

Entwicklung einer Körperschallbarriere auf Basis der Strukturintensität: Teil 2

Alexander Kokott¹, Thomas Haase¹, Hans Peter Monner¹

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

Einleitung

Neue energieeffiziente Antriebskonzepte in der Luftfahrt, wie beispielsweise Contra-Rotating Open Rotor Triebwerke, führen zu stärkeren Vibrationen der Flugzeugstruktur und somit zu höherer Schallabstrahlung in der Kabine. Die Übertragung erfolgt über Körper- und Luftschallpfade, wobei letztere wiederum in die Struktur einkoppeln und zur Erhöhung der in Richtung Kabine übertragenen Körperschallenergie führen. Ziel der aktuellen Untersuchungen ist es, die Körperschalltransmission zu messen und zu steuern, sodass die Energieübertragung in beispielsweise die Kabine reduziert wird. Numerische Voruntersuchungen zur Messung und Steuerung des Körperschalls in Form der Strukturintensität (STI) wurden bereits in [2] vorgestellt. Die aktuellen Untersuchungen zu diesem Thema sind dabei grundlegender Natur, d.h. es werden die grundsätzliche Mess- und Steuerbarkeit der STI untersucht.

Dieser Artikel befasst sich daran anschließend mit der experimentellen Untersuchung der Steuerung eines Balkens. Der Fokus wird auf die Steuerung laufender Wellen gelegt, wobei als Fehlersignal zweimal die Strukturintensität und als Vergleich ein Beschleunigungssignal verwendet wird. Anschließend werden numerische Untersuchungen zur Steuerung der STI einer inhomogen gedämpften Platte vorgestellt.

STI-Steuerung eines Balkens

Experimenteller Aufbau

Die Steuerung der Strukturintensität wird an einem Stahlbalken ($B \times H \times T = 1000 \times 40 \times 3 \text{ mm}$) mit zwei Konfigurationen von Randbedingungen untersucht. Konfiguration I (Abbildung 1) ist ein einseitig fest eingespannter Kragbalken. Die Störkraftanregung P erfolgt mithilfe eines elektrodynamischen Shakers (LDS V201) am freien Ende. Die Steuerkraft S wird über einen Inertialshaker (VISATON Ex45s) eingebracht.

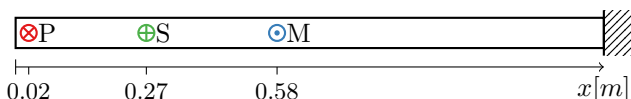


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau zur Steuerung der Strukturintensität, Konfiguration I: Kragbalken mit Störkraft P , Steuerkraft S und Sensorarray M , Sensorabstand $\Delta = 2 \text{ cm}$

Konfiguration II (Abbildung 2) dient der Untersuchung der Steuerung laufender Wellen. Um diese zu erhalten, wird der Balken inhomogen gedämpft. Die Dämpfung erfolgt durch einen Sandbehälter am freien Ende des Bal-

kens. Die Störkraft wird kurz hinter der Einspannung eingeleitet.

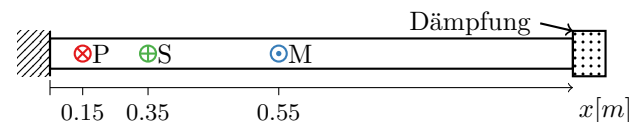


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau zur Steuerung der Strukturintensität, Konfiguration II: Inhomogen gedämpfter Balken mit Störkraft P , Steuerkraft S und Sensorarray M , Sensorabstand $\Delta = 2 \text{ cm}$

Für die Messung der Strukturintensität werden für jede Konfiguration zwei Finite-Differenzen-Verfahren gewählt: Ein Messverfahren vernachlässigt die Nahfeldanteile und ermittelt nur den Momentenanteil der STI mit nur zwei Beschleunigungssensoren (2FD) (PCB 352A24/NC) [4]. Als zweites Verfahren wird die STI-Messung mit vier Beschleunigungssensoren (4FD) untersucht, welches alle Energieanteile des Körperschalls in einer Balkenstruktur in Betracht zieht [5]. Die Messung der Beschleunigung direkt in der Mitte der Messposition erfolgt über einen zusätzlichen Beschleunigungssensor (ACC).

Auslegung der Steuerung

Die Steuerung erfolgt mithilfe eines optimalen Wiener Filters. Auf Grundlage der gemessenen Transferfunktionen der Beschleunigungsaufnehmer werden die STI-Transferfunktionen bestimmt und entsprechende Zeitsignale für die jeweiligen Messverfahren konstruiert. Als Referenzsignal dient die Primärkraft. Die Auslegung des Filters erfolgt wie in [3] beschrieben. Dabei werden die Komponenten der Strukturintensität einzeln gesteuert, um die Linearität der Signale in Bezug auf die Referenz zu erhalten [1].

Als Störanregung werden verschiedene tonale Anregungen gewählt. Für Konfiguration I wird der Balken in einer Resonanzfrequenz ($127,5 \text{ Hz}$) sowie außerhalb der Resonanz (210 Hz) angeregt. Für Konfiguration II wird eine Frequenz gewählt, bei der es zu signifikanter Ausprägung einer laufenden Welle kommt ($763,5 \text{ Hz}$).

Messergebnisse

Zur Auswertung der Balkenschwingungen im gesteuerten und ungesteuerten Zustand werden die Schnellen an diskreten Punkten (1 cm Schritte) in der Balkenmitte mithilfe eines Laser-Scanning-Vibrometers (POLYTEC OFV 055) gemessen. Über die gemessenen Transferfunktionen ist zudem eine Approximation der Strukturintensität nach [5] möglich.

Abbildung 3 zeigt die Schnelleamplitude für die resonante Anregung des Kragbalkens. Es wird ersichtlich, dass eine globale Absenkung der Schnelle von ca. 9dB möglich ist, jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Steuerungsmethoden besteht. Eine Ein-Punkt-Steuerung der Beschleunigung zeigt eine ähnliche globale Schnelle-reduktion wie eine Steuerung der Strukturintensität.

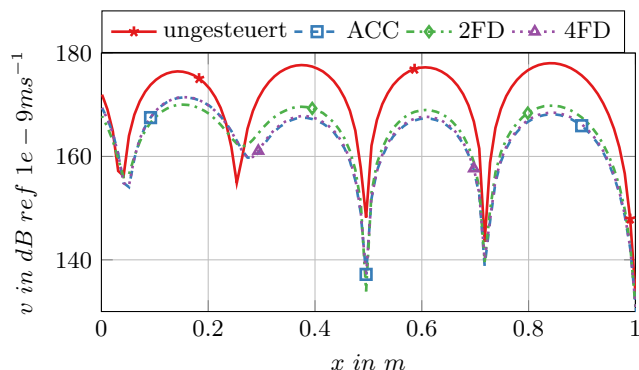


Abbildung 3: Gemessener Schnellepegel über Balkenlänge, Konfiguration I, Anregung in Resonanz ($127,5\text{Hz}$)

Im Vergleich mit den Ergebnissen der Anregung außerhalb einer Resonanz in Abbildung 4 werden Unterschiede in der globalen Reduktion der Schnelle deutlich. Die Beschleunigungssteuerung zeigt eine nur geringe Reduktion von etwa 2dB . Durch Steuerung der STI wird eine Reduktion von ca. 12dB erreicht.

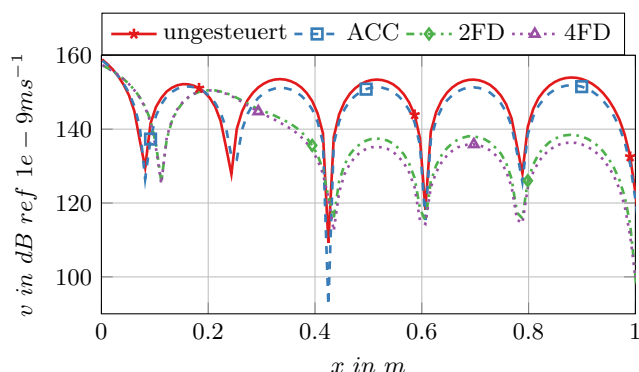


Abbildung 4: Gemessener Schnellepegel über Balkenlänge, Konfiguration I, Anregung außerhalb Resonanz (210Hz)

Konfiguration II zeigt entsprechend der Annahmen keine Dominanz einer Eigenform im ungesteuerten Fall und es kann von einer laufenden Welle ausgegangen werden. Abbildung 5 zeigt die Schnelleverteilung. Das 4-Positions-Verfahren zeigt hier eine ähnliche Performance in Bezug auf die Schnelleabsenkung wie die Steuerung der Beschleunigung. Die 2FD-Steuerung zeigt eine um etwa 4dB bessere Absenkung der Schnelleamplituden der Schwingungsbäuche.

Fazit

Die experimentellen Untersuchungen zur Steuerung eines Balkens auf Basis der STI im Vergleich zu einer Ein-Punkt-Beschleunigungssteuerung zeigen qualitative ähnliche Ergebnisse wie die numerischen Vorbetrach-

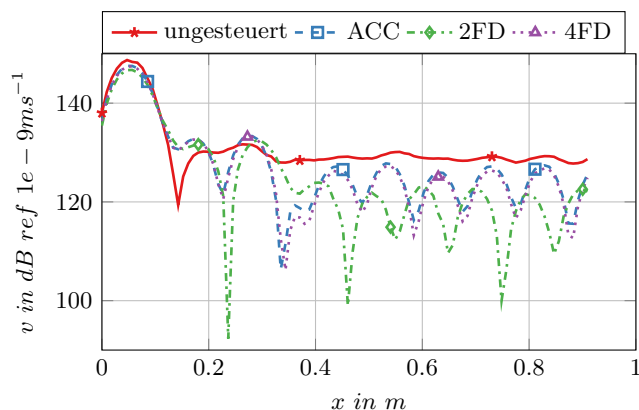


Abbildung 5: Gemessener Schnellepegel über Balkenlänge, Konfiguration II, Anregung außerhalb Resonanz ($763,5\text{Hz}$)

tungen. Eine STI-Steuerung zeigt bei stärkerem Laufanteil der Wellen eine leicht bessere Performance. Bei resonanter Anregung zeigt sich kein Vorteil der STI-Steuerung zur Beschleunigungssteuerung. Zu beachten ist hier jedoch vor allem die im Vergleich zur 2FD-Steuerung schlechte Performance der 4FD-Steuerung. Dies ist möglicherweise auf die starke Fehleranfälligkeit der zugrundeliegenden finiten Differenzen dritter Ordnung zurückzuführen, welche bereits in den numerischen Vorbetrachtungen bei Phasenfehlern zwischen den Sensoren (z.B. aufgrund ungenauer Einhaltung der Sensorabstände) zu erheblichen Abweichungen geführt haben. Das 2FD-Verfahren zeigte sich hier deutlich robuster, was auch mit den vorliegenden Messergebnissen gezeigt werden konnte. Die theoretisch höhere Genauigkeit des 4FD-Verfahrens ist in der Praxis aufgrund von realen Messbedingungen also bereits an einem Balken nicht ausnutzbar. Zusammenfassend ist jedoch ebenfalls erkenntlich, dass zumindest für eine eindimensionale Struktur kein eindeutiger Vorteil einer STI-Steuerung nachweisbar ist.

STI-Steuerung einer Platte

Plattenmodell

Im Folgenden soll die Steuerung der Vibration einer inhomogen gedämpften Aluminiumplatte untersucht werden. Die Platte mit den Dimensionen $B \times H \times T = 1200 \times 1000 \times 3\text{mm}$ wird dabei an zwei aneinander anliegenden Rändern gedämpft und durch zwei Punktkräfte angeregt (Abbildung 6). Die Modellierung erfolgt in ANSYS® mit SHELL281 Elementen (Elementlänge 10mm). Die Platte ist an allen Rändern frei gelagert. Es wird eine konstante modale Dämpfung von 30% für die stark gedämpften Randbereiche angenommen.

Die Steuerung der Plattenschwingung erfolgt mithilfe vier verschiedener Verfahren:

- Schnellesteuerung
- STI über 2FD in x-Richtung
- STI über 4FD in x-Richtung
- STI über 12FD zweidimensional

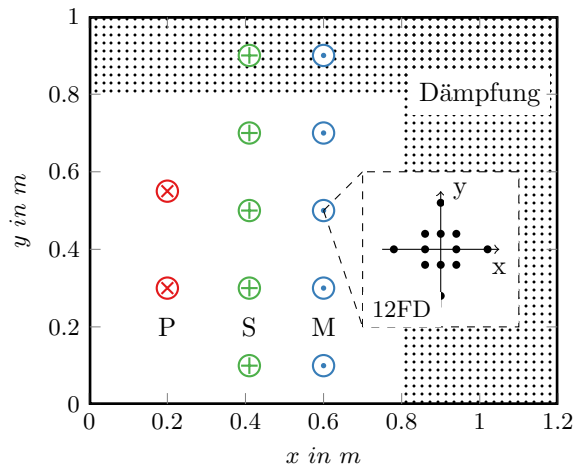


Abbildung 6: Modell einer inhomogen gedämpften Platte zur Steuerung der Strukturintensität mit Störkräften P , Steuerkraftpaaren S und Sensorarrays M , Sensorabstand $\Delta = 2\text{cm}$

Die Beschränkung der reduzierten Verfahren (2FD, 4FD) gründet dabei auf der Annahme, dass die STI-Anteile quer zur x -Richtung bei Steuerung der übrigen Komponenten zu keinem Energietransfer über den Messbereich $x = 0,6\text{m}$ hinaus beitragen. Weiterhin werden die Drillmomente und die sich daraus ergebenden Anteile der STI für die beiden Verfahren vernachlässigt, sodass die Platte in "Balkenstreifen" unterteilt wird.

Die jeweiligen Steuergrößen werden an fünf äquidistant angeordneten Messstellen bei $x = 0,6\text{m}$ ermittelt. Die Sekundärkräfteinleitung erfolgt über fünf Kräftepaare ($\Delta_x = 2\text{cm}$, $\Delta_y = 0\text{cm}$), um sowohl Querkräfte als auch Momente aktuieren zu können (Abbildung 6). Die STI-Messung mit 2FD bzw 4FD-Verfahren erfolgt analog zu dem zuvor vorgestellten Verfahren bei der Balkensteuerung. Das Sensorarray zur Bestimmung der zweidimensionalen Strukturintensität basiert dabei ebenfalls auf [5]. Aus der Plattentheorie folgt neben dem für den Balken schon betrachteten Querschnittsgrößen Querkraft und Biegemoment noch ein weiteres Moment, das Drillmoment, welches in die Berechnung der STI einbezogen werden muss. Für dieses ist die Berechnung einer gemischten örtlichen Ableitung $\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ notwendig, weshalb auch das Sensorarray um vier Sensoren in y -Richtung erweitert werden muss. Für den Fall der Berechnung der STI im zweidimensionalen ergibt sich somit ein Array von 12 Sensoren für eine Messstelle (12FD in Abbildung 6).

Berechnungsergebnisse

Im folgenden Abschnitt sollen die numerisch ermittelten Ergebnisse der gesteuerten Platte gezeigt werden. Die Bewertung erfolgt dabei auf Basis der Strukturintensität sowie auch der Schnelle. Die für die Berechnung der STI notwendigen Querschnitts- und Bewegungsgrößen werden dabei direkt aus den Elementen des FE-Modells entnommen.

Abbildung 7 zeigt die Reduktion der quadratisch ge-

mittelten Schnelleamplitude in Bezug auf die ungesteuerte Referenz. Dabei wurden die Schnellen über alle Elemente hinter der Messposition (*Barrierebereich*, d.h. $x > 0,6\text{m}$) betrachtet. Die gewählten tonalen Anregungen entsprechen hier eine Resonanzfrequenz ($117,7\text{Hz}$), eine Frequenz außerhalb der Resonanz (125Hz) sowie zwei Frequenzen bei starker Ausprägung laufender Wellen ($773,8\text{Hz}$ und 792Hz).

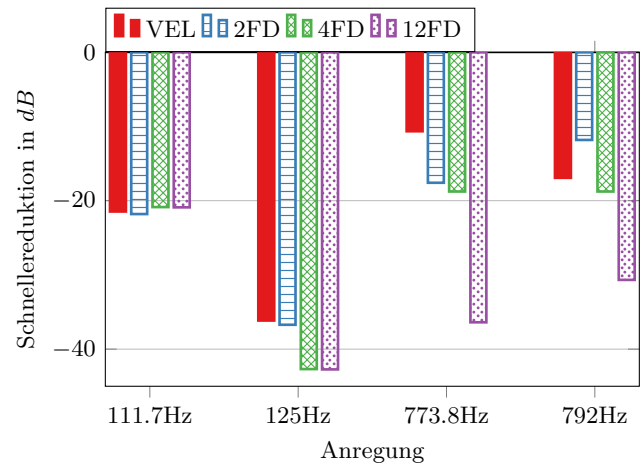


Abbildung 7: Quadratisch gemittelte Schnellepegelreduktion relativ zum ungesteuerten Schnellepegel im Barrierebereich der Platte $x > 0,6\text{m}$

Die Schnellepegelreduktion im Barrierebereich zeigt einen deutlichen Vorteil der STI-Steuerung gegenüber der Schnellesteuerung bei steigender Frequenz. Für die resonante Anregung bei $111,7\text{Hz}$ ist der Unterschied unter 1dB . Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass sich bei dieser Frequenz noch keine laufenden Wellen ausgebildet haben und somit auch analog zur Betrachtung im 1D-Fall keine Performanceverbesserung zu erwarten ist. Mit steigendem Anteil laufender Wellen bei hohen Frequenzen steigt die Schnellepegelreduktion durch die STI-Steuerung jedoch im Vergleich zur Schnellesteuerung. Ebenfalls kann vermutet werden, dass die Vernachlässigung der Drillmomente (Vgl. 4FD zu 12FD) bei hohen Frequenzen ebenfalls zu einem Performanceverlust der Steuerung führt. Der Einfluss vom Abstand und Anzahl der Messstellen auf den Energietransfer muss dabei noch untersucht werden.

Abbildungen 8 und 9 zeigen den reduzierte Wirkleistungspegel respektive den Schnellepegel jeweils im Vergleich zur ungesteuerten Plattenschwingung, exemplarisch für die Schnellesteuerung und die Steuerung mithilfe des 12FD-Verfahrens bei einer Frequenz von 792Hz . Es wird eine deutliche Absenkung des Wirkanteils der Strukturintensität im Barrierebereich $x > 0,6\text{m}$ deutlich, was sich entsprechend den Erwartungen ebenfalls in einer globalen Absenkung der Schnelleamplituden auswirkt. Eine reine Schnellesteuerung führt nur zu einer lokalen Reduktion der Schnellen.

Fazit

Entsprechend der numerischen und experimentellen Vor-betrachtungen für den eindimensionalen Fall konnte auch

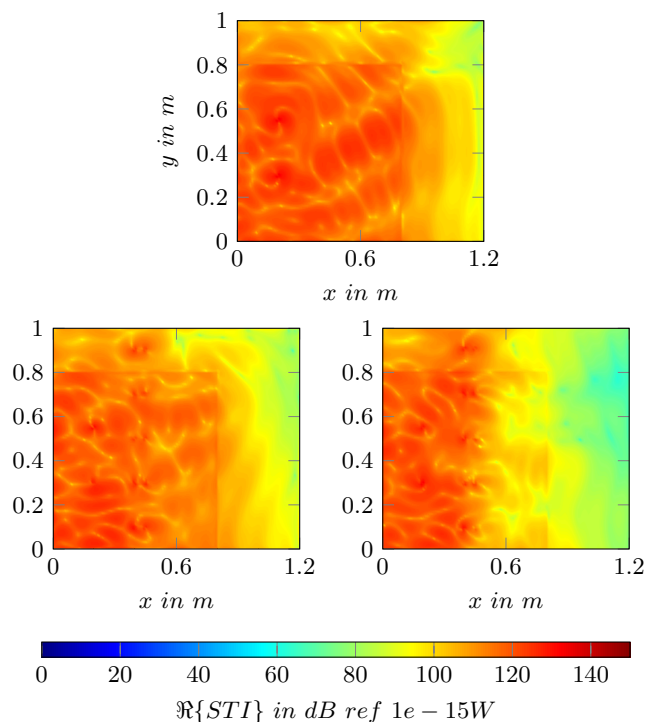


Abbildung 8: Wirkintensitätspegel der gedämpften Platte, Anregung mit 792Hz , oben: ungesteuerte Vibration, links: Steuerung der lokalen Schnellen, rechts: Steuerung mit 12FD-Verfahren

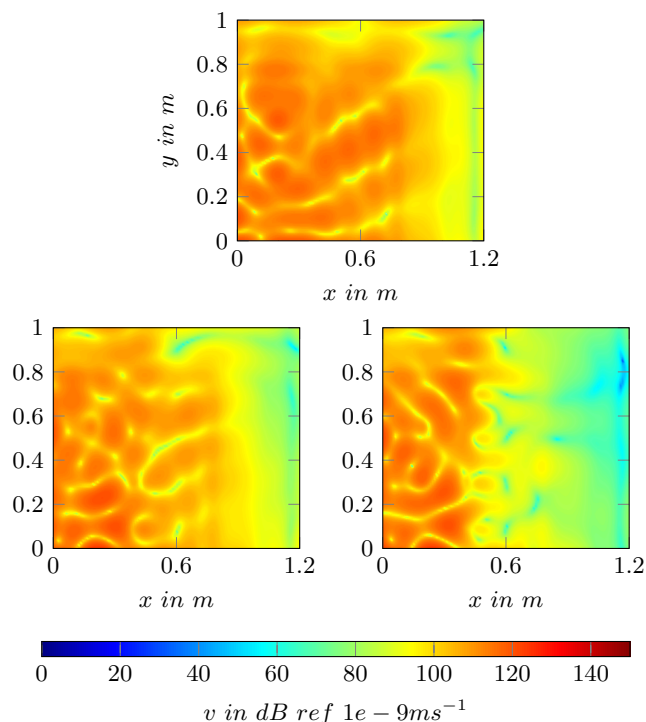


Abbildung 9: Schnellepegel der gedämpften Platte, Anregung mit 792Hz , oben: ungesteuerte Vibration, links: Steuerung der lokalen Schnellen, rechts: Steuerung mit 12FD-Verfahren

für eine inhomogen gedämpfte Platte numerisch ein Vorteil der STI-Steuerung gegenüber konventioneller Schnellesteuerung gezeigt werden. Dabei wurde gezeigt, dass

eine Vereinfachung der Platte in Balkensegmente keine hinreichend genaue Messung der STI ermöglicht.

Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Experimente zur Steuerung der STI eines Balkens haben die numerischen Vorbetrachtungen in Teilen bestätigt. Die Strukturintensität als Steuergröße bietet tendenziell einen geringen Vorteil gegenüber konventionellen Methoden, sofern die laufenden Wellenanteile dominieren. Eine klare Verbesserung der Vibrationsreduktion konnte für den 1D-Fall jedoch nicht nachgewiesen werden, bedingt durch die Fehleranfälligkeit des 4D-Verfahrens. Weiterhin ist eine globale Beruhigung einer 1D-Struktur auch mit Steuerung der Beschleunigung an einer Messstelle möglich.

Für den numerisch untersuchten Fall einer inhomogen gedämpften Platte mit laufenden Wellen zeigte sich ebenfalls, dass eine STI-Steuerung zu einer Reduktion des Energieflusses führt. Eine Schnellesteuerung hingegen bietet nur lokale Reduktion. Zu beachten ist hierbei, dass die Ermittlung der gemischten Anteile wie im 12FD-Verfahren notwendig ist, um den Barriereeffekt zu erreichen. Vereinfachungen zur Messung der Anteile müssen noch bewertet werden.

Anschließend an diese Arbeiten sollend die Messung und Steuerung der STI einer Platte in verschiedenen Konfigurationen experimentell untersucht werden. Weitere Strukturen, insbesondere versteifte, müssen betrachtet werden. Ebenso ist die notwendige Anzahl an Mess- und Steuerstellen für eine Körperschallbarriere zu ermitteln und eine Bewertung anderer Sensortypen (z.B. DMS) durchzuführen.

Literatur

- [1] 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
- [2] Haase, T., Kokott, A., Monner, H.P.: Entwicklung einer Körperschallbarriere basierend auf der Strukturintensität, *DAGA 2018*, 1243-1246, 2018
- [3] 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
- [4] Noiseux, D.U.: Measurement of power flow in uniform beams and plates, *The Journal of the Acoustical Society of America* 47 (1970), 238-247
- [5] Pavić, G.: Measurement of structure borne wave intensity, Part I: Formulation of methods, *Journal of Sound and Vibration* 49 (1976), 221-230