

Untersuchungen zur breitbandigen Reduktion der abgestrahlten Schalleistung mit Hilfe der Strukturintensität

Sebastian Rothe¹, Julian Redeker¹, Sabine C. Langer¹

¹ *Institut für Konstruktionstechnik, 38106 Braunschweig Deutschland,*

Email: sebastian.rothe@tu-braunschweig.de

Einleitung

Eine wesentliche Herausforderung beim Lärmarmen Konstruieren ist die intelligente Platzierung konstruktiver Maßnahmen. Neben dem Aufbringen dämpfender Beläge oder der Integration passiver sowie aktiver Dämpfer, ist das Einbringen von Versteifungsmaßnahmen (z.B. Rippen und Sicken) eine effektive Möglichkeit, die Schallweiterleitung und Schallabstrahlung insbesondere flächiger Strukturen zu vermindern. Zur Identifikation von geeigneten Bereichen zur Applikation von Versteifungsmaßnahmen ist eine Bewertungsgröße auf Grundlage der Verteilung mechanischen Größen (z.B. Spannung, Oberflächenschnelle) in der betrachteten Konstruktion wünschenswert. Wenngleich hierzu einige Ansätze in der Literatur zu finden sind, fehlt bisher eine prognosesichere physikalische Identifikationsgröße.

Aktuelle Ansätze, welche die Strukturintensität (STI) als Basisgröße heranziehen, sollen hier näher untersucht werden. Mit der STI, einer komplexen vektoriellen Größe, lässt sich die Körperschallausbreitung in einer Struktur beschreiben. Durch die Charakterisierung der Energieflussdichte und -richtung konnte bereits gezeigt werden, dass sich versteifende Strukturänderungen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Körperschallverhalten bewerten lassen [1, 2, 3]. Das Ziel bestand vor allem darin, monofrequent oder für einzelne Moden die Schalleistung zu reduzieren. Dieser Beitrag greift die Erkenntnisse des Stands der Technik auf und untersucht, speziell in Hinblick auf eine größere Anwendungsrelevanz, eine gezielte multifrequente Körperschalldämmung in definierten Frequenzbereichen. Untersuchungsgegenstand ist eine Rechteckplatte, die auf Basis der Verteilung der aktiven STI analysiert und verändert wird. Ziel ist die breitbandige Reduktion der abgestrahlten Schalleistung.

Strukturintensität als Identifikationsgröße

Um die abgestrahlte Schalleistung breitbandig reduzieren zu können, soll eine Trapezsicke, als praxisrelevante massenneutrale Versteifungsmaßnahme, auf einer punkterregten Rechteckplatte platziert werden. Eine schematische Darstellung des betrachteten Systems ist in Abbildung 1 gezeigt. Die Platte wird am Punkt (x_0, y_0) mit der Kraft $F = 1\text{ N}$ im Frequenzbereich von $20 - 1000\text{ Hz}$ harmonisch angeregt.

Die Sicke wird hierzu in ihrer Länge, Breite und Höhe sowie ihrer Position (x, y) und Winkellorientierung (ϕ) auf der Platte variiert. Die Lösung des mechanischen Problems erfolgt mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode.

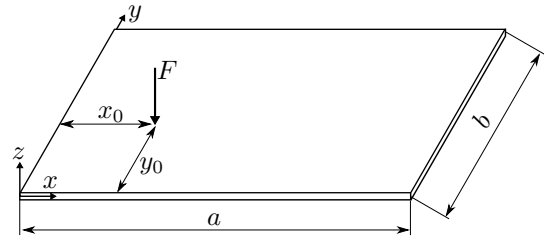


Abbildung 1: Schematische Darstellung der untersuchten Rechteckplatte.

Zur Identifikation geeigneter Orte für die Platzierung der Strukturänderungen wird die STI \vec{I} als Größe herangezogen. Sie beschreibt den Körperschallenergiefluss in Strukturen, der sich als Produkt aus dem komplexen Spannungstensor $\underline{\mathbf{S}}$ und dem komplex konjugiertem Schnellektor \vec{v}^* ergibt [4]

$$\vec{I} = -\frac{1}{2} \underline{\mathbf{S}} \cdot \vec{v}^* \quad . \quad (1)$$

Für die hier untersuchten dünnwandigen Strukturen kann der Energiefluss in Dickenrichtung vernachlässigt werden [1]. Ferner wird die über die Plattendicke integrierte STI betrachtet, was im Frequenzbereich dem Kreuzleistungsspektrum der Schnittgrößen entspricht [5, 6]. Es ergibt sich eine komplexwertige vektorielle Größe. Betrachtet wird hier nur der Realteil der STI $Re\{\vec{I}\}$, die sogenannte aktive STI, die den Leistungsfluss von einer Quelle zur Senke beschreibt (Wirkleistung) [4]. In den hier vorgestellten Untersuchungen wird ausschließlich die sich aufgrund der Werkstoffdämpfung einstellende Wirkleistung betrachtet. In der Literatur finden sich einige Arbeiten, die zeigen, dass die Positionierung von Versteifungsmaßnahmen an Orten hoher Flussdichte (Betrag der aktiven STI) einen positiven Effekt auf die abgestrahlte Schalleistung bewirken kann [1, 2, 7, 8, 9]. Hierbei wird das Schwingsystem vornehmlich monofrequent bzw. modal betrachtet.

Fokus der Untersuchungen im vorliegenden Beitrag ist die gezielte multifrequente Beeinflussung der Körperschallpfade. Ziel ist eine Homogenisierung der Energieverteilung zur effizienten Dissipation der Körperschallenergie mit dem vorhandenen Material. Als zusätzliche Bedingung wird eine konstante modale Dichte im untersuchten Frequenzbereich festgelegt und eine Strukturmodifikation abseits der Energieeinleitung gefordert. Zudem wird die aktive STI mit der sich ändernden Eingangsleistung gewichtet. Die betrachteten

Größen werden jeweils im interessierenden Frequenzbereich aufsummiert. Abschließend wird die abgestrahlte Schalleistung der unterschiedlich versteiften Varianten über das Rayleigh-Integral berechnet und mit der der Referenzplatte (ohne Sicke) verglichen.

Ergebnisse der Sensitivitätsstudien

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen exemplarische Ergebnisse der Studie. In der Verteilung der Flussdichte bei Variante A, C und D wird das klassische Dämmverhalten durch die eingebrachte Sicke deutlich. Dem gegenüber zeigt Variante B, dass versteifende Maßnahmen eine energieleitende Wirkung zeigen und es zu einer erhöhten Konzentration der STI kommt, insbesondere wenn die Versteifungsmaßnahmen in Hauptflussrichtung platziert werden. Zudem ist bei Variante C und D eine klare Einflussmöglichkeit auf die Hauptflussrichtung ersichtlich. Qualitativ kann bei diesen Varianten eine homogenere Körperschallenergieverteilung festgestellt werden. Die genannten Phänomene verstärken sich mit Erhöhung der Biegesteifigkeit (Sickenhöhe).

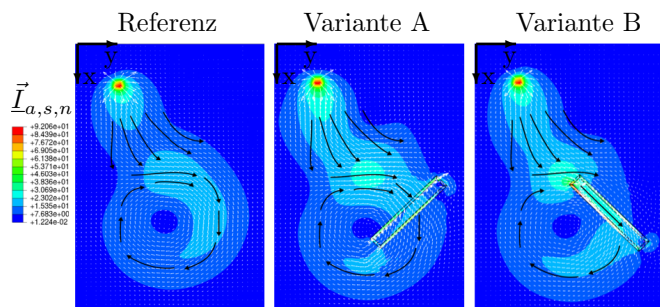


Abbildung 2: Verlauf der von 200 – 400 Hz (3 Moden) aufsummierten und mit der Eingangsleistung gewichteten aktiven STI $\vec{I}_{a,s,n}$ für unterschiedliche Konstruktionsvarianten.

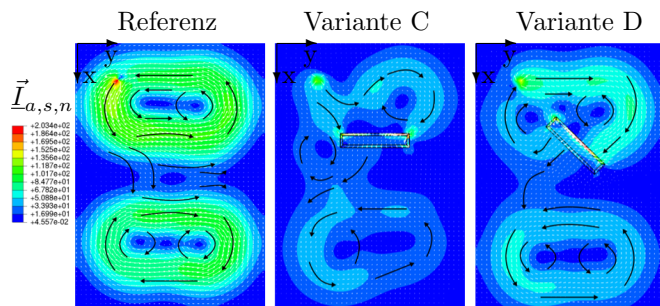


Abbildung 3: Verlauf der von 600 – 800 Hz (4 Moden) aufsummierten und mit der Eingangsleistung gewichteten aktiven STI $\vec{I}_{a,s,n}$ für unterschiedliche Konstruktionsvarianten.

Der Vergleich der abgestrahlten Schalleistung (siehe Abbildungen 4 und 5) zeigt in den beispielhaften Frequenzbereichen, dass entgegen der Vermutung einer Reduktion der Schalleistung bei homogenerer Energieverteilung fast immer eine Erhöhung dieser vorliegt. Die Ausnahme ist die 135°-orientierte Sicke im zweiten Frequenzbereich (Abbildung 5), welche die Schalleistung ab einer Sickenhöhe $h_S = 4\text{ mm}$ leicht senken kann.

Ein exemplarischer Blick auf die in den Schwingungsmo-

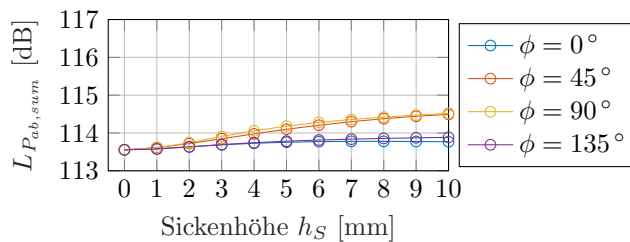


Abbildung 4: Vergleich des abgestrahlten Schalleistungssummenpegels $L_{P_{ab,sum}}$ von 200–400 Hz für eine $(\lambda_{400\text{ Hz}}/4)$ -lange Sicke für unterschiedliche Orientierungswinkel ϕ in Abhängigkeit der Sickenhöhe h_S .

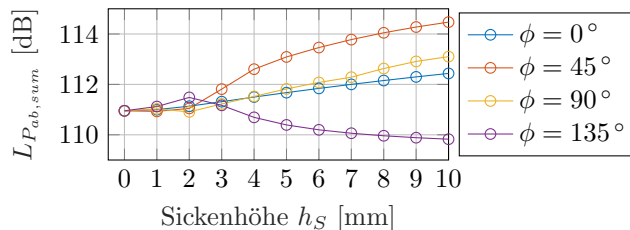


Abbildung 5: Vergleich des abgestrahlten Schalleistungssummenpegels $L_{P_{ab,sum}}$ von 600–800 Hz für eine $(\lambda_{800\text{ Hz}}/2)$ -lange Sicke für unterschiedliche Orientierungswinkel ϕ in Abhängigkeit der Sickenhöhe h_S .

den im Frequenzbereich zwischen 200 – 400 Hz eingespeiste (P_{in}) und abgestrahlte Leistung (P_{ab}) zeigt, dass eine Energieumverteilung zwischen den Moden stattfindet (siehe Abbildung 6).

In zwei Moden wird die eingespeiste und abgestrahlte Leistung reduziert (zweite und dritte Mode), während diese jeweils in der ersten Mode verstärkt werden. Dieses Verhalten, wie auch die zuvor genannten Phänomene, sind besonders auf modaler Ebene bereits in der Literatur diskutiert worden und zeigen die beschränkte Anwendbarkeit der aktiven STI als Identifikationsgröße zur Versteifungspositionierung.

Es stellt sich allerdings die Frage, ob durch die Annahme einer konstanten Kräfteanregung über alle Variationen hinaus ein fairer Vergleich durchgeführt werden kann oder ob nicht vielmehr eine vollständige Leistungsbetrachtung nötig ist. Durch eingebrachte Strukturänderungen wird die Eingangsadmittanz verändert und somit - trotz konstanter Kräfteanregung - die in das System eingespeiste Energie. Um demnach eine korrekte Bewertung der Varianten vornehmen zu können, müssen die Eingangs- und Ausgangsleistungen auf einander bezogen werden. Der nachfolgende Abschnitt soll diese Überlegungen grundlegend diskutieren.

Energetische Bewertung von Konstruktionsvarianten

Eine energetisch korrekte Bewertung ist streng genommen nur möglich, wenn die abgestrahlte Schalleistung mit der eingespeisten Leistung ins Verhältnis gesetzt wird. Hierzu sollen zwei Hypothesen formuliert werden:

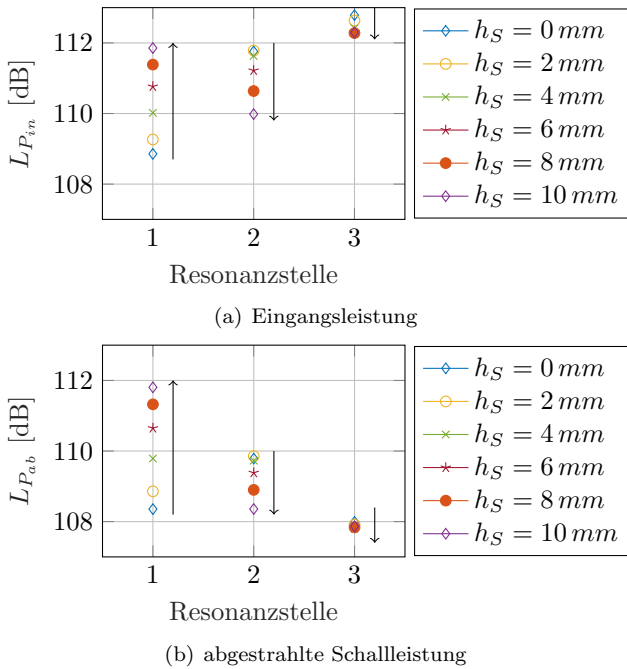


Abbildung 6: Vergleich des abgestrahlten Schalleistungspegels mit dem Eingangsleistungspegel in den Moden von 200 – 400 Hz für eine $(\lambda_{400 \text{ Hz}}/4)$ -lange Sicke für unterschiedliche Sickenhöhen h_S .

Hypothese I Sollen unterschiedliche Konstruktionsvarianten punkterregter plattenförmiger Strukturen vibroakustisch korrekt bewertet werden, muss eine vollständige Leistungsbetrachtung durchgeführt werden.

Hypothese II Neben den Wirkleistungen ist die Größe der Eingangsblindleistung entscheidend für die akustische Qualität einer Konstruktionsvariante.

Um diese Hypothesen an einem Beispiel zu untersuchen, sollen zwei Varianten miteinander verglichen werden, die am selben Ort mit der selben Kraftamplitude angeregt werden. Strahlen sie nun beide die gleiche Schalleistung ab, so sollte die Variante als akustisch besser bewertet werden, welche die größere Blindleistung aufweist.

Als Bewertungsgröße wird hier der *akustische Kapazitätsgrad* vorgeschlagen, der durch Gleichung (2) berechnet werden kann

$$\Psi = 1 - \frac{P_{ab}}{P_{in,s}} \quad (2)$$

Verglichen mit dem Strahlungswirkungsgrad wird hier die abgestrahlte Schalleistung P_{ab} nicht auf den Wirkleistungsanteil am Eingang – der Eingangsleistung – d.h. dem Realteil des Produktes aus komplexem Kraftvektor \vec{F} und komplex konjugierter Schnelle am Anregungspunkt \vec{v}_{in}^* [4]

$$P_{in} = \text{Re}\{\vec{F} \cdot \vec{v}_{in}^*\} \quad (3)$$

sondern auf den Absolutwert der Eingangsscheinleistung $P_{in,s}$ bezogen

$$P_{in,s} = \sqrt{\text{Re}\{\vec{F} \cdot \vec{v}_{in}^*\}^2 + \text{Im}\{\vec{F} \cdot \vec{v}_{in}^*\}^2} \quad (4)$$

Es ergibt sich zwangsläufig ein Wert zwischen 0 und 1. Um dem Begriff gerecht zu werden und ein größerer Wert Ψ einen größeren Kapazitätsgrad repräsentiert, wird das Verhältnis der beiden Leistungen von 1 subtrahiert.

Ein Gedankenexperiment in der komplexen Zahlenebene zeigt, dass mit dieser Formulierung nicht nur die Realteile der Leistungen berücksichtigt werden, sondern die Länge des Zeigers (Absolutwert der Scheinleistung) und damit der Blindanteil zusätzlich bewertet wird. Mit dem Strahlungswirkungsgrad würde sich für die in Abbildung 7 gezeigten Varianten jeweils der gleiche Strahlungswirkungsgrad ergeben, wenn die Schallabstrahlung im Fluid die einzige Energiesenke darstellt. Mit dem akustischen Kapazitätsgrad dagegen wird die Variante 2 als akustisch besser bewertet. Sie kann - äquivalent zum elektrischen Kondensator - mehr Energie kapazitiv im System speichern, ohne sie abzustrahlen. Es muss wesentlich mehr Scheinleistung ins System eingebracht werden, um die gleiche Schalleistung abzustrahlen wie in Variante 1.

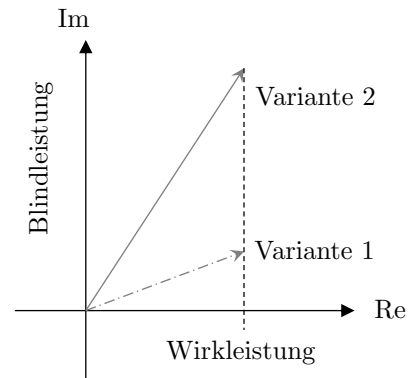


Abbildung 7: Leistungszusammensetzung zweier Konstruktionsvarianten in der komplexen Zahlenebene.

Soll eine Konstruktion breitbandig bewertet werden, müssen die Leistungsgrößen in dem interessierenden Frequenzbereich $[f_{min} - f_{max}]$ aufsummiert werden

$$\Psi_{sum} = 1 - \frac{\sum_{f_{min}}^{f_{max}} P_{ab}}{\sum_{f_{min}}^{f_{max}} P_{in,s}} \quad (5)$$

Ein Beispiel an der in Abbildung 1 gezeigten Rechteckplatte soll die Anwendung der Größe verdeutlichen. Die Platte wird in den Varianten mit einer homogen verteilten Plattendicke von 1 mm und 3 mm verglichen. Ziel ist in einem bestimmten Frequenzbereich die Variante zu identifizieren, welche die geringste Neigung zur Schallabstrahlung aufweist, d.h. eine hohe kapazitive Eigenschaft besitzt Körperschallenergie zu speichern, diese aber nicht abzustrahlen.

Intuitiv würde sich der Akustiker für die 3 mm Platte im gesamten Frequenzbereich entscheiden. Der Verlauf der abgestrahlten Summenschalleistung $P_{ab,sum}$ bestätigt diese Vermutung in fast jeden Frequenzband (siehe Abbildung 8). Nur im 4. Band zwischen 300 und 400 Hz schiebt sich eine sehr abstrahlrelevante Mode in den Frequenzbereich und führt zu einer Erhöhung von $P_{ab,sum}$ im Vergleich zum Referenzmodell (Platte mit $h = 1 \text{ mm}$).

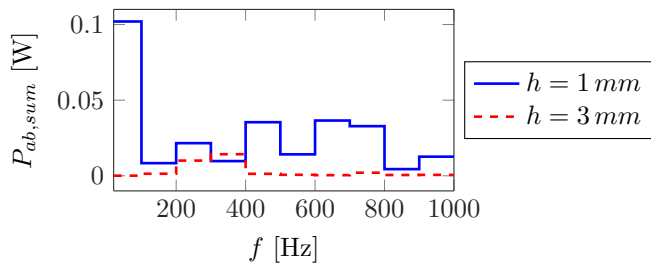


Abbildung 8: Vergleich des abgestrahlten Schalleistungsummens in 100 Hz Frequenzbändern.

Werden nun die akustischen Summenkapazitätsgrade Ψ_{sum} für die einzelnen Frequenzbänder berechnet wird deutlich (vgl. Abbildung 9), dass die 1 mm-Variante im 2., 4., 8., 9. und 10. Frequenzband aufgrund des Leistungsverhältnisses bzw. ihrer größeren kapazitiven Wirkung zu bevorzugen ist.

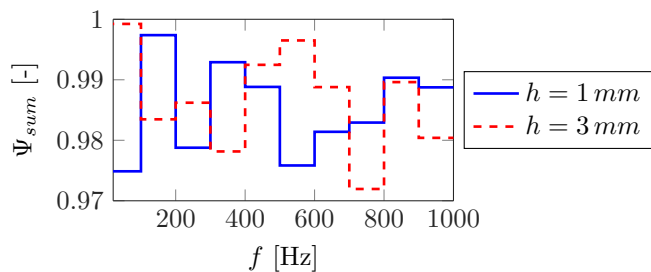


Abbildung 9: Vergleich des akustischen Summenkapazitätsgrads in 100 Hz Frequenzbändern.

Ob diese Varianten wirklich eine höhere akustische Qualität bzgl. des Körperschalls (z.B. Speicherwirkung, effiziente Dissipation) im betrachteten Frequenzbereich besitzen und damit in erster Linie **Hypothese II** genügen, kann mit diesem Beispiel nicht bewiesen werden. Es lässt die Frage offen, ob die kapazitive Wirkung eines Systems unberücksichtigt bleiben sollte oder ob diese nicht entscheidend dafür ist, wie effizient z.B. passive Dämpfungsmaßnahmen in einer Struktur wirken. Das Beispiel zeigt aber eindeutig, dass wenn sich die **Hypothese II** in weiteren Studien belegen lässt, sich ein unterschiedliches Bewertungsbild ergeben würde.

Die **Hypothese I** kann ebenfalls nicht abschließend bewiesen werden, sie ist allerdings eine logische Schlussfolgerung bei Betrachtungen mit der STI. Es werden Leistungsflüsse in der Struktur analysiert, um durch Strukturmodifikationen die abgestrahlte Schalleistung zu reduzieren. Erst die Berücksichtigung der sich dadurch ändernden Eingangsleistung bei der Bewertung der Varianten komplettiert die Leistungsbetrachtung und lässt eine energetisch korrekte Aussage zu.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Studien zur breitbandigen Reduktion der abgestrahlten Schalleistung einer Rechteckplatte durch eine gezielte Sickenplatzierung auf Basis der STI haben einige Phänomene der in der Literatur zu findenden mo-

nofrequenten und modalen Untersuchungen bestätigt. So ist die Dämmung des Körperschalls durch eine Versteifungsmaßnahme auch breitbandig möglich. Ebenso lässt sich der Hauptenergiefluss beeinflussen und die Körperschallenergie homogener verteilen.

Wird die abgestrahlte Schalleistung als Bewertungsgröße der Konstruktionsvarianten herangezogen, zeigt sich in vielen Fällen eine Verschlechterung der akustischen Qualität durch das Aufbringen einer Sicke. In Hinblick auf die eingespeiste Leistung wird deutlich, dass sich diese durch die sich verändernde Eingangsadmittanz im jeweiligen Frequenzbereich stark ändert. Es wird daher eine ganzheitliche Leistungsbewertung für eine energetisch korrekte Bewertung vorgeschlagen. Diese wird anhand zweier Hypothesen formuliert.

Zur Untersuchung dieser Hypothesen wird eine neue Größe, der akustische Kapazitätsgrad, definiert. Diese berücksichtigt nicht nur die Wirkleistungen des Systems, sondern zusätzlich die Eingangsblindleistung.

In weiteren Arbeiten, soll insbesondere das Potential einer größeren akustisch kapazitiven Neigung eines Systems analysiert werden. Ziel ist es, die formulierten Hypothesen zu beweisen und damit Strukturänderungen auf Grundlage der STI energetisch korrekt bewerten zu können.

Literatur

- [1] Hering, T.: Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik. Dissertation - TU Darmstadt (2012)
- [2] Schaal, C. et al.: Numerische Untersuchungen zur akustischen Wirkung diskreter Strukturänderungen mittels der Strukturintensität. DAGA - Fortschritte der Akustik (2016), 210-213
- [3] Schaal, C. et al.: Relation between structural intensity-based scalars and sound radiation using the example of plate-rib models. Journal of Vibration and Acoustics 138.4 (2016), 041011
- [4] Möser, M. und Kropp, W.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [5] Hanselka, H. und Bös, J.: Dubbel - Maschinenakustik (O30-O41). Springer-Verlag, Berlin, 2014
- [6] Gavrić, L. und Pavić, G.: A finite element method for computation of the structural intensity by the normal mode approach. The Journal of Sound and Vibration 164.1 (1993), 29-43
- [7] Meudt, P.: Strukturintensitätsanalyse in der Maschinenakustik. Dissertation TU Darmstadt (1998)
- [8] Stein, M.: Ausbreitung von Körperschall in ebenen Strukturen. Dissertation - TU Darmstadt (2004)
- [9] Schaal, C. et al.: Analyse der Strukturintensität in akustisch verbesserten Strukturen. DAGA - Fortschritte der Akustik (2015), 830-833