreten Werten zwischen 0.5 und 1.5 wird für jede Anregung ein individueller Vektor von Wichtungen ermittelt, der eine weitere Schalldruckreduktion im

Monitor Bereich garantiert. Analog der Positionsoptimierung, wird das stochastische Optimierungsverfahren „Simulated Annealing“ eingesetzt.

Unter Berücksichtigung optimierter Mikrofonpositionen, sowie zusätzlichen Gewichtungsfaktoren, erhöhen sich die erreichten Reduktionen für 1BPF und 2BPF deutlich auf -20dB und -9dB. 3BPF bleibt von der Maßnahme weitgehend unberührt. Abbildung 5 zeigt den Vergleich gemittelter Monitor-Schalldrücke um die BPFs.

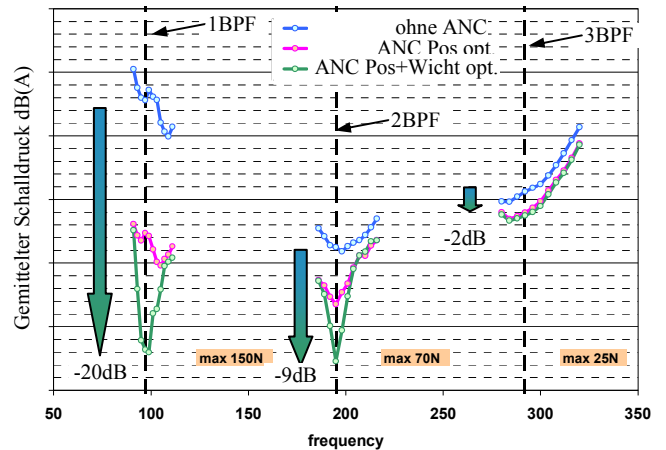


Abbildung 5: Gemittelter Monitor-Schalldruck ohne Maßnahme, sowie ANC mit positionsoptimierten Sensormikrofonen sowie zusätzlichen Wichtungen

Zusammenfassung

Aktive Lärminderungsmaßnahmen eignen sich hervorragend zur Minimierung von Propellertönen im Innraum von Turboprop-Flugzeugen. Aufgrund geometrischer Anforderungen können Sensormikrofone nur abseits des eigentlichen Zielgebiets installiert werden. Durch Optimierung dieser Positionen kann eine robuste Minimierung des Schalldrucks im Zielgebiet erreicht werden. Der Kompromiss zwischen den einzelnen Anregungen bei der Positionsoptimierung führt jedoch zu einer Absenkung des Potentials für die Einzelanregung. Die Einführung von Individuellen Mikrofonwichtungen kompensiert die negativen Auswirkungen des Kompromiss und führt zu akzeptablen Schalldruckreduktionen.

Literatur

- [1] D.C. Rennison; J.F. Wilby; E.G. Wilby, B.B.: Prediction of the Interior Noise Levels of High Speed Propeller-Driven Aircraft, *AIAA 6th Aeroacoustic Conference*, 1980
- [2] W. Svensson; P. Wiberg: Optimizing the placement of Microphones and Loudspeakers in an Aeroplane mounted Active Noise Control System using Stochastic Search Methods, *NOISE-CON 1998*
- [3] W. Emborg: Interior Noise Control of the Saab 340 Aircraft, *SAE The Engineering Society for advancing Mobility Land Sea Air and Space*, 1989, April, 11-13
- [4] A. Gündel et al: Absorbermodelle zur Berechnung von Flugzeuginnenlärm, *DAGA 2007*