

Aktive Strukturen zur Reduktion von Grenzsichtlärms

Stephan Algermissen¹, Thomas Haase¹, Oliver Unruh¹ und Hans Peter Monner¹

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

38108 Braunschweig, Deutschland,

Email: stephan.algermissen@dlr.de

Kurzfassung

Passagiere sind während eines Fluges zahlreichen Störschall-Einflüssen ausgesetzt. Eine der dominanten Quellen im Reiseflug ist der Schalleintrag der turbulenten Grenzschicht (TBL¹), die sich zwischen der freien Strömung und der Außenhaut des Flugzeugs ausbildet. Neue Werkstoffe für den Flugzeugrumpf wie kohle- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe weisen im Vergleich zu Aluminium ein schlechteres Schalldämmmaß auf. Um den Passagierkomfort auch in zukünftigen Flugzeugen zu gewährleisten oder sogar zu verbessern, werden neben den üblichen passiven Dämmungen auch Systeme zur aktiven Reduktion der Schalltransmission untersucht.

In diesem Artikel werden Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen eines aktiven Systems im Aeroakustischen Windkanal Braunschweig (AWB) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) vorgestellt. Das aktive System ist auf einem mit Stringern versteiften Paneel ($500 \times 800 \text{ mm}^2$) aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) angebracht. Durch die applizierten Beschleunigungssensoren und Inertial-Erreger ist das System im Windkanal in der Lage die durch die TBL-induzierten Schwingungen zu messen und im Sinne einer reduzierten Schallabstrahlung zu beeinflussen. Das aktive System ist in seiner Funktion als Unterstützung der bestehenden Dämmsysteme zu verstehen, die insbesondere im unteren Frequenzbereich ($< 500 \text{ Hz}$) Schwächen aufzeigen.

Einleitung

Die Reduktion von TBL-induzierten Lärm in modernen Verkehrsflugzeugen ist seit Jahren Gegenstand vieler Untersuchungen. Er zeichnet sich im Gegensatz zum bekannten Rotorlärm durch seinen breitbandigen Charakter und die kurzen Kohärenzlängen seiner Druckfluktuationen aus [1, 2]. Nur wenige Studien zur Reduktion von TBL Lärm führten bis zur praktischen Umsetzung. Gibbs und Cabell [3] untersuchten aktive Regelungstechniken an einer Flugzeug-Seitenwand, die durch eine TBL angeregt wurde. In dortigen Windkanal-Experimenten konnten lokale und globale Regelungsansätze bei einer Windgeschwindigkeit von Mach 0.125 getestet werden. Eine schmalbandige Reduktion der abgestrahlten Schallleistung von 7,5 dB konnte in den Experimenten realisiert werden. Die meisten Arbeiten zum Thema TBL-induzierter Lärm sind jedoch theoretischer Natur. Neben

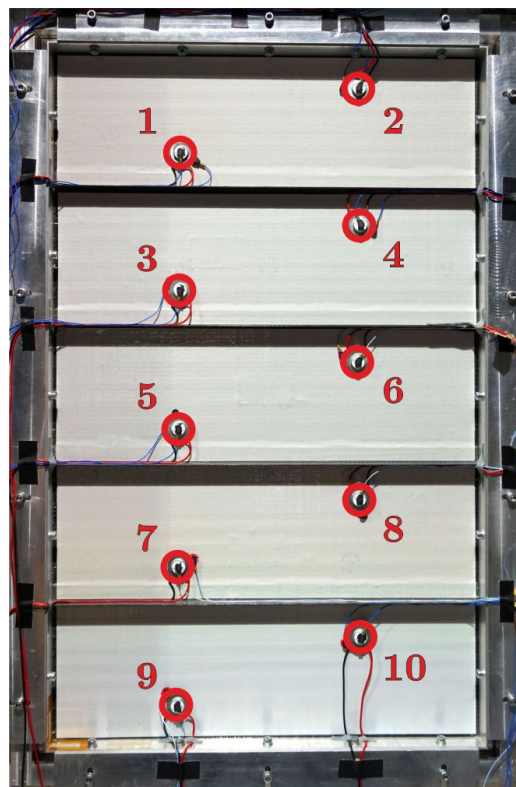


Abbildung 1: Aktuator-Sensor-Paare (1-10) auf dem CFK Paneel

den Arbeiten von Schiller [4] und Rohlfing und Gardonio [5] gilt dies auch für Thomas und Nelson [6] und Maury [7].

Versuchsaufbau

Der Aeroakustische Windkanal Braunschweig des DLR erlaubt Messungen bis zu einer Windgeschwindigkeit von 60 m/s . Durch die offene Bauweise des Windkanals und die Lage der Teststrecke in einem akustischen Freifeldraum werden aeroakustische Untersuchungen von z.B. Flügeln ermöglicht. Zur Realisierung von TBL-Experimenten wurde eine sogenannte geschlossene Messstrecke gebaut und zwischen Düse und Kollektor des Windkanals eingesetzt. Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau im Freifeldraum des AWB. Durch die links im Bild befindliche Düse ($1,2 \times 0,8 \text{ m}^2$) strömt die Luft in die geschlossene Messstrecke. Dabei baut sich die Grenzschicht mit fortschreitender Lauflänge der Strecke bis zum Paneel (weiß) auf eine Dicke von 35 mm auf. Das seitlich in der Wand der geschlossenen Messstrecke eingelassene Paneel hat ei-

¹engl.: Turbulent Boundary Layer

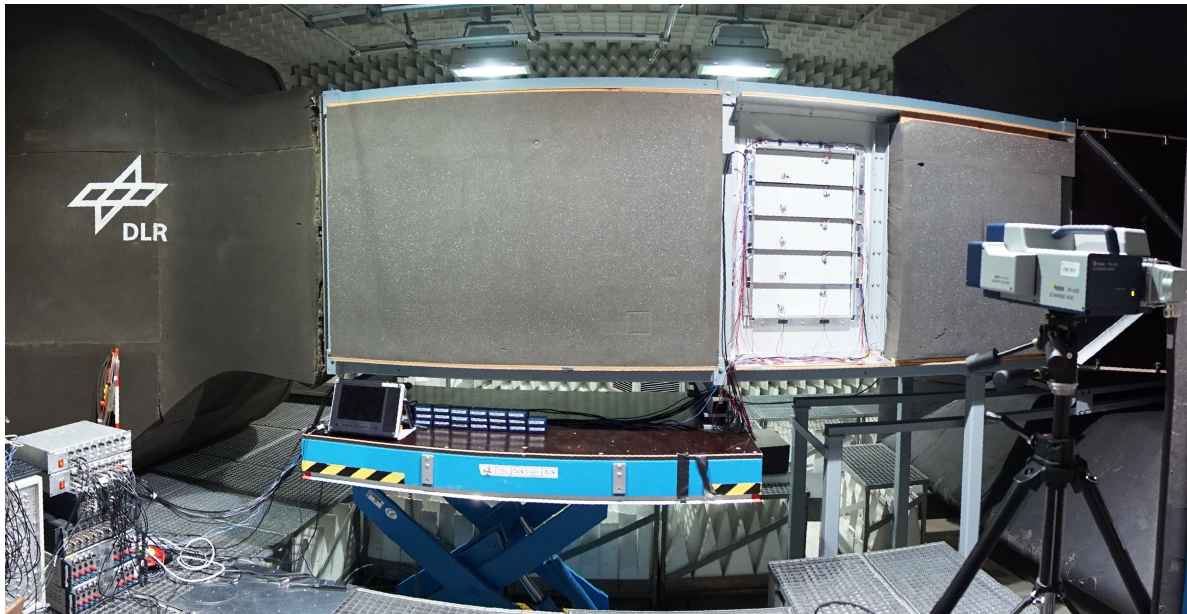


Abbildung 2: Versuchsaufbau im AWB

ne Breite von 500 mm, eine Höhe von 800 mm und eine Dicke von 1,3 mm. Es ist aus bi-direktionalem CFK Gewebe mit einem $[0, 90, 90, 0]$ Lagenaufbau gefertigt. Zur Erzeugung von Schwingungsformen die im Flugzeugbau relevant sind, wurde das Paneel mit vier L-Stringern aus CFK mit einer Schenkellänge von 20 mm in fünf Hautfelder segmentiert, s. Abb. 1. Das aktive System besteht aus jeweils zwei Excitern des Typs DAYTON® DAEX13CT-4 je Hautfeld. Neben und auf jedem Exciter ist jeweils ein Beschleunigungssensor des Typs PCB® 352A24 zur Erfassung der Struktur- und Exciter-Schwingungen montiert. Die kollokale Regelung ist auf einem SPEEDGOAT® Rapid-Prototyping System bei einer Abtastfrequenz von 20 kHz umgesetzt.

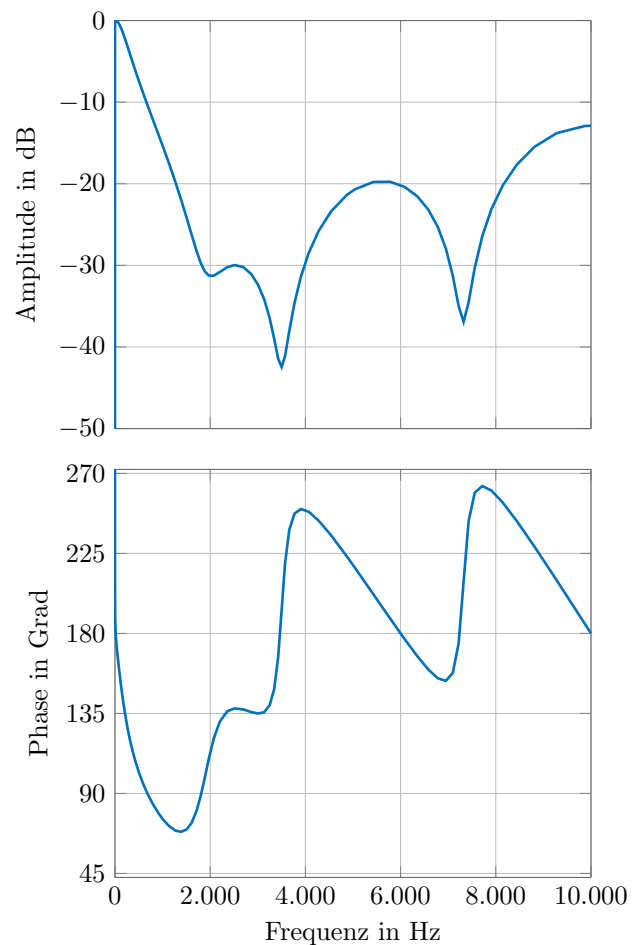
Regelung

In früheren Untersuchungen [8, 9, 10] konnte die Funktionsfähigkeit aktiver Systeme zur Reduktion von TBL-induziertem Lärm nachgewiesen werden. Mittels modellbasierter Steuerungen und Regelungen gelang eine signifikante Reduktion der abgestrahlten Schalleistung der angeströmten Paneele um bis zu 6 dB(A) je Terz. Das zur Reglersynthese benötigte Modell der Regelungsstrecke, von den Aktuatoren zu den Sensoren, musste vorab in einer Systemidentifikation bestimmt werden.

In diesem Artikel wird zur Vereinfachung des Reglerentwurfs ein nicht-modellbasierter Ansatz gewählt. Jeder der zehn Aktuatoren agiert gemeinsam mit dem kollokal auf der Struktur und dem auf dem Aktuator platzierten Beschleunigungssensor als autarke Aktuator-Sensor-Einheit, s. Abb. 1. Für jede Einheit wird jeweils ein Regler

$$\underline{R}_n = -v_n H_{hp} H_{tp} \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

implementiert, der sich aus den für alle Einheiten identischen Filtern H_{hp} und H_{tp} sowie dem individuellen Faktor v_n zusammensetzt. Gemeinsam mit der Aktuator-

Abbildung 3: Bode-Diagramm des Regleranteils $-H_{hp}H_{tp}$

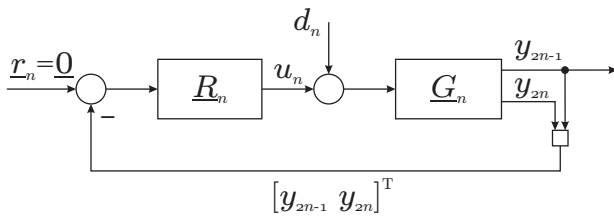


Abbildung 4: Regelkreis einer Aktuator-Sensor-Einheit n

Sensor-Einheit bildet er den Regelkreis in Abbildung 4. $\underline{G}_n$ bezeichnet die Regelstrecke von Aktuator n auf die kollokale Beschleunigung der Struktur y_{2n-1} und die Beschleunigung y_{2n} der Inertialmasse des Aktuators n . Die Anregung durch die TBL ist als Prozessrauschen d_n modelliert. Die Stellgröße des Aktuators n ist mit u_n bezeichnet. Die Sollgröße r_n ist zu null gesetzt, da eine reine Störgrößenreduktion vorliegt. Die Störgrößenübertragungsfunktion des Kreises in Abb. 4 lautet:

$$\begin{bmatrix} y_{2n-1} \\ y_{2n} \end{bmatrix} = \underline{G}_n S_n d_n \quad (2)$$

mit der Sensitivität

$$S_n = [1 + \underline{R}_n \underline{G}_n]^{-1} \quad (3)$$

des Kreises. Das Ziel der Regelung ist die Minimierung des Einflusses der Störgröße d_n auf die Beschleunigung der Struktur y_{2n-1} . Die Beschleunigungen der Inertialmasse sind hierbei von sekundärer Bedeutung.

Die Eigenfrequenz der applizierten Aktuatoren liegt bei etwa 120 Hz und damit in der gewünschten Regelungsbandbreite des Systems. Zur Vermeidung eines 180° Phasenabfalls im Bereich der Resonanz arbeitet der Regler mit der Relativbeschleunigung von Struktur und Inertialmasse. Die Differenzbildung erfolgt am Eingang des Reglers durch ein Skalarprodukt des Eingangsvektors mit dem Term $\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}$ aus (1).

Bei den Filtern H_{hp} und H_{tp} handelt es sich um folgende Typen:

H_{hp} : Butterworth Hochpass erster Ordnung mit Grenzfrequenz 1 Hz

H_{tp} : Modifizierter Infinite Impulse Response (IIR) Tiefpass 6. Ordnung mit Grenzfrequenz 100 Hz

Das Bode-Diagramm der beiden Filteranteile ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Faktor v_n wird für jede Aktuator-Sensor-Einheit individuell mit dem Nyquist-Kriterium für Single-Input-Single-Output (SISO) Systeme eingestellt. Dazu wird die Regelstrecke $\underline{G}_n$ für jede Einheit als Frequenzgang gemessen und die Amplitudenreserve auf den empirisch ermittelten Wert 3,3 festgelegt. Mit der gewählten Reserve ist die globale Stabilität der zehn kollokalen Regelungssysteme gewährleistet.

Die Implementierung des Reglers erfolgt in Form eines Zustandsraummodells

$$\underline{\underline{R}} = \text{blkdiag}(\underline{R}_n) \quad \text{mit } n = 1..10, \quad (4)$$

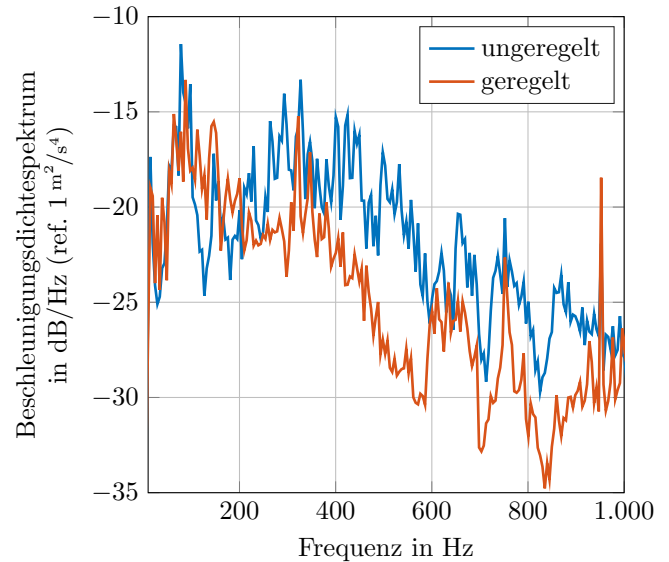


Abbildung 5: Summierte Spektren der Struktursensoren unter Windanregung

das die einzelnen Regler als Blockdiagonale beinhaltet. Kreuzkopplungen der einzelnen Regler sind somit ausgeschlossen und nur über den Weg der Struktur vorhanden.

Ergebnisse

Die Experimente mit dem aktiven System wurden im Windkanal bei einer Windgeschwindigkeit von 50 m/s (Mach 0,146) durchgeführt. Die turbulente Grenzschicht regte das Paneel durch Druckfluktuationen zu Schwingungen an, die wiederum Schall in den Messraum des AWB abstrahlten. Der akustische Freifeldraum des AWB ermöglichte akustische Messungen am Paneel.

Im Windkanalbetrieb wurden die Signale der Beschleunigungssensoren im ungeregelten und geregelten Fall aufgezeichnet. In Abbildung 5 sind die summierten Beschleunigungsdichtespektren aller zehn Struktursensoren dargestellt. Die Reduktion der Schwingungen an den Sensorpunkten in der Bandbreite bis 1 kHz ist deutlich erkennbar. In derselben Konstellation wurde eine Messung der abgestrahlten Schallintensität des Paneels mit einer BRÜEL & KJÆR® Sonde Typ 3599 durchgeführt. Die Abbildung 6 zeigt, dass im Intervall von 100-400 Hz eine Reduktion der abgestrahlten Schallintensität erreicht wird. Der Summenpegel der Schallintensität in diesem Intervall konnte mit dem aktiven System um 3 dB reduziert werden. Außerhalb dieses Intervalls konnte keine Reduktion erzielt werden.

Zusammenfassung

Dieser Artikel präsentierte die Realisierung eines nicht-modellbasierten Regelungsansatzes zur Reduktion des abgestrahlten Schalls eines angeströmten CFK Paneels. Im Windkanal konnte die Leistungsfähigkeit des einfach aufgebauten Systems im Experiment nachgewiesen werden. Neben einer breitbandigen Reduktion der Strukturschwingungen an den Sensorpunkten konnte die abge-

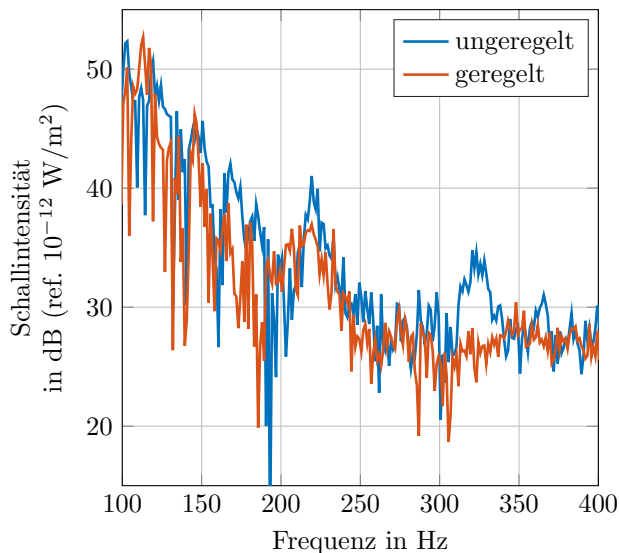


Abbildung 6: Abgestrahlte Schallintensität des Paneels unter Windanregung

strahlte Schallintensität des Paneels um 3 dB im Intervall von 100-400 Hz vermindert werden.

In zukünftigen Untersuchungen werden Paneele größerer Bauart verwendet. Die Einfachheit des Regelungssystems mit seinen unabhängigen Aktuator-Sensor Paaren ermöglicht eine Skalierung auf deutlich größere Strukturen. Stabilitätsbetrachtungen zum Thema Skalierung konnten bereits in [11] dokumentiert werden. Ein weiteres Thema ist die optimale Platzierung der Aktuator-Sensor-Einheiten hinsichtlich einer verbesserten Reduktion der Schallabstrahlung [12].

Literatur

- [1] WILBY, J. F.: Aircraft Interior Noise. In: *Journal of Sound and Vibration* 190 (1996), Nr. 3, S. 545 – 564. – ISSN 0022-460X
- [2] CORCOS, G. M.: The Structure of the Turbulent Pressure Field in Boundary-Layer Flows. In: *Journal of Fluid Mechanics* 18 (1964), Nr. 3, S. 353–378
- [3] GIBBS, G. P. ; CABELL, R. H.: Active Control of Turbulent Boundary Layer Induced Sound Radiation from Multiple Aircraft Panels. In: *Proc. of 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. Breckenridge, CO, USA, June 2002
- [4] SCHILLER, N. H. ; FULLER, C. R.: A high-authority/low-authority control strategy for coupled aircraft-style bays. In: *Proc. of ACTIVE 2006*. Adelaide, Australia, September 2006
- [5] ROHLFING, J. ; GARDONIO, P.: Homogeneous and sandwich active panels under deterministic and stochastic excitation. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 125 (2009), Nr. 6, S. 3696–3706
- [6] THOMAS, D. R. ; NELSON, P. A.: Feedback control of sound radiation from a plate excited by a turbulent boundary layer. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 98 (1995), Nr. 5, S. 2651–2662. – Paper not available
- [7] MAURY, Cedric ; GARDONIO, Paolo ; ELLIOTT, Stephen J.: Model for Active Control of Flow-Induced Noise Transmitted Through Double Partitions. In: *AIAA Journal* 40 (2002), Nr. 6, S. 1113 – 1121
- [8] ALGERMISSEN, Stephan ; MISOL, Malte ; UNRUH, Oliver ; HEINTZE, Olaf ; MONNER, Hans P.: Robust Control of Turbulent Boundary Layer Noise Transmission Through a Stiffened Panel. In: *Proc. of International Congress on Sound and Vibration*. Cairo, Egypt, July 2010
- [9] MISOL, Malte ; ALGERMISSEN, Stephan ; UNRUH, Oliver: Adaptive Feedforward Control of Smart CFRP-Panels Excited by a Turbulent Boundary Layer. In: *Proceedings of Internoise 2010*. Lisbon, Portugal, June 2010
- [10] ALGERMISSEN, Stephan ; MISOL, Malte ; UNRUH, Oliver: Reduction of Turbulent Boundary Layer Noise with Actively Controlled Carbon-Fiber-Reinforced-Plastic Panels. In: SINAPIUS, Michael (Hrsg.) ; WIEDEMANN, Martin (Hrsg.): *Adaptive, tolerant and efficient composite structures*. Springer, 2012 (Research Topics in Aerospace), Kapitel 34, S. 417 – 425
- [11] ALGERMISSEN, Stephan ; MONNER, Hans P.: On The Stability Of Decentralized AVC/ASAC For Large-Scale Structures. In: *Proc. of the ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS)*. Colorado Springs, CO, USA, September 2015
- [12] HAASE, T. ; UNRUH, O.: Active Control of Counter-Rotating Open Rotor Interior Noise in a Dornier 728 Experimental Aircraft: Optimised Sensor Placement. In: *Acta Acustica united with Acustica* 102 (2016), Nr. 2, S. 361–372