

## LÄRMREDUKTION IN FLUGZEUGEN MIT AKTIVEN LININGS

**Zusammenfassung:** Das DLR erforscht im Verbund mit dem Industriepartner Diehl Aircabin die Möglichkeiten zur Lärmreduktion in Flugzeugen mit Hilfe von aktiven Seitenwandverkleidungsteilen (Linings). Neuartige Antriebe in Kombination mit leichten und hochsteifen Rumpfstrukturen können die Transmission insbesondere von niederfrequentem Schall in die Kabine begünstigen. Linings stellen als große schallabstrahlende Flächen einen wichtigen Transmissionspfad dar. Es wird daher versucht, die Schallabstrahlung von Linings durch adaptronische Maßnahmen zu beeinflussen und die in die Kabine eingetragene Schalleistung zu reduzieren. Dieser Beitrag soll einen Einblick in die Erforschung aktiver Linings am DLR geben und auf wichtige Ergebnisse eingehen. Zur Durchführung von Experimenten wurde eine Rumpfstuktur aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) gefertigt und in die Prüföffnung eines Transmissionsprüfstands eingebaut. An dieser Rumpfstuktur ist das Lining gelagert. Das System wird seitens der Rumpfstuktur mit einem Lautsprecherfeld akustisch angeregt. Die Realitätsnähe des Versuchsaufbaus erlaubt belastbare Aussagen über die Wirksamkeit passiver und aktiver Akustikmaßnahmen. Die Messergebnisse zeigen, dass mit nur wenig Aktuatorik erhebliche Reduktionen der abgestrahlten Schalleistung und der Schalldruckpegel im Passagierbereich vor dem Lining zu erreichen sind. Durch Zusatzfunktionen wie Passenger Announcement (PA) könnten klassische Lautsprechersysteme ersetzt und Masse eingespart werden.

**Schlüsselwörter:** Aktive Lärmreduktion, Flugzeug, Lining, Adaptronik

### 1. EINLEITUNG

Aufgrund der erhöhten Lärmbelastigung in Propellerflugzeugen wurden bis zum heutigen Zeitpunkt verstärkt Untersuchungen mit aktiven Systemen zur Lärmreduktion auf diesem Gebiet unternommen und, wie in Monaco et al. [1] dargestellt, kann dort eine durchschnittliche Lärmreduktion von 10 dB bis 20 dB erreicht werden. Der Einsatz von flächigen Piezoaktuatoren wurde in Grewal et al. [2] anhand des Turboprop-Regionalflugzeugs deHavilland Dash-8 experimentell untersucht und im Mittel eine Senkung des Schalldruckpegels um ebenfalls 10 dB erzielt.

Im Unterschied zum multitonalen Rotorlärm erzeugen die turbulente Grenzschicht (TBL) und die Strahltriebwerke (Jet/Shock Noise) breitbandige Störgeräusche in der Flugzeugkabine. Aufgrund der Breitbandigkeit und der, im Falle der TBL, äußerst schwach ausgeprägten räumlichen Korrelation, stellen diese Störquellen besonders hohe Anforderungen an ein aktives Lärmreduktionssystem. Wie in Schiller [3] (S. 118) anhand von Flugmessdaten aus dem Boeing QTD1 dokumentiert, treten die höchsten Störpegel dieser beiden Anregungsarten allerdings unterhalb von 500 Hz auf, was die Dämpfung mit passiven Methoden erschwert und den Einsatz aktiver Maßnahmen motiviert. Gibbs et al. [4] haben die Wirkung aktiver Maßnahmen zur Lärmreduktion bei TBL-Anregung beschrieben und stellen eine Reduktion des Schalldruckpegels von 5 dB bis 10 dB, integriert über den Frequenzbereich von 150 Hz bis 800 Hz, dar.

In Bezug auf aktive Doppelschalenstrukturen (z. B. eine Rumpfschale mit angekoppeltem Lining) sind in den Publikationen [5, 6, 7] allgemeine Untersuchungen zur Schalltransmission

durch Doppelschalenstrukturen und Möglichkeiten der aktiven Beeinflussung dokumentiert. Wang und Vaicaitis [8] haben den Einsatz von piezokeramischen Flächenaktuatoren zur aktiven Lärmreduktion in Doppelschalenstrukturen theoretisch analysiert und dokumentieren Lärmreduktionen im Rahmen einer Parameterstudie von durchschnittlich 10 dB. In Carneal und Fuller [9] wurden analytische und experimentelle Untersuchungen zur aktiven, struktur-basierten Reduktion der Schalltransmission durch eine doppelwandige Struktur mit Hilfe von Piezoaktuatoren und einer adaptiven Steuerung durchgeführt. Allerdings beschränken sich die Autoren auf die Reduktion von tonalem Schall. Die Publikationen von Hirsch et al. [10, 11] dokumentieren die theoretische und experimentelle Untersuchung einer Methode zur aktiven Innenlärmreduktion auf Basis von segmentierten Verkleidungselementen. Als vorteilhaft an der Segmentierung wird die gleichzeitige Möglichkeit zur Anwendung von Gegenschall (ANC) und aktiver Vibrations- bzw. Struktur-Akustik-Regelung angesehen. Untersuchungen zur Reduktion von stochastischem Breitbandlärm mit Hilfe einer aktiv gesteuerten Doppelschale sind in den Publikationen von Misol et al. [12, 13] und Misol [14] dokumentiert.

Das Konzept des Smart Linings zur aktiven Reduktion von Innenlärm mit Hilfe von aktiven Seitenwandmodulen wurde zum Patent angemeldet [15].

Die nachfolgend beschriebene Untersuchung des Smart Linings geht über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik hinaus. Nennenswert sind in diesem Zusammenhang die strukturelle Komplexität des zu untersuchenden Linings (Serienbauteil für den Airbus A350), der doppelschalige Aufbau mit einer kohlenstofffaserverstärkten Rumpfstruktur mit zwei Fenstern, welcher eine realitätsnahe Kopplung des Linings erlaubt. Ferner bietet die Beschallung der Rumpfstruktur mit einem Lautsprecherfeld im Vergleich zum üblicherweise verwendeten Diffusfeld die Möglichkeit einer luftfahrtrelevanteren Störanregung.

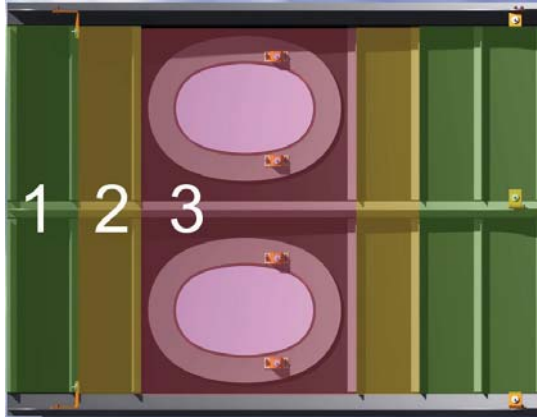
## 2. LABORVERSUCH IM TRANSMISSIONSPRÜFSTAND

Der Laborversuch findet im Transmissionsprüfstand des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptionik in Braunschweig statt. Zunächst wird ein Prüfkörper definiert, dieser wird gefertigt und in die Prüföffnung des Transmissionsprüfstands eingebaut. Anschließend werden aktive Systeme zur Schallreduktion getestet.

### 2.1. PRÜFKÖRPER

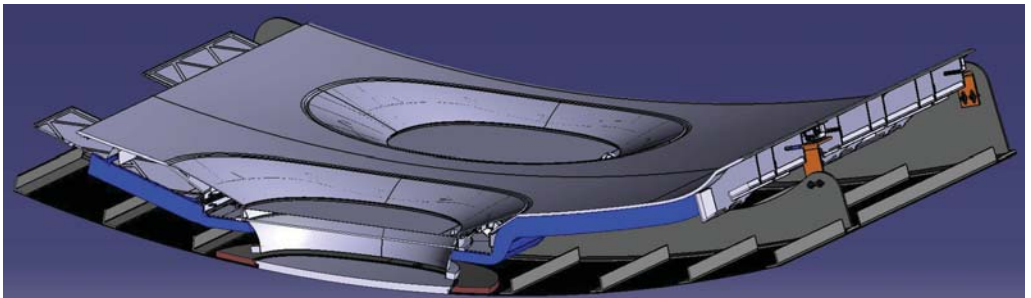
Die Definition der Primärstruktur erfolgt in Abstimmung mit den Industriepartnern DIEHL Aircabin und Airbus. Ziel ist es, eine Rumpfstruktur abzuleiten, welche die vibroakustischen Eigenschaften und Transmissionspfade eines Airbus-A350-Rumpfsegments approximiert. Die CFK-Rumpfschale hat die Dimension:  $1690 \times 1300 \text{ mm}^2$  (Spant- x Stringerrichtung) und einen Radius von 2980 mm. Die Haut ist aus CFK UD (Unidirektional) Tapes als Gelege aufgebaut mit unterschiedlichen Dicken in den Bereichen 1, 2 und 3 (siehe Abb. 1). Die Haut ist in den Bereichen 1 am dünnsten und im Bereich 3 am dicksten. Die Rumpfschale besitzt zwei Fenster

mit Scheiben aus 15mm dickem Acrylglas und zwei Fensterrahmen aus 12mm dickem Aluminium. Die Fensterrahmen sind mit der CFK-Haut verklebt. Die Stringer und Spanten werden vereinfacht in L- bzw. T-Geometrie aus Aluminium ausgeführt. Der Stringerabstand beträgt 200 mm und der Spantabstand beträgt 635 mm. Die Montage des Linings an die Rumpfstruktur erfolgt an 9 Positionen im Spant- und Fensterbereich (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Draufsicht der CFK-Rumpfstruktur mit den farblich gekennzeichneten Bereichen 1, 2 und 3 unterschiedlicher Hautdicke und den Lagerungspunkten für das Lining (orange) an den Spanten und auf den Fensterrahmen.

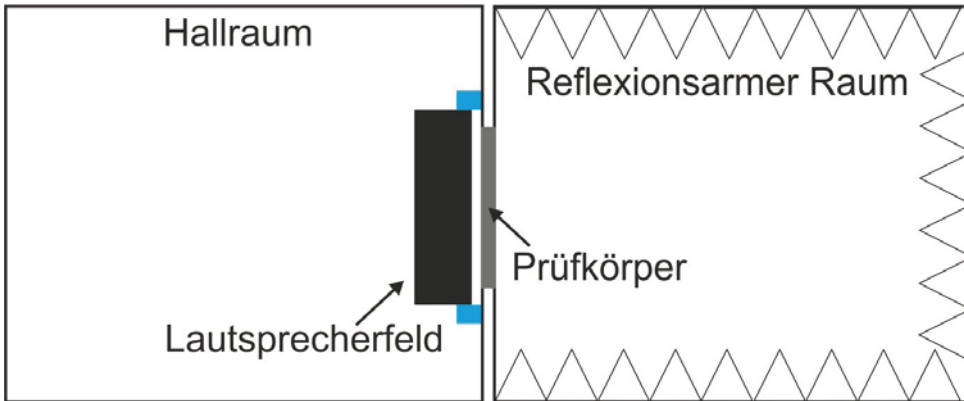
Die Sekundärstruktur ist ein Airbus-A350-Lining aus der Serienfertigung des Industriepartners DIEHL Aircabin. Es ist ausgestattet mit 9 strukturellen Halterungen für die Montage (an den primärseitigen Lagerungspunkten, siehe Abb. 1) und mit einer sekundärseitigen thermo-akustischen Isolierung. Vor der Montage des Linings an die Rumpfstruktur wird eine primärseitige thermoakustische Isolierung angebracht. Abbildung 2 zeigt eine Schnittdarstellung des gekoppelten Systems ohne Primärisolierung.



**Abbildung 2:** Schnittdarstellung der Rumpfstruktur mit angekoppeltem Lining (ohne Primärisolierung).

## 2.2. VERSUCHSAUFBAU

Die Experimente werden in einem akustischen Transmissionsprüfstand durchgeführt. Dieser besteht, wie in Abb. 3 gezeigt, aus einem Hall- und einem reflexionsarmen Raum. Die Räume sind ausschließlich über die Prüföffnung und den darin montierten Prüfkörper miteinander verbunden.



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im Transmissionsprüfstand.

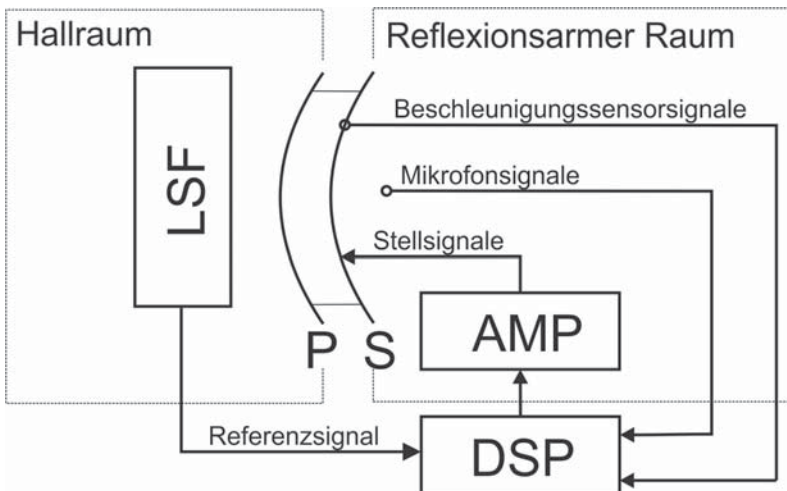
Die Störانregung des Prüfkörpers erfolgt mittels eines Lautsprecherfeldes, welches vor der Rumpfschale positioniert wird. Um die Einflüsse des Nachhalls zu reduzieren, werden die Öffnungen zwischen Rumpfschale und Lautsprecherfeld mit Akustikschaum abgedichtet (blaue Rechtecke in Abb. 3, nicht zu sehen in Abb. 4). Das Lautsprecherfeld hat 112 unabhängig ansteuerbare Lautsprecher, welche in 14 Zeilen zu je acht Lautsprechern angeordnet sind. Wie in Abb. 4 (mi.) zu sehen, werden nur die untersten neun Zeilen für die Beschallung verwendet. Aufgrund der Einbausituation werden die Randbereiche der Rumpfschale nicht vom Lautsprecherfeld überdeckt (vgl. Abb. 4 li.). Zur Beschallung der Rumpfschale werden multitonale oder bandbegrenzte weiße Rauschsignale an die Lautsprecher gesendet. Jeder Lautsprecher wird mit demselben Signal angesteuert. Das Lining ist an der Rumpfschale montiert und die Öffnungen werden mit Akustikschaum abgedichtet. Die reale Einbausituation im Flugzeug verhindert eine Leckage des Schalls nach unten und oben durch die Anbindung an den Fußboden bzw. die Hatracks und seitlich durch die Verbindung der Linings untereinander. Die Schallabstrahlung des Linings erfolgt in einen reflexionsarmen Raum, welcher hier vereinfachend die Flugzeugkabine repräsentiert.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau im Transmissionsprüfstand mit dem Lautsprecherfeld vor der Rumpfschale aus Sicht des Hallraums (li. und mi.) und dem an die Rumpfschale gekoppeltem Lining aus Sicht des reflexionsarmen Raums (re.).

### 2.3. AKTIVES SYSTEM

Das aktive System des Smart Linings besteht aus Sensoren, Aktuatoren, einem digitalen Signalverarbeitungssystem (DSP-System) mit Tiefpassfiltern an den Ein- und Ausgängen sowie Leistungsverstärkern (AMP). Als Sensoren werden Beschleunigungssensoren (PCB 352A24) und Mikrofone (PCB 130E21) eingesetzt. Die Signale werden von einem Echtzeitsystem (dSPACE DS1006) mit vor- und nachgelagerten Tiefpassfiltern (Kemo 255G) verarbeitet. Als Aktuatoren werden Inertialerreger (Visaton EX45 S) verwendet, welche auf die Dekorfolie des Linings geklebt sind. Auf eine Montage der Aktuatoren auf der Rückseite des Linings wird aus praktischen Gründen zunächst verzichtet. Auf dem Echtzeitsystem (DSP) läuft ein Steuerungsalgorithmus mit festen oder adaptiven Filtergewichten. Die Steuerungen verwenden ein skalares Referenzsignal vom Lautsprecherfeld (LSF).



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des aktiven Systems des Smart Linings (S).

Je nach Störquellencharakteristik ist die Annahme eines skalaren und kausal unbeschränkten Referenzsignals berechtigt oder unberechtigt. Bei einer multitonalen akustischen Störanregung mit der Blattfolgefrequenz eines Rotors und dessen Harmonischen, ist die Annahme berechtigt. Bei einer komplexen Breitbandstörung durch eine turbulente Grenzschicht ist die Annahme zu optimistisch und die im Labor erzielten Ergebnisse sind in der Realität nicht erreichbar. Die Synthese von Referenzsignalen aus den Schwingungen der Rumpfschale ist in einem solchen Fall zwar theoretisch möglich, birgt jedoch erhebliche Schwierigkeiten im Hinblick auf die Einhaltung der Kausalität, die Systemkomplexität (vektorielle Referenzen) und die Stabilität (Aktuator-Rückkopplung). Die Zielgröße für die Offline-Berechnung bzw. Online-Adaption der Filterkoeffizienten (Finite Impulse Response) ist die Minimierung der aktiven Schallleistung bzw. die Minimierung des mittleren Schalldruckpegels vor dem Lining. Im ersten Fall der Schallleistungsminimierung wird die Aktuatorik und Sensorik so platziert, dass sich für den gegebenen Lastfall eine Reduktion der aktiven Schallleistung ergibt. Die Methodik zur Optimierung der Aktuator- und Sensorpositionen wird in Kapitel 3.1 genauer beschrieben. Im zweiten Fall der Schallpegelminimierung im Passagierbereich vor dem Lining werden Mikrofonsignale verwendet, um die Filtergewichte der adaptiven Steuerung im Echtzeitbetrieb zu berechnen (Filtered-x-Least-Mean-Squares-Algorithmus im Zeitbereich). Dazu wird ein dynamisches Modell der Sekundärstrecke von den Aktuatoren auf die Mikrofone benötigt. Mit Hilfe der Subspace-Methode [16] wird ein zeitdiskretes Zustandsraummodell berechnet, welches die Sekundärstreckendynamik sehr genau abbildet. Es wird angestrebt, die Mikrofonsignale durch eine geeignete Filterung von Körperschallsensorsignalen zu substituieren (z. B. Remote Microphone Technique [17]), um das Smart Lining unabhängig von externen Komponenten zu machen.

### 3. ERGEBNISSE

Nachfolgend soll auf ausgewählte Ergebnisse der Optimierung der Aktuatorik und Sensorik und der Schallreduktion des Smart Linings eingegangen werden.

#### 3.1. OPTIMIERUNG

Es wird eine gleichzeitige Positionsoptimierung von Sensoren und Aktuatoren durchgeführt. Ziel der Positionsoptimierung ist die Reduktion der abgestrahlten Schallleistung des Smart Linings mit Hilfe eines konventionellen aktiven Vibrationsreduktionssystems (AVC), wie in [18] und [19] bereits für eine reine Sensoroptimierung beschrieben. Konventionell deshalb, weil eine simple Reduktion der Fehlersignale eines Steuerungssystems als Regelungsgesetz verwendet werden und keine nachgeschaltete Berechnung der Schallleistung erfolgen sollte, wie z.B. bei struktur-akustischen Systemen (ASAC) [20].

Das Ziel der Schallreduktion mittels eines AVC Systems wird durch die Verwendung der am DLR entwickelten Prozesskette erreicht. Die Prozesskette verknüpft eine genetische Optimierung

mit einem kausalen Steuerungsgesetz, welches im Zeitbereich nach Referenz [21] implementiert ist. Innerhalb der Prozesskette wird ein optimales Filter entworfen, welches die Fehlersignale der verwendeten Beschleunigungssensoren minimiert. Die Zielfunktion der genetischen Optimierung ist dagegen die erreichte Schallleistungsreduktion der verwendeten Aktuator- und Sensorplatzierung. Einen schematischen Überblick über die Prozesskette gibt Abb. 6.

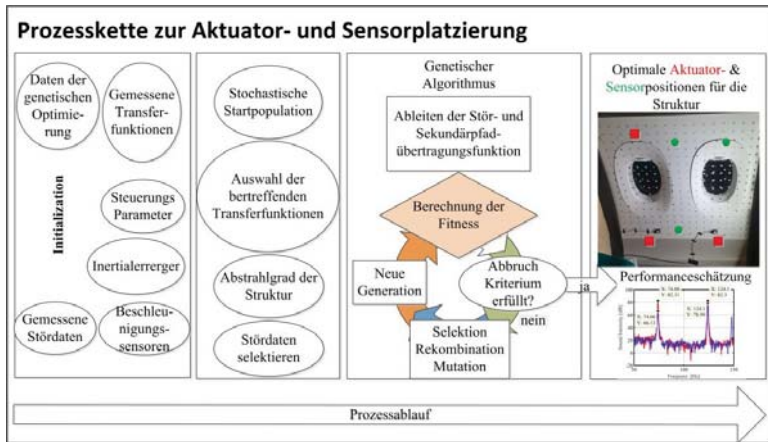


Abbildung 6: Prozesskette zur Aktuator- und Sensorplatzierung

Grundlage der Aktuator- und Sensoroptimierung ist ein gemessenes Strukturmodell, welches alle Übertragungsfunktionen von 39 möglichen Aktuatorpositionen auf 378 mögliche Sensorpositionen beinhaltet. Zusätzlich erfolgt eine Messung der durch das LSF hervorgerufenen Störsignale an den 378 Sensorpositionen mit Hilfe eines Laser Scanning Vibrometers. Innerhalb der Prozesskette wird durch die genetische Optimierung eine Anzahl von Aktuatoren und Sensoren ausgewählt, wobei die Anzahl der gewählten Aktuatoren und Sensoren sehr viel kleiner ist als 39 bzw. 378. Nach Berechnung der AVC Steuerung werden die berechneten Aktuator-signale verwendet, um die resultierende Strukturschwingung aus Störung und eingeleiteter Sekundärschwingung am globalen Modell zu berechnen. Anschließend wird die berechnete Schnelleverteilung auf dem Smart Lining mit Hilfe der Schallstrahlungsresistanzmatrix in eine abgestrahlte Schallleistung umgerechnet [22].

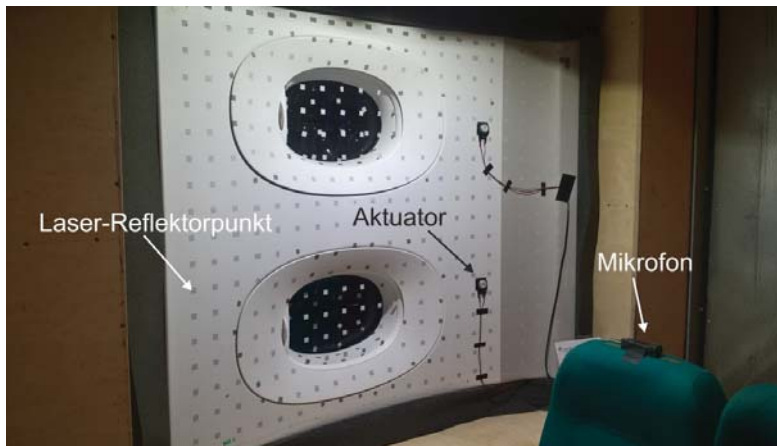
Mit Hilfe der hier vorgestellten Prozesskette kann eine Potenzialabschätzung vorgenommen werden, wieviel Schallleistung an den gewählten tonalen Störgeräuschen reduziert werden kann. Tabelle 1 zeigt zwei berechnete Konfigurationen und die erzielbare Störgrößenreduktion. Im Hinblick auf eine spätere Realisierung, ist eine möglichst kleine Anzahl von Aktuatoren und Sensoren anzustreben.

Aktuatoren	Sensoren	Reduktion 74 Hz	Reduktion 124 Hz	Max. Stellgröße
2	2	8,9 dB	3,3 dB	4 V
3	3	7,4 dB	8,2 dB	4V

Tabelle 1: Reduktion der abgestrahlten Schallleistung

### 3.2. MESSUNGEN

Für die Implementierung einer adaptiven Steuerung zur Schallpegelminderung im Passagierbereich vor dem Lining werden zwei Aktuatoren und drei Mikrofone (eins pro Sitz bei einer Dreiersitzreihe) als Fehlersensoren verwendet. Die Konfiguration ist in Abb. 7 zu sehen. Für diesen Fall wurde keine Positionsoptimierung der Aktuatoren und Sensoren durchgeführt.

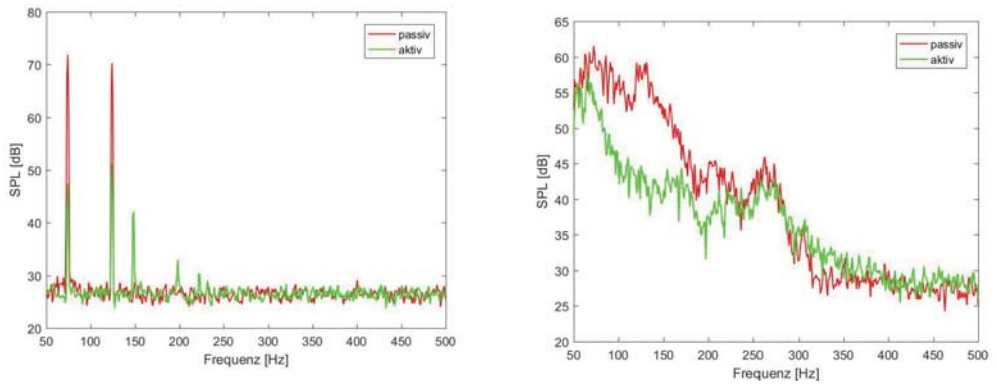


**Abbildung 7:** Versuchsaufbau für die adaptive Steuerung zur Schallpegelminderung.

Die Ergebnisse der adaptiven Steuerung sind in Abb. 8 zu sehen. Bei einer multitonalen Störangregung durch das LSF mit zwei Frequenzen konnte der mittlere Schalldruckpegel bei 74 Hz um 25 dB und bei 124 Hz um 19 dB reduziert werden. Sowohl die Frequenzen als auch die Störpegel wurden willkürlich gewählt und müssten daher auf den realen Lastfall bspw. einer Rotoranregung angepasst werden. Die Wahl der Frequenzen stellt keine Einschränkung dar, solange diese tieffrequent sind und eine lokale Schallpegelreduktion mit einer globalen Reduktion der abgestrahlten Schallleistung einhergeht. Die Skalierbarkeit der Störpegel hängt von der Leistungsfähigkeit der Aktuatorik ab. Diese könnte bei Bedarf durch leistungsfähigere Komponenten mit entsprechend höherer Masse ersetzt werden.

Bei einer breitbandigen Störangregung durch das LSF mit bandbegrenztem, weißem Rauschen lässt sich eine signifikante Pegelreduktion nur bei Verwendung des vom LSF kommenden Referenzsignals erzielen. Das Ergebnis ist in Abb. 8 (re.) zu sehen. Bei Verwendung eines realitätsnäheren Referenzsignals, bspw. von einem auf der Rumpfschale platzierten Beschleunigungssensor, ist eine signifikante Pegelreduktion ( $> 6$  dB) aufgrund der Kausalitätsbedingung nicht realisierbar. Zudem käme bei einer realistischen Grenzschichtanregung eine wesentlich komplexere Störquellencharakteristik zum Tragen, welche die Verwendung mehrerer Referenzsensoren erfordern würde. Die dadurch entstehende Systemkomplexität des Smart Linings wird aus heutiger Sicht als nicht realisierbar angesehen (im Hinblick auf eine industrielle Verwertung). Damit verbleibt das Smart Lining mit multitonaler Störpegelreduktion und ggf. Zusatzfunktionen wie Passenger Announcement (PA), In-Flight-Entertainment (IFE), Komfortschall, etc. als einzig sinnvoller Business-Case.





**Abbildung 8:** Mittlere Schallpegelreduktion vor dem Lining bei multitonaler (li.) und bei breitbandiger (re.) akustischer Anregung der Rumpfschale durch das Lautsprecherfeld.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag behandelt die Lärmreduktion in Flugzeugen mit aktiven Linings. Ein Laborversuch mit einer CFK-Rumpfstruktur und einem angekoppelten Airbus-A350-Lining wird im Transmissionsprüfstand aufgebaut. Die Beschallung der Rumpfschale erfolgt durch ein Lautsprecherfeld. Es werden optimierte Aktuator und Sensorpositionen für das Smart Lining abgeleitet und verschiedene Steuerungen getestet. Bei multitonaler, tieffrequenter Störanregung werden hohe Schallpegelreduktionen ( $> 20$  dB) im Passagierbereich erzielt. Die aktive Reduktion von Breitbandschall ist nur eingeschränkt möglich und stellt gegenwärtig keinen Business-Case dar.

## DANKSAGUNG

Die hier beschriebenen Forschungsarbeiten erfolgten im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Luftfahrtforschungsprojekts SYLVIA (FKZ 20K1301D). Die Arbeiten wurden in Abstimmung mit dem Industriepartner DIEHL Aircabin durchgeführt. Das Lining ist ein Serienbauteil aus der Fertigung von DIEHL Aircabin. Es wurde dem DLR für die Versuche kostenfrei zur Verfügung gestellt.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. Monaco, F. Franco, and C. Illibato, “A structural-acoustic coupled model for designing an asac on a regional jet fuselage,” in Proc. of Active 2004 Conference–Williamsburg, Virginia, Sep. 2004.
- [2] A. Grewal, D. G. Zimcik, L. Hurtubise, and B. Leigh, “Active cabin noise and vibration control for turboprop aircraft using multiple piezoelectric actuators,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 11, no. 6, pp. 438–447, Jun. 2000.
- [3] N. Schiller, “Decentralized control of sound radiation from periodically stiffened panels,” Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [4] G. Gibbs, K. Eure, and J. Loyd, “Active control of turbulent-boundary-layer-induced sound radiation from aircraft style panels,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, p. 2823, 2000.
- [5] P. De Fonseca, P. Sas, H. Van Brussel, and K. Henrioulle, “Active reduction of sound transmission through double panel partitions—a physical analysis of the observed phenomena,” vol. 1, pp. 21–28, 2001.
- [6] P. De Fonseca, P. Sas, and H. Van Brussel, “Experimental study of the active sound transmission reduction through a double panel test section,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 85, no. 4, pp. 538–546, 1999.
- [7] N. Alujevic, K. D. Frampton, and P. Gardonio, “Smart double panel with decentralised active dampers for control of sound transmission,” 2007.
- [8] C. Y. Wang and R. Vaicaitis, “Active control of vibrations and noise of double wall cylindrical shells,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 216, no. 5, pp. 865–888, Oct. 1998.
- [9] J. P. Carneal and C. R. Fuller, “An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, no. 3-5, pp. 749–771, May 2004.
- [10] S. M. Hirsch, N. E. Meyer, M. A. Westervelt, P. King, F. J. LI, M. V. Petrova, and J. Q. Sun, “Experimental study of smart segmented trim panels for aircraft interior noise control,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231, no. 4, pp. 1023–1037, Apr. 2000.
- [11] S. M. Hirsch, J. Q. Sun, and M. R. Jolly, “An analytical study of interior noise control using segmented panels,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231, no. 4, pp. 1007–1021, Apr. 2000.

- [12] M. Misol, T. Haase, H. P. Monner, and M. Sinapius, "Causal feedforward control of a stochastically excited fuselage structure with active sidewall panel," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, no. 4, pp. 1610–1618, 2014.
- [13] M. Misol, C. Bloch, H. P. Monner, and M. Sinapius, "Performance of active feedforward control systems in non-ideal, synthesized diffuse sound fields," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 4, pp. 1887–1897, 2014.
- [14] M. Misol, "Aktive steuerung des transmissionsverhaltens stochastischer störquellen durch flächige leichtbaustrukturen [active feedforward control of the transmission of stochastic disturbances through lightweight panel structures]," DLR-Forschungsbericht 2014–38, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Köln, Deutschland, 2014.
- [15] S. Algermissen, T. Haase, M. Misol, M. Pohl, M. Rose, and O. Unruh, "Schalldämmungssystem," Deutschland Patent DE 10 2013 102 612 A1, 2014, g10K 11/175.
- [16] T. Katayama, *Subspace Methods for System Identification*, ser. Communications and Control Engineering. London: Springer, 2005.
- [17] A. Roure and A. Albarrazin, "The remote microphone technique for active noise control," in *PROCEEDINGS OF ACTIVE 99: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ACTIVE CONTROL OF SOUND AND VIBRATION, VOLS 1 & 2*, S. Douglas, Ed., 1999, pp. 1233–1244.
- [18] T. Haase, C. Schubert, and H. P. Monner, "Active vibration control systems with improved sound radiation properties," in *ICAST 2014*, Oktober 2014.
- [19] T. Haase and O. Unruh, "Active control of counter-rotating open rotor interior noise in a dornier 728 experimental aircraft: Optimised sensor placement," *Acta acustica united with Acustica*, vol. 102, pp. 361–372, März 2016.
- [20] S. J. Elliott and M. E. Johnson, "Radiation modes and the active control of sound power," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 4, pp. 2194–2204, Oct. 1993.
- [21] S. J. Elliott, *Signal Processing for Active Control*. London: Academic Press, 2001.
- [22] F. Fahy and P. Gardonio, *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response*, 2nd ed. Oxford/Burlington: Academic Press, 2007.