

# Identifizierung signifikanter STI-basierter Skalare hinsichtlich einer verminderten Schallabstrahlung

Clarissa Schaal, Joachim Bös, Tobias Melz

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt, E-Mail: schaal@szm.tu-darmstadt.de

## Einleitung

Ein weit verbreitetes Forschungsziel ist es, neue Methoden zur Entwicklung leiser Maschinen und Produkte zu entwickeln oder bestehende Methoden zu verbessern. Hierbei muss in der Schallentstehungswirkkette eingegriffen werden. Die maschinenakustische Grundgleichung beschreibt modellhaft diesen Prozess der Schallentstehung in einer Struktur, welcher sich in die Schritte Schwingeregung (Energieeinleitung), Körperschalltransfer (Energiefluss) und die Schallabstrahlung (Energieableitung) unterteilt. Der Energiefluss in einer Struktur wird durch die Strukturintensität (STI) beschrieben. Die Analyse der STI bietet somit Aufschluss darüber, auf welchen Pfaden die Energie fließt. Ziel ist es, diese Informationen zu nutzen und die STI durch Impedanzänderungen (hier Geometrieänderungen) so zu beeinflussen, dass Energie in unkritische Bereiche umgeleitet wird und die Struktur dadurch in kritischen Bereichen weniger Schall abstrahlt.

Um die Informationen aus der STI bspw. in Strukturoptimierungen direkt zu nutzen, sind Zielfunktionen zu wählen, die auf der STI basieren. Dafür sind aus dem STI-Vektorfeld Skalare abzuleiten. Die Eignung dieser STI-basierter Skalare als Zielfunktion wird über ihre Korrelation mit der äquivalenten abgestrahlten Schalleistung (ERP, [1]) überprüft. Diese kann bei einfachen Strukturen als Näherung für die Schalleistung herangezogen werden. Mit einer varianzbasierten Sensitivitätsanalyse wird in einem weiteren Schritt der Zusammenhang zwischen den variablen Geometrieparametern und den STI-basierten Skalaren untersucht.

## Strukturintensität

Die Strukturintensität ist der Energiefluss des Körperschalls in einer schwingenden Struktur. Allgemein berechnet sich die STI  $\vec{I}_S$  aus dem Produkt aus Spannungstensor  $\underline{S}$  und Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  [2]

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

Darin kennzeichnet der Unterstrich komplexe und der Asterisk konjugiert komplexe Größen. In Schalenstrukturen kann die STI  $\vec{I}_S$  auch gemäß Gleichung (2) anhand der auftretenden Schnittgrößen berechnet werden [3]

$$\vec{I}_S = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \underline{N}_x v_x^* + \underline{N}_{xy} v_y^* + \underline{M}_x \dot{\phi}_y^* - \dots \\ \underline{N}_y v_y^* + \underline{N}_{xy} v_x^* - \underline{M}_y \dot{\phi}_x^* + \dots \\ \dots \underline{M}_{xy} \dot{\phi}_x^* + \underline{Q}_x v_z^* \\ \dots \underline{M}_{xy} \dot{\phi}_y^* + \underline{Q}_y v_z^* \end{bmatrix}. \quad (2)$$

## Untersuchungsmodell

Das untersuchte Modell ist eine allseitig gelenkig gelagerte, verrippte Stahlplatte (870 mm × 620 mm × 5 mm), welche in zwei Bereiche unterteilt wird (s. Abb. 1). Sie wird in Teil B harmonisch in ihren ersten 15 Eigenmoden mit 1 N angeregt. Ziel ist es, die von Teil A abgestrahlte Schalleistung (hier ERP) zu reduzieren. Hierfür wird eine Rippe (10 mm × 25 mm) in Teil A in ihrer Länge  $l_{\text{Rip}}$ , Lage  $ax_{\text{Rip}}$ ,  $ay_{\text{Rip}}$  und Ausrichtung  $\varphi_{\text{Rip}}$  variiert.

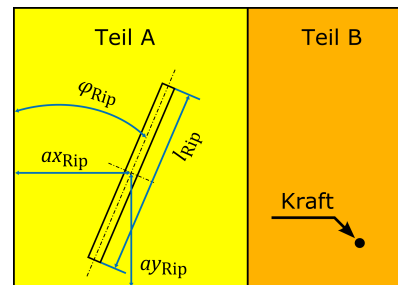


Abbildung 1: Untersuchungsmodell.

Es wird ein vollfaktorieller (vf.) Versuchsplan verwendet, in dem der Faktor  $l_{\text{Rip}}$  in 3, die Faktoren  $ax_{\text{Rip}}$  und  $ay_{\text{Rip}}$  in jeweils 7 sowie der Faktor  $\varphi_{\text{Rip}}$  in 6 Faktorstufen unterteilt wird (s. Abb. 2). Dies führt zu 882 Modellen.

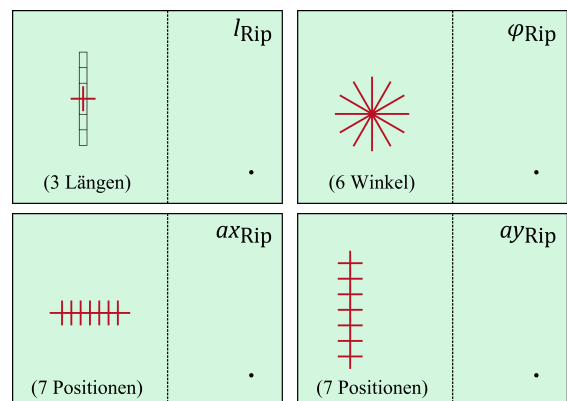
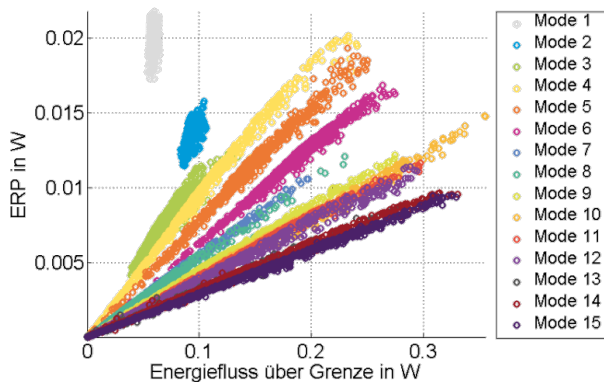


Abbildung 2: Faktorstufen des vf. Versuchsplans – die roten Kreuze markieren die Rippenmittelpunkte.

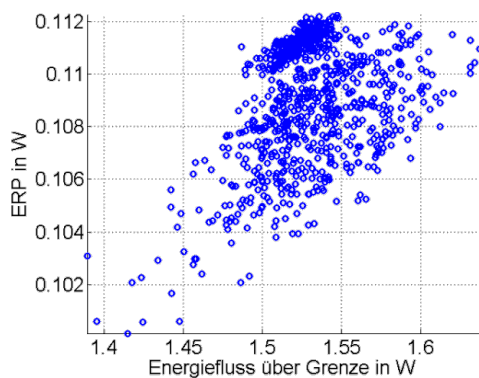
## Untersuchungsergebnisse

Verschiedene STI-basierte Skalare wurden ermittelt und bzgl. ihrer Korrelation mit der ERP in Teil A untersucht. Folgend wird als Ergebnis der aussichtsreichste Skalar vorgestellt – der Energiefluss (Integration des Produkts „STI und Normalenvektor“ entlang der Grenzlinie). Die Gegenüberstellung der ERP in Teil A und des

Energieflusses nach A aller 882 Modelle ist in Abb. 3 in Abhängigkeit von den Eigenmoden und in Abb. 4 aufsummiert über den Eigenmoden zu sehen.



**Abbildung 3:** Modenabhängige Gegenüberstellung der ERP in Teil A und des Energieflusses von B nach A.

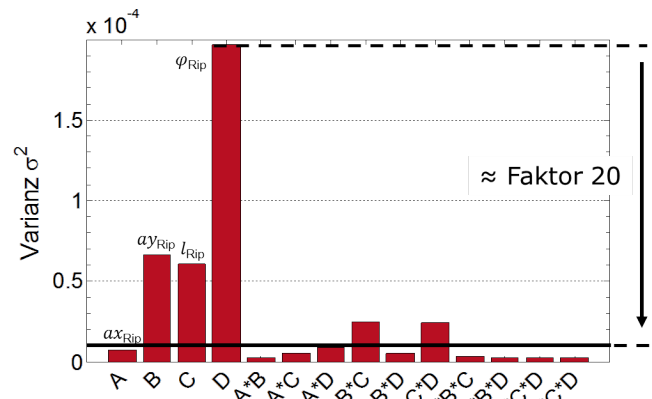


**Abbildung 4:** Gegenüberstellung der ERP in Teil A und des Energieflusses von B nach A – über Moden aufsummiert.

Es ist zu erkennen, dass der Energiefluss für die untersuchten Modelle modenabhängig mit der ERP korreliert – die ERP nimmt mit zunehmendem Energiefluss zu. Die Steigungen sinken mit zunehmender Frequenz, d.h. der Einfluss des Energieflusses auf die ERP sinkt. Allerdings heißt dies, dass der Wertebereich des Energieflusses bedingt durch Faktoränderungen mit der Frequenz ansteigt, wodurch sich der Energiefluss höherfrequent stärker beeinflussen lässt. Aufsummiert über der Frequenz ist die Korrelation zwischen beiden Größen geringer ausgeprägt, aber in der Tendenz zu erkennen. Dies liegt daran, dass sich die Eigenmoden eines Modells unterschiedlich verhalten. So kann ein Modell z.B. in einer Eigenmode verhältnismäßig hohe, in einer anderen aber verhältnismäßig niedrige Werte für ERP und Energiefluss aufweisen.

Um den Einfluss der Faktoren auf den Energiefluss zu untersuchen, wird eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Varianz der Faktoren und Faktorwechselwirkungen auf den über den Moden aufsummierten Energiefluss von B nach A ist in Abb. 5 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Ausrichtung der Rippe mit Abstand die größte Sensitivität aufweist. Die Einflüsse des Faktors  $\alpha x_{\text{Rip}}$  sowie der meisten Wechselwirkungen auf



**Abbildung 5:** Varianz der Faktoren sowie der Faktorwechselwirkungen auf den Energiefluss von B nach A über Moden aufsummiert.

den Energiefluss können für die untersuchten Modelle vernachlässigt werden, da sie um mehr als den Faktor 20 geringer sind als der Einfluss der Rippenausrichtung. Die Betrachtung der einzelnen Eigenfrequenzen – hier nicht dargestellt – zeigt, dass die Varianz mit der Frequenz ansteigt. Zudem zeigt sich, dass die Vergrößerung des Wertebereichs des Energieflusses bei steigender Frequenz (s. Abb. 3) maßgeblich auf die Rippenausrichtung zurückzuführen ist.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass in den hier untersuchten Modellen der STI-basierte Skalar „Energiefluss in einen Bereich“ als alternatives Maß für die Schallabstrahlung dieses Bereiches herangezogen werden kann, da er (modenabhängig) mit der ERP korreliert. Vorteil des Energieflusses als STI-basierter Skalar als spätere Zielfunktion für Strukturoptimierungen ist die Tatsache, dass die STI hierfür nur lokal und nicht für das gesamte Modell bestimmt werden muss, was die numerische Effizienz erhöht.

In einem nächsten Schritt ist zunächst geplant, die ERP durch die Schalleistung zu ersetzen, um Annahmefehler auszuschließen und die Ergebnisse experimentell zu überprüfen. Anschließend ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf komplexere Strukturen zu untersuchen.

## Literatur

- [1] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [2] Hanselka, H. u. Bös, J.: Maschinenakustik. In Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, (Grote, K.-H. u. Feldhusen, J., Hrsg.), Berlin: Springer-Verlag 2011
- [3] Romano, A.J., Abraham, P.B. u. Williams, E.G.: A poynting vector formulation for thin shells and plates, and its application to structural intensity analysis and source localization. Part I: Theory. JASA. 87(3), 1990, S. 1166-1175