

Entwicklung einer Körperschallbarriere basierend auf der Strukturintensität

Thomas Haase¹, Alexander Kokott¹, Hans Peter Monner¹

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig, E-Mail: thomas.haase@dlr.de

Einleitung

Lärm, der durch schwingende Strukturen abgestrahlt wird, entsteht häufig an anderen Orten, als an denen, wo er wahrgenommen wird [1]. Die lärmabstrahlenden Schwingungen werden häufig durch Körperschalltransmission übertragen. Die Beeinflussung der Körperschalltransmission kann deshalb einen signifikanten Beitrag zur Lärmreduktion in z.B. Kabinen haben.

In diesem Artikel werden deshalb Messverfahren zur Strukturintensität numerisch untersucht und mit Hilfe dieser Messverfahren aktive Körperschallbarrieren erprobt. Diese werden zunächst an einem einfachen Kragbalken getestet und im nächsten Schritt auf komplexere versteifte Strukturen übertragen. Die Simulation zeigt bei multi-tonaler Anregung der Struktur die Realisierbarkeit einer akustischen Barriere.

Strukturintensität

Die Messung der Strukturintensität ist bereits seit 1969 Thema in der Wissenschaft [2]. Zunächst wurden einfache Verfahren unter Vernachlässigung eines Nahfeldes (Inhomogenität) mit wenigen Sensoren entwickelt. Basierend auf diesen Untersuchungen sind weitere Verfahren entstanden, die Nah- und Fernfeldkomponenten mit bis zu 4 Sensoren pro Richtung ermitteln können [3], [4].

Neben den genannten Literaturquellen sind verschiedenste Verfahren dokumentiert, jedoch sind die in [3] und [4] gezeigten Methoden in der Lage sowohl Fern- als auch Nahfelder zu ermitteln. In dieser Untersuchung werden ein 4-Positions-messverfahren (Auslenkung) und ein 3-Positionsverfahren (Auslenkung + Rotation) untersucht. Die folgenden Erläuterungen werden für einen Balken angegeben, wobei die Schnittkräfte und Koordinaten nach Abbildung 1 definiert werden.

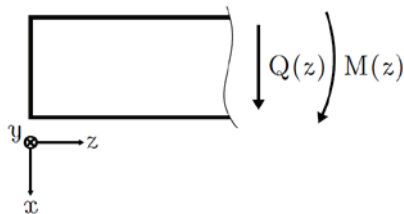


Abbildung 1: Definition des Balkenkoordinatensystems und der Schnittkräfte (positives Schnittufer)

Die Strukturintensität beschreibt die flächenbezogene übertragene Energie, wobei unter der Annahme eines gleichbleibenden Querschnitts die übertragene Leistung wie folgt beschrieben werden kann:

$$P = Q(z) \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + M(z) \frac{\partial^2 x}{\partial z \partial t} \quad [W] \quad (1)$$

Für einen einfachen Balken kann für die Querkraft und das Biegemoment

$$Q(z) = B \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial z^3} \quad M(z) = -B \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \quad (2)$$

angenommen werden, wobei die Biegesteifigkeit $B = E \cdot I$ und E der Elastizitätsmodul und I das Flächenträgheitsmoment sind. Durch Einsetzen von (2) in (1) ergibt sich für die Leistung zu

$$P = B \left[\left(\frac{\partial^3 x}{\partial z^3} \right) \frac{\partial x}{\partial t} - \left(\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \right) \frac{\partial^2 x}{\partial z \partial t} \right] \quad (3)$$

Zur Bestimmung der örtlichen Ableitungen werden in der Regel finite Differenzen eingesetzt. Für das Beispiel (Abbildung 2) der 4-Positions-messung nach [3] sind die finiten Differenzen nachfolgend angegeben.

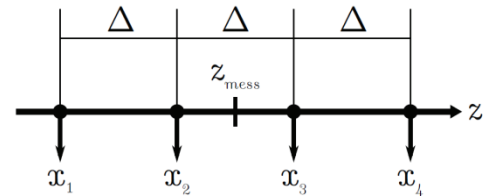


Abbildung 2: Schema der 4-Positions-messung der Strukturintensität (Δ symbolisiert den Sensorabstand)

$$\frac{\partial x}{\partial z} \approx \frac{x_3 - x_2}{\Delta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \approx \frac{x_4 - x_3 - x_2 + x_1}{2\Delta^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^3 x}{\partial z^3} \approx \frac{x_4 - 3x_3 + 3x_2 - x_1}{\Delta^3} \quad (6)$$

Bereits aus diesen Gleichungen wird deutlich, dass bei der technischen Realisierung derartiger Messanordnungen genau auf die Einhaltung des Sensorabstandes geachtet werden muss. Zudem sollten die Messgrößen zeitsynchron gemessen werden und die Sensoren sollten keine Phasenverschiebung zueinander haben, um keine Phasenabweichungen und somit Fehler bei der Berechnung der finiten Differenzen hervorzurufen.

Mit Hilfe der finiten Differenzen kann die Leistung für das 4-Positionsverfahren mit

$$P = \frac{B}{2\Delta^3} [\dot{x}_2(2x_4 - 4x_3 + 2x_2) + \dot{x}_3(-2x_3 + 4x_2 - 2x_1)] \quad (7)$$

berechnet werden. Als zweites Berechnungsverfahren zur Strukturintensität wird das 3-Positionsverfahren von Baumann verwendet, welches die Messung der Auslenkung und des Drehwinkels kombiniert (Abbildung 3). Der Vorteil der direkten Drehwinkel-messung liegt in der Einsparung einer örtlichen Ableitung, da $\frac{\partial x}{\partial z} = \varphi$. Damit ergibt sich die Leistung zu

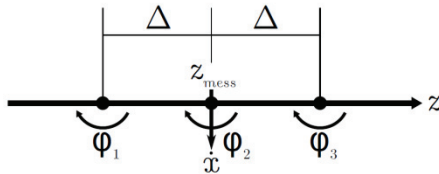


Abbildung 3: Schema der 3-Positionsmessung der Strukturintensität

$$P = B \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \frac{\partial x}{\partial t} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right] \quad (8)$$

Mit Hilfe der finiten Differenzen für den Fall des 3-Positionsverfahrens lässt sich die Gleichung für die Leistung

$$P = B \left[\left(\frac{\varphi_3 - 2\varphi_2 + \varphi_1}{\Delta^2} \right) \dot{x} - \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{2\Delta} \right) \dot{\varphi}_2 \right] \quad (9)$$

Nachteilig am Verfahren von Baumann ist die Verwendung von Rotationssensoren, welche nicht in dem Umfang kommerziell verfügbar sind, wie z.B. Beschleunigungssensoren (wenn die Eigenmasse des Sensors berücksichtigt wird).

Für beide Messverfahren kann auch eine Überführung in den Frequenzbereich durchgeführt werden, bei der es möglich ist die Werte auf einen Referenzsensor zu beziehen und somit Phasenfehler zwischen den Sensoren zu kompensieren. Auf eine Ausführung wird an dieser Stelle verzichtet, da eine Steuerungsimplementierung im Zeitbereich gewünscht ist.

Vergleich der Messverfahren

Die beiden gezeigten Messverfahren sollen durch eine numerische Simulation an einem Balkenmodell verglichen werden. Ein Schema des Balkensystems und der Anordnung der Messpunkte ist in Abbildung 4 gezeigt.

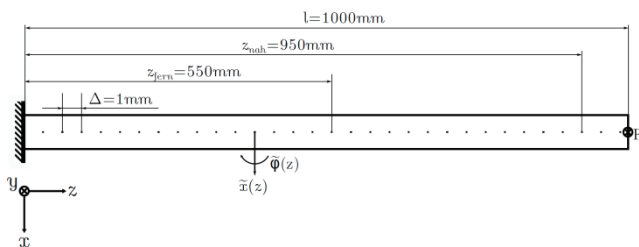


Abbildung 4: Balkenmodell mit Markierung der Nah- und Fernfeldmessposition und ausgewertetem Sensorabstand (nicht maßstäblich)

Der Messabstand $\Delta = 1\text{mm}$ ist hier als minimaler Abstand zu verstehen, bei dem Fehler durch finite Differenzen minimal sind. Für technische Systeme ist der Sensorabstand entsprechend größer.

Zunächst wird eben dieser Sensorabstand in Abhängigkeit des messbaren Frequenzbereichs ausgewertet. Dazu werden die Schnittgrößen direkt als Lösungen aus der FE-Simulation exportiert. Diese Größen dienen der Ermittlung der Leistung nach Gleichung 7 bzw. 9. Anschließend wird der Fehler zwischen Referenzlösung (Sensorabstand $\Delta = 1\text{mm}$) und der Lösung mit Sensorabstand Δ mit

$$L_{Err} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P}{P_{Ref}} \right) \quad [dB] \quad (10)$$

Die Entwicklung des Fehlers in Abhängigkeit der Frequenz und des Sensorabstandes ist in Abbildung 5 für die Fernfeldposition und in Abbildung 6 für die Nahfeldposition dargestellt.

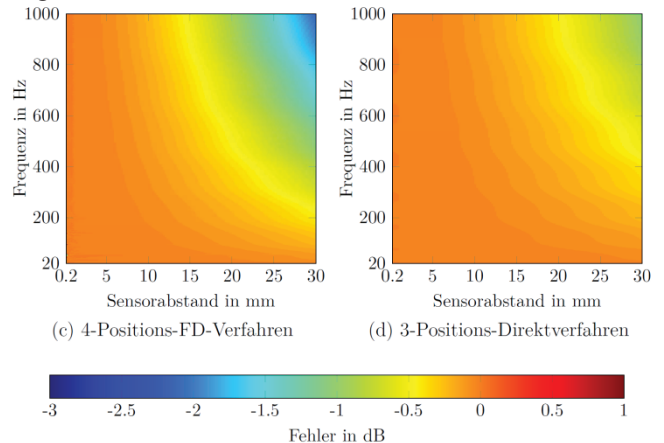


Abbildung 5: Fehler durch finite Differenzen durch Variation des Sensorabstandes (Fernfeldposition)

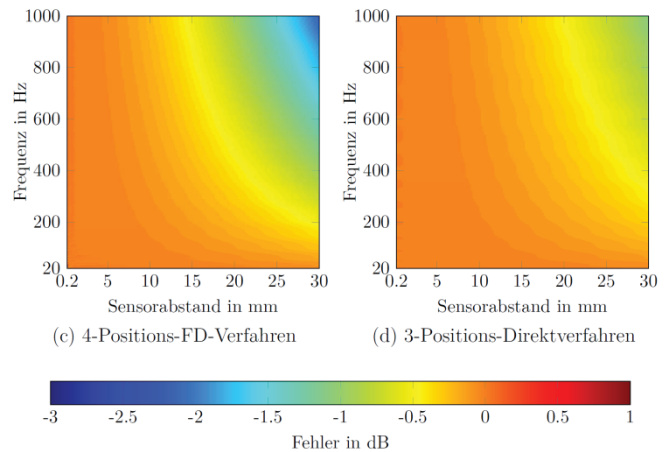


Abbildung 6: Fehler durch finite Differenzen durch Variation des Sensorabstandes (Nahfeldposition)

Sowohl für den Fern- und Nahfeldbereich zeigt das 3-Positionsverfahren kleinere Abweichungen zur Referenzlösung. Der technisch vergleichsweise geringe Sensorabstand von 30mm erzeugt beim 4-Positionsverfahren bereits einen Fehler von 3dB ab ca. 800 Hz, wohingegen der maximale Fehler des 3-Positionsverfahrens bis 1000 Hz maximal 1 dB beträgt.

Für eine technische Realisierung ist zudem die Fehleranfälligkeit gegen eine Sensordeplatzierung ein wichtiger Einflussfaktor. In den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich das 3-Positionsdirektverfahren wesentlich robuster als das 4-Positions-FD-Verfahren.

Aktive Steuerung der Körperschalltransmission

Kragbalken

Die erste Untersuchung zur Steuerung der Körperschalltransmission soll an einem einfachen Kragbalken erfolgen. Für die hier präsentierte Voruntersuchung wird eine Optimalsteuerung wie in [5] beschrieben verwendet, wobei als Referenzsignal direkt das Störsignal (Kraft am Balkenende) verwendet wird. Als Sekundärquelle dient ebenfalls eine Punktkraft, welche an Position $z = 750\text{mm}$ platziert wird. Als Fehlersignal der

Steuerung kann nicht direkt die Strukturintensität verwendet werden, da, wie in Gleichung 7 gezeigt, eine nichtlineare Berechnung zu Grunde liegt. Nach [6] kann eine lineare Steuerung verwendet werden, wenn Gleichung 7 in die Unterkomponenten

$$A = \dot{x}_2 \quad (11)$$

$$B = 2x_4 - 4x_3 + 2x_2 \quad (12)$$

$$C = \dot{x}_3 \quad (13)$$

$$D = -2x_3 + 4x_2 - 2x_1 \quad (14)$$

zerlegt und die Leistung über $P = \frac{B}{2\Delta^3} [A \cdot B + C \cdot D]$ berechnet wird. Für die Vorstudie wurden die folgenden Anregungssignale verwendet:

Tabelle 1:Anregungssignale für die Steuerungsberechnung

| Anregung Nr. | Art | Frequenz |
|--------------|----------|--------------|
| 1 | tonal | 57 Hz |
| 2 | tonal | 76 Hz |
| 3 | tonal | 620 Hz |
| 4 | tonal | 676 Hz |
| 5 | Rauschen | 20 Hz - 1kHz |

Die Anregungen 1 und 3 sind dabei jeweils Resonanzfrequenzen des Balkens, die Anregungen 2 und 4 sind Anregungen außerhalb der Resonanzen. Dadurch soll das Verhalten der verschiedenen Steuerungen bei stehenden und laufenden Wellen untersucht werden.

Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der Steuerung mit strukturintensitäts-basierten Fehlersignalen wird ebenfalls eine Steuerung mit einem Schnelle-Fehlersignal berechnet, welche ausschließlich die Schnelle an der Messstelle reduziert. In Abbildung 7 ist die Abschwächung der Strukturintensität (Steuerung an minus Steuerung aus) energetisch summiert über der Balkenlänge dargestellt.

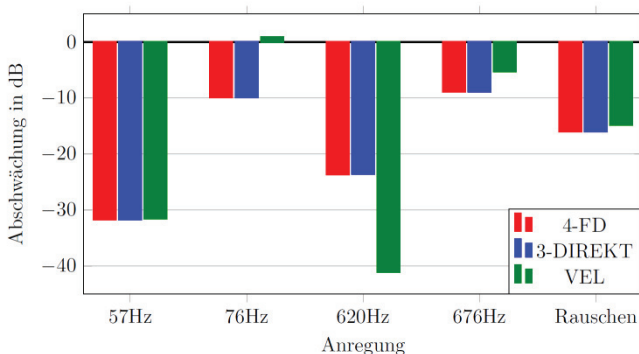
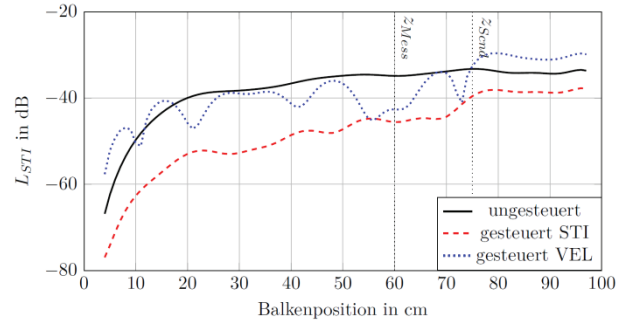


Abbildung 7: Abschwächung der energetisch summierten Strukturintensität des Balkens bei verschiedenen Steuerungsformen

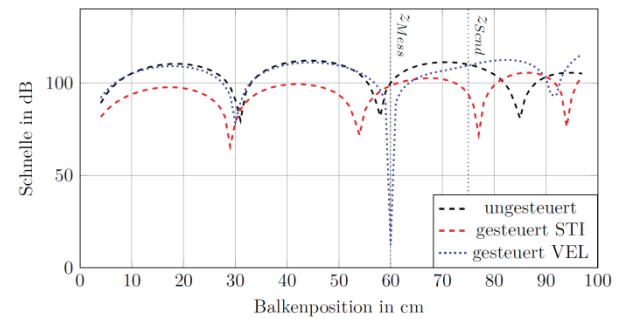
Die gezeigten Abschwächungen zeigen zwischen den beiden Strukturintensitätsverfahren keine Unterschiede, was auf die ideale Berechnung der Faktoren A bis D durch die numerische Simulation begründet ist (keine zeitlichen Ableitungen bzw. Integrationen notwendig). Im Vergleich

zur Schnelle-Steuerung zeigt die Strukturintensitäts-Steuerung insbesondere bei der nicht-resonanten Anregung Vorteile. Die Abschwächung der Strukturintensität bei laufenden Wellen (Anregungen 2+4) ist deutlich ausgeprägter; bis zu 10 dB bei 76 Hz und 5 dB bei 676 Hz.

Beispielhaft sind für die Anregung 2 der Intensitätsverlauf und die Schnelle-Verteilung über dem Balken dargestellt.



(a) Strukturintensität über Balkenlänge



(b) Oberflächenschnelle über Balkenlänge

Abbildung 8: Strukturintensität (dB ref. 1W) (a) und Schnelle (dB ref. $5e^{-8} \frac{m}{s}$) (b) über Balkenlänge bei Anregung 2

Bei resonanter Anregung ist auch die Schnelle-Steuerung in der Lage den gesamten Balken zu beruhigen, da durch die stehende Welle die Phasenlage aller z-Koordinaten konstant ist. Dementgegen ist bei nicht-resonanter Anregung nur eine lokale Auslöschung der Schnelle-Steuerung erkennbar. Die Strukturintensitätssteuerung reduziert auch für Anregung 2 die Schnelle hinter der Messstelle global.

Versteifte Plattenstruktur

Ein Anwendungsfall einer Körperschallbarriere wäre ein Flugzeug mit Heckantrieb. Im Falle eines Triebwerks mit doppelläufigen offenen Rotoren am Heck, würde sich sowohl der Körper- als auch der Luftschall über den Rumpf in Richtung Kabine ausbreiten. Eine Flugzeugrumpfstruktur ist durch Spante und Stringer versteift, was für die Intensitätsberechnung eine zusätzliche Herausforderung darstellt (Anzahl Sensoren, Anzahl Fehlersignale).

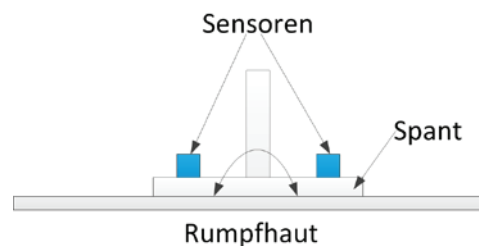


Abbildung 9: Sensoranordnung auf der Spantbasis

Da in einem Rumpf die tieffrequenten Schwingungen durch die Spante dominiert werden [7], können die Schwingungen an einem Spant effizient blockiert werden.

Zur Vereinfachung des Steuerungsproblems, werden die Schnelle und der Verdrehwinkel des Spantes durch zwei Sensoren gemessen (Abbildung 9). Die Störung wird durch 5 Störkräfte in den linken Hautfeldern vereinfacht dargestellt. Steuerungsvariante 1 arbeitet mit 4 Sensoren (2 Messstellen) und kollokal dazu angeordneten Sekundärkräften, bei Steuerungsvariante 2 werden 8 Sensoren bzw. Sekundärkräfte (4 Messstellen) eingesetzt.

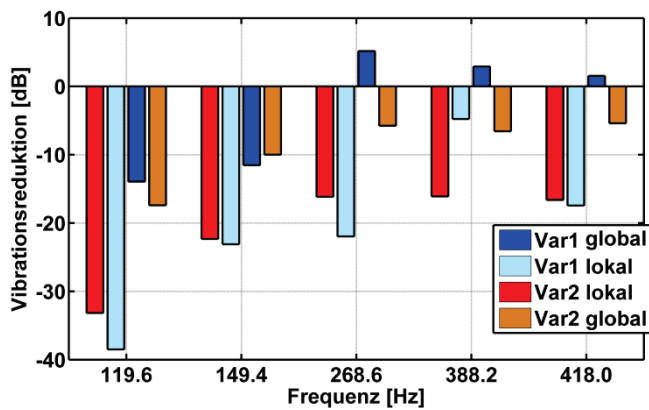


Abbildung 10: Reduktion der Vibrationen an den Messstellen (lokal) und im Barrierebereich (global)

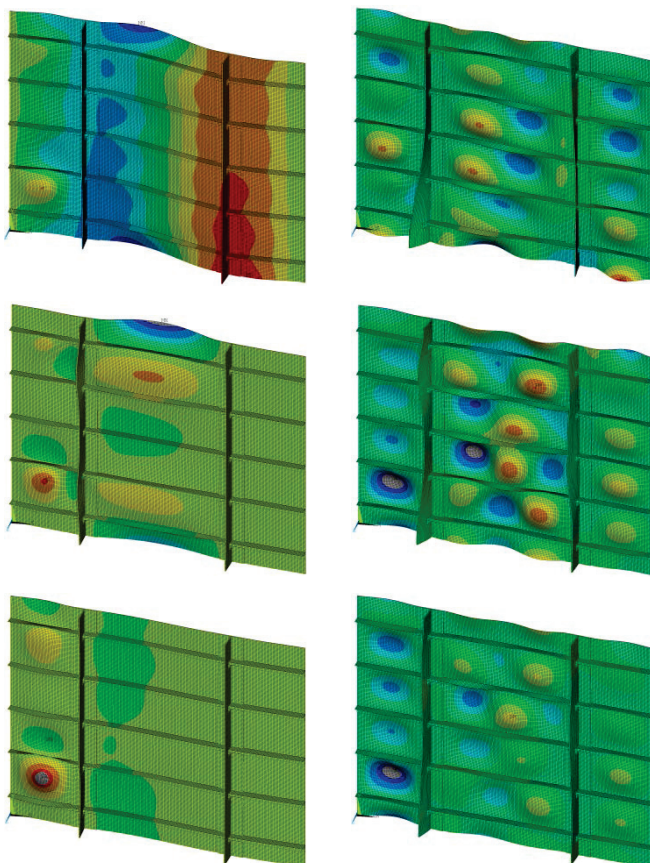


Abbildung 11: Schwingformen der versteiften Struktur bei 119,6 Hz (linke Spalte) und 418,0 Hz (rechte Spalte): Ohne Steuerung (obere Reihe), Steuerung Variante 1 (mittlere Reihe), Steuerung Variante 2 (untere Reihe)

Die Reduktion der Schnelle an den Messstellen (lokal) und im Barrierebereich (mittlere und rechte Hautfelder) ist in

Abbildung 10 dargestellt. Variante 2 erzielt für alle adressierten tonalen Störfrequenzen eine globale Reduktion der Schnelle, wohingegen Variante 1 nur bei den ersten beiden Frequenzen wirksam ist. Exemplarisch sind einige Betriebschwingformen im gesteuerten und ungesteuerten Zustand in Abbildung 11 gegeben. Auch hier ist für die Steuerungsvariante 2 eine globale Reduktion der Schnelle im Barrierebereich erkennbar.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zur Strukturintensität zeigen, dass eine Körperschallbarriere realisierbar ist. Ein geeignetes Messverfahren ist das 3-Positions-Direktverfahren mit Drehwinkelsensoren.

Weiterhin wurden Steuerungssysteme simulativ am Kragbalken und an einem versteiften Panel untersucht. Die Steuerung basierend auf der Strukturintensität zeigt am Kragbalken außerhalb von Resonanzen Vorteile gegenüber einer Schnelle-Steuerung. Am versteiften Panel kann mit einer vereinfachten Sensoranordnung die Vibration im Barrierebereich deutlich reduziert werden.

In weiteren Arbeiten soll das Verfahren an versteiften Zylinderschalen simulativ erprobt und an einfacheren Strukturen experimentell untersucht werden. Dabei sollen ebenfalls Sensorkonzepte und Aktuatoren für das Konzept der Körperschallbarriere erprobt werden.

Literatur

- [1] Smith, M. J. T. Aircraft noise. Cambridge University Press, 2004
- [2] Noiseux, D. U.: Measurement of power flow in uniform beams and plates, The Journal of the Acoustical Society of America 47 (1970), 238-247
- [3] Pavić, G.: Measurement of structure borne wave intensity, Part 1: Formulation of methods, Journal of Sound and Vibration 49 (1976), 221-230
- [4] Bauman, P. D.: Measurement of structural intensity: Analytic and experimental evaluation of various techniques for the case of flexural waves in one-dimensional structures, Journal of Sound and Vibration 174 (1994), 677-694
- [5] Haase, T., Misol, M., Rose, M.: Optimal placement of flat piezoceramic actuators for feedforward systems under the influence of real-time hardware delays, Journal of Sound and Vibration 345 (2015), 34-46
- [6] Audrain, P., Masson, P., Berry, A.: Investigation of active structural intensity control in finite beams: Theory and experiment, The Journal of the Acoustical Society of America 108.2 (2000), 612-623
- [7] Sachau, D., Baschke, M.: Adaptive support for aircraft panel testing: New method and its experimental verification on a beam structure, Journal of Sound and Vibration 394 (2017), 31-45