Einfluss der Aktuatorplatzierung auf die resultierende Lautheit eines ASAC-Systems

Veatriki Papantoni[1], Michael Rose[2], Hans Peter Monner[3], Michael Sinapius[4]

[1] *Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 22335 Hamburg, Deutschland, Email: veatriki.papantoni@dlr.de*

[2] *Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig, Deutschland, Email: michael.rose@dlr.de*

[3] *Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig, Deutschland, Email: hans.monner@dlr.de*

[4] *Institut für Adaptronik und Funktionsintegration, 38106 Braunschweig, Deutschland, Email: michael.sinapius@dlr.de*

Einleitung

Aktive Lärmreduktionsmethoden bieten in verschiedenen Anwendungsgebieten, wie z.B. in der Luftfahrt, interessante Möglichkeiten, vor allem im Bereich niedriger Frequenzen, in dem passive Methoden mit einem Zuwachs an benötigtem Gewicht und Volumen verbunden sind. Der zunehmende Wunsch nach akustischem Komfort bzw. nach einer hohen Schallqualität gibt auch dem Forschungsgebiet der aktiven Lärmreduktion das Ziel vor, Systeme zu entwickeln, die es ermöglichen die vom Menschen wahrgenommenen Eigenschaften des Lärms gezielt zu beeinflussen. Die Motivation hierfür liegt auch in der Erkenntnis, dass schalldruckpegelbasierte Größen, nicht immer mit der z.B. von Flugzeugpassagieren wahrgenommenen Lästigkeit des Kabinenlärms korrelieren [1]. Somit wäre es wünschenswert über ein aktives Lärmreduktionssystem Einfluss auf psychaokustische Größen nehmen zu können, da diese für eine zuverlässige Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung von Schall geeignet sind.

Die hier vorgestellte Studie untersucht ein Konzept, um mittels einer aktiven Struktur-Akustik Regelung (active structural acoustic control - ASAC) gezielt Einfluss auf eine psychoakustische Größe zu nehmen. Zunächst werden die Ergebnisse einer Untersuchung vorgestellt, deren Ziel es war, die bei Flugzeuginnenlärm ausgeprägten psychoakustischen Größen zu bestimmen. Nachdem die Lautheit als solche bestimmt worden ist, wird ein Konzept vorgestellt, bei dem es über eine geeignete Wahl der Aktuatorpositionen in einem ASAC-System ermöglicht werden soll, die Lautheit im resultierenden Schallfeld zu reduzieren. Die zugrundeliegende Theorie zur Beschreibung von gekoppelten Systemen aus Struktur und Fluid wird kurz eingeführt. Anschließend wird das für die numerischen Untersuchungen verwendete Modell beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt.

Psychoakustische Analyse von Flugzeuginnenlärm

Um die psychoakustischen Eigenschaften von Flugzeuginnenlärm näher zu betrachten wurde eine Datenbank mit 43 Schallaufnahmen aus der Kabine verschiedener Passagierflugzeuge mit Strahltriebwerken im Reiseflug analysiert (Quelle: Lufthansa Technik AG). Diese Aufnahmen wurden hinsichtlich der psychoakustischen Größen Lautheit, Schärfe, Rauhigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität untersucht. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 1 in Form von Boxplots dargestellt. Man erkennt, dass die Schallaufnahmen hinsichtlich der Lautheit und der Schärfe eine breite Werteverteilung über dem Wertebereich der Metriken aufweisen. Im Gegensatz dazu sind die Werte der Rauhigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität sehr niedrig und in der Nähe der Null konzentriert. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass die dominanten psychoakustischen Größen für diese Art von Lärm die Lautheit und die Schärfe sind. Dieses Ergebnis stimmt auch mit den Untersuchungen von Angerer et al. [2] überein. Im Weiteren wird ein Konzept zur Senkung der psychoakustischen Lautheit mittels aktiver Struktur-Akustik Regelung (ASAC) untersucht.

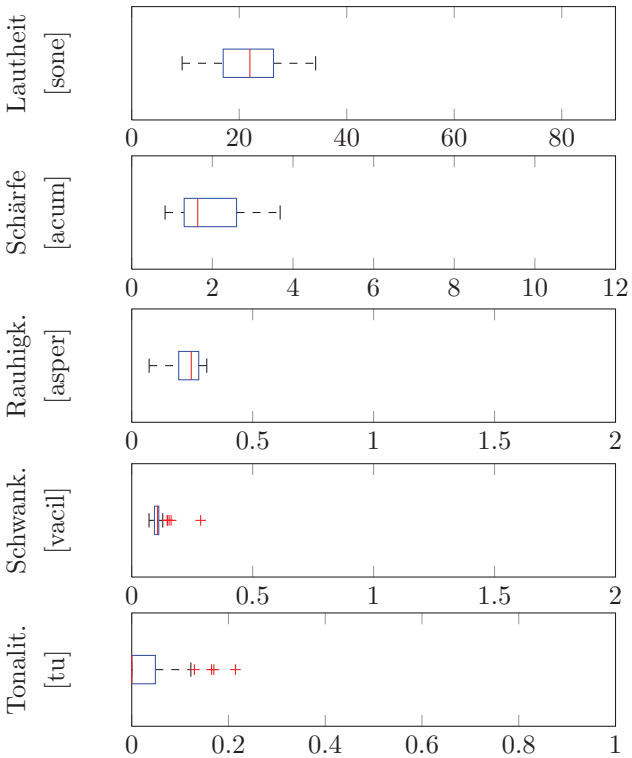

Abbildung 1: Boxplot mit der Werteverteilung der Schalldatenbank der Kabinenaufnahmen für die psychoakustischen Größen Lautheit, Schärfe, Rauhigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität.

ASAC mit optimierter Aktuatorplatzierung

Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wird ein Konzept untersucht, bei dem das Ziel eine Beeinflussung der psychoakustischen Lautheit über ein ASAC-System mit

einer zu diesem Zweck optimal gewählten Aktuatorplatzierung ist. Das Modell, welches für die Untersuchungen verwendet wird, besteht aus einer vibroakustisch angeregten ebenen Platte mit einer angrenzenden fluidgefüllten Rechteckkavität.

Zur Beschreibung der strukturdynamischen Antwort des gekoppelten Systems aus Struktur und Fluid wird die Theorie der modalen Interaktion gekoppelter Fluid-Struktur-Systeme verwendet [3]. Die zeitlich gemittelte akustische potentielle Energie E_p in der geschlossenen Kavität in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω kann über Gleichung (1) als Integral der absoluten Druckquadrate $|p|^2$ der im Inneren der Kavität liegenden Punkte mit Koordinaten $\mathbf{r} = (x, y, z)$ über das Volumen der Kavität V berechnet werden, wobei ρ die Dichte des Fluids und c die Schallgeschwindigkeit im Fluid darstellen.

$$E_p(\omega) = \frac{1}{4\rho c^2} \int_V |p(\mathbf{r}, \omega)|^2 \, \mathrm{d}V \tag{1}$$

Der Druck $p(\mathbf{r})$ an einem Punkt innerhalb einer geschlossenen Kavität mit schallharten Wänden, die keine Schallquellen beinhaltet, kann über das Kirchhoff-Helmholtz Integral aus Gleichung (2) beschrieben werden.

$$p(\mathbf{r}) = j\rho\omega \int_S G(\mathbf{r}_s|\mathbf{r}) v(\mathbf{r}_s) \, \mathrm{d}S \tag{2}$$

Hierbei ist j die imaginäre Einheit, $v(\mathbf{r}_s)$ die Geschwindigkeit an der mit dem Fluid interagierenden Strukturoberfläche $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$ und $G(\mathbf{r}_s|\mathbf{r})$ die Greensche Funktion zur Beschreibung der akustischen Moden in der Kavität. Die Frequenzabhängigkeit wurde hier aus Gründen der Einfachheit weggelassen.

Basierend auf den Gleichungen (1) und (2) erreicht man die resultierende Formulierung aus Gleichung (3) [4].

$$E_p = \mathbf{v}^H \Pi \mathbf{v} \tag{3}$$

Laut dieser kann die akustische potentielle Energie in der Kavität in quadratischer Abhängigkeit von den Geschwindigkeiten $\mathbf{v}$ gewichtet mit einer sog. Fehlergewichtungsmatrix Π ausgedrückt werden. Letztere beschreibt den Zusammenhang zwischen den strukturellen und akustischen Moden des gekoppelten Systems.

Diese Beschreibung des akustischen Feldes in der Kavität in Abhängigkeit von der Schwingung der Struktur ermöglicht die Regelung der akustischen potentiellen Energie mittels eines ASAC-Systems, welches über strukturelle Aktuatoren in die strukturdynamische Antwort der angeregten Struktur eingreift. Mit Hilfe einer am DLR entwickelten Prozesskette [5] ist es möglich, für eine gegebene Struktur eine Abschätzung der Leistung eines ASAC-Systems zu machen und die Positionen der strukturellen Aktuatoren des Systems in Bezug auf eine gewählte Fitness-Funktion optimal zu wählen. Diese Optimierung erfolgt über einen evolutionären Algorithmus.

Das Ziel einer solchen Optimierung der Aktuatorplatzierung ist üblicherweise eine Minimierung der akustischen potentiellen Energie in der Kavität. Im Rahmen dieser Studie wird untersucht, inwiefern die Wahl einer minimalen psychoakustischen Lautheit als Zielfunktion des evolutionären Algorithmus es ermöglicht die Lautheit in der Kavität zu reduzieren.

Durch Angabe der benötigten Daten zu Struktur, Fluid und vibroakustischer Anregung, ist die Prozesskette in der Lage die durch die Anregung auf die Struktur ausgeübten Kräfte zu berechnen. Nach einer entkoppelten Modalanalyse für Struktur und Fluid in der Kavität werden die Kopplungsfaktoren nach dem Modell der modalen Fluid-Struktur Interaktion berechnet. Für eine erste Aktuatorpositionierung wird die Reduktion der akustischen potentiellen Energie in der Kavität mittels eines Optimalreglers berechnet. Über einen genetischen Algorithmus wird die Aktuatorpositionierung optimiert bis ein definiertes Ziel, z.B. minimale mittlere Lautheit in der Kavität, erreicht ist.

Aufgrund der Vernachlässigung von Signallaufzeiten, die bei einer Echtzeitimplementierung eines solchen Systems berücksichtigt werden müssten, liefert die Prozesskette eine optimistische Schätzung der Performance des ASAC-Systems. Dennoch wird das Tool verwendet, um eine grundlegende Untersuchung des hier eingeführten Konzeptes durchzuführen.

Numerische Analyse

Für die numerischen Untersuchungen mit der Prozesskette wird eine 3 mm dicke Platte aus Aluminium mit Dimensionen $0,81$ m $\times$ $0,61$ m und Dichte 2700 kg/m^3 verwendet. Die Tiefe der Kavität beträgt $0,405$ m. Die Schallgeschwindigkeit in der luftgefüllten Kavität wird als 343 m/s und die Dichte als $1,204$ kg/m^3 angenommen. Für die entkoppelte Modalanalyse in ANSYS® wird die Platte mit 1200 Elementen des Typs *shell181* (s. Abbildung 2) und das Fluid mit 24000 Elementen des Typs *fluid30* modelliert. Die Wände der rechteckigen Kavität werden als schallharte Oberflächen modelliert.

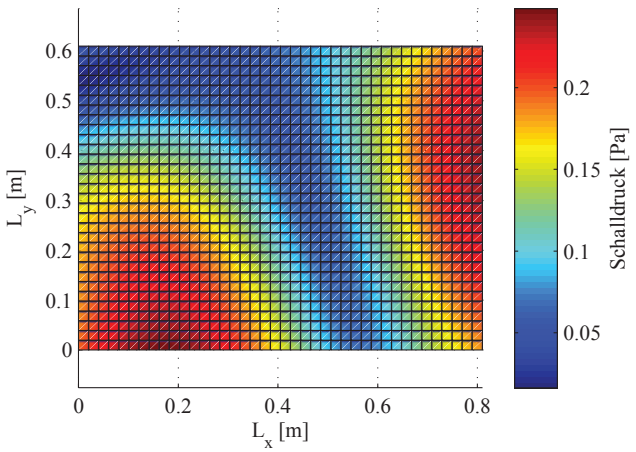

Abbildung 2: Druck an der Platte durch die diffuse Schallfeldanregung bei einer diskreten Frequenz von 300 Hz.

Als Anregung wird ein breitbandiges diffuses Schallfeld, bandbegrenzt bis 1000 Hz, verwendet. Der auf die Platte

ausgeübte Schalldruck ist exemplarisch für eine diskrete Frequenz von 300 Hz in Abbildung 2 dargestellt.

Für das ASAC-System werden 3 Punktkräfte als Aktuatoren simuliert. Es wird ein dichtes Sensornetz mit Sensoren an den Knoten der Schalenelemente der Platte verwendet. Die Berechnung der Lautheit erfolgt über die Druckwerte an 585 homogen verteilten Punkten innerhalb der Kavität.

Die Ergebnisse hinsichtlich der akustischen potentiellen Energie für den Fall, dass keine Regelung stattfindet, und für drei verschiedene Fälle, in denen ein ASAC-System die Energie in der Kavität minimieren soll, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die drei verschiedenen Fälle beziehen sich auf das Ziel, welches durch die Wahl der Aktuatorplatzierung erreicht werden soll: (a) eine Minimierung der akustischen potentiellen Energie in der Kavität, (b) eine Minimierung der Lautheit an einem Punkt im Zentrum der Kavität, (c) eine Minimierung der Lautheit gemittelt über das Innere der Kavität. Man erkennt leicht unterschiedliche Frequenzverläufe für die drei verschiedenen Kriterien zur Aktuatorplatzierung. In allen drei Fällen ist jedoch eine deutliche Reduktion der Energie, inbesondere im Bereich der Resonanzen, im Vergleich zu dem Fall ohne Regelung zu erkennen.

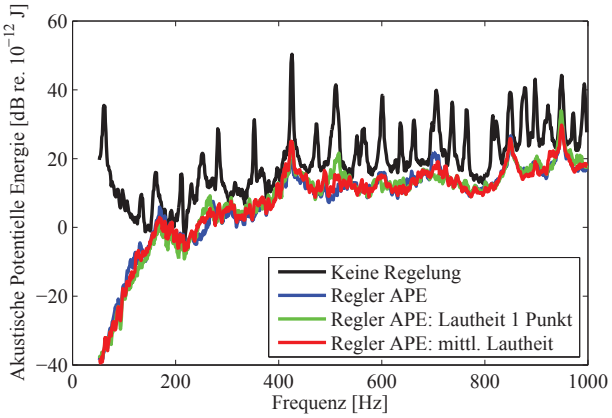

Abbildung 3: Akustische potentielle Energie (APE) in der Kavität für verschiedene Aktuatorplatzierungskriterien.

Die entsprechenden Ergebnisse hinsichtlich der psychoakustischen Lautheit sind in Tabelle 1 aufgelistet. Man sieht, dass im Fall, in dem die Aktuatoren mit dem Ziel einer Minimierung der Lautheit im Zentrum der Kavität gewählt wurde, die Lautheit an diesem Punkt niedriger im Vergleich zu den anderen zwei Fällen mit ASAC ist. Die mittlere Lautheit ist jedoch erhöht. Für den Fall, in dem die Aktuatoren mit dem Ziel einer Minimierung der mittleren Lautheit gewählt wurde, ist die mittelere Lautheit in der Kavität niedriger im Vergleich zu den anderen zwei Fällen mit ASAC.

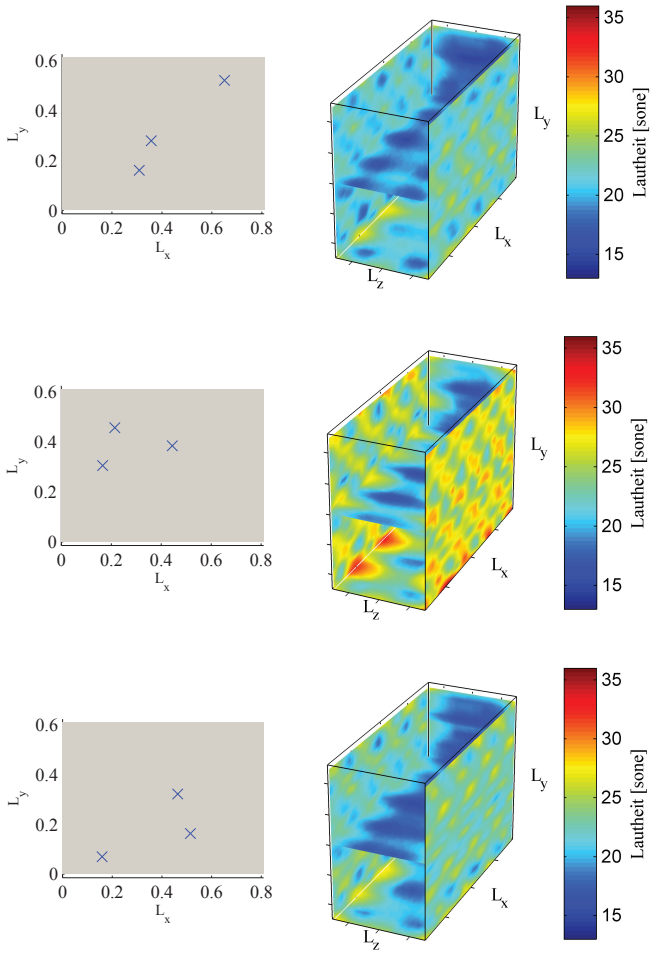

Abbildung 4: Positionen der 3 Aktuatoren auf der Platte (links) und resultierende Lautheit in der Kavität (rechts) für 3 Optimierungsfälle der Aktuatorpositionierung: minimale akustische potentielle Energie (oben), minimale Lautheit im Zentrum der Kavität (Mitte) und minimale mittlere Lautheit innerhalb der Kavität (unten).

Eine Darstellung der gewählten Aktuatorpositionen und eine Visualisierung der entsprechend resultierenden Lautheit in der Kavität für die drei verschiedenen Fälle aus Abbildung 3 und Tabelle 1 ist in Abbildung 4 gegeben.

Tabelle 1: Lautheit in der Kavität ohne ASAC und mit ASAC für die 3 verschiedene Kriterien der Aktuatorplatzierung.

Optimierungsziel	Lautheit [sone]	
	im Zentrum	gemittelt
Keine Regelung	67,1	72,8
Min. akust. potent. Energie	18,6	19,0
Min. Lautheit im Zentrum	15,0	21,5
Min. mittlere Lautheit	15,4	17,8

Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Studie zeigt, dass es möglich ist über die Wahl der Aktuatorpositionen in einem ASAC-System die psychaokustische Lautheit zu beeinflussen. Anschließende Arbeiten sollen dieses Konzept für einen real zu implementierenden Regler untersuchen und es experimentell verifizieren.

Literatur

[1] Pennig S., Quehl J.: Wirkung von Flugzeuginnenlärm auf den Passagierkomfort, Technischer Bericht, DLR, 2010

[2] Angerer J.R., McCurdy D.A., Erickson R.A.: Development of an annoyance model based upon elementary auditory sensations for steady-state aircraft interior noise containing tonal components, NASA-TM-104147, 1991

[3] Fahy F., Gardonio P.: Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response. Academic Press, 2007

[4] Johnson W.M., Cunefare K.A.: Use of principle velocity patterns in the analysis of structural acoustic optimization. J Acoust Soc Am. 2007;121(2):938–948

[5] Rose M., Unruh O., Haase T.: Vibration Control of Stiffened Plates with Embedded Cavities Using Flat Piezoceramic Actuator Devices. Proc. 18th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 18), 10-14 July 2011, Rio de Janeiro, Brazil, 2011