

# Analyse der Strukturintensität in akustisch verbesserten Strukturen

Clarissa Schaal<sup>1</sup>, Johannes Ebert<sup>2</sup>, Joachim Bös<sup>1</sup>, Tobias Melz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt

<sup>2</sup> Strukturdynamik und -analyse, BMW Group, 80788 München

E-Mail: schaal@szm.tu-darmstadt.de

## Einleitung

Die akustische Verbesserung von Maschinen und Produkten, d.h. die Reduktion ihrer Schallabstrahlung, ist allgegenwärtiges Thema in der Produkt(weiter)entwicklung. Forschungsziel am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM der TU Darmstadt ist es, die Produktentwicklung zu vereinfachen, indem neue Design-Regeln entwickelt werden, anhand derer auch Akustik-Laien Strukturen akustisch gut auslegen können. Die Körperschallausbreitung in einer Struktur ist verantwortlich dafür, dass Strukturen überhaupt Schall abstrahlen. Daher ist ein Eingriff in die Körperschallausbreitung über strukturelle Änderungen ein direkter Ansatz, um das Strukturverhalten so zu beeinflussen, dass das genannte Ziel erreicht wird. Die Strukturintensität (STI) ist die Größe, die Aufschluss über die Körperschallausbreitung in einer Struktur gibt. Sie ist somit eine vielversprechende Analysegröße. Untersuchungen [1] haben zudem gezeigt, dass Bereiche, in denen viel Energie fließt, auch mehr Schall abstrahlen. Dies bestärkt die Relevanz der Untersuchungen für Design-Regeln zur akustischen Strukturoptimierung anhand der STI.

## Strukturintensität

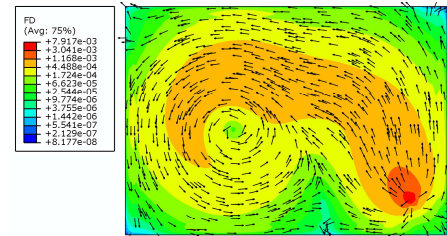
Die STI beschreibt den Energiefluss des Körperschalls in festen Strukturen [2]. Sie ist eine Vektorfeldgröße und damit durch ihre Flussrichtung (FR) und ihre Flussdichte (FD) gekennzeichnet. Berechnet wird sie durch das Produkt aus Spannungstensor und Geschwindigkeitsvektor

$$\vec{I}_S = -\mathbf{S} \cdot \vec{v}. \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

In dünnwandigen Strukturen gilt die Vereinfachung, dass der Energiefluss in Dickenrichtung zu vernachlässigen ist. In diesen Fällen wird die STI über die Dicke integriert, womit sich die Einheit der STI zu W/m ändert. Dies trifft für alle in diesem Beitrag dargestellten STI-Ergebnisse zu.

Die STI einer gelenkig gelagerten Stahlplatte, die harmonisch bei 174,3 Hz angeregt wird, ist in Abb. 1 im eingeschwungenen Zustand dargestellt. Angeregt wird die Platte unten rechts. Die Pfeile geben die FR und die farbliche Hinterlegung die FD der STI an. Die FD ist eine Elementgröße, ist aber kontinuierlich dargestellt. Dies wird durch den Zusatz „Avg. 75%“ in der Legende gekennzeichnet.

Es ist erkennbar, dass die Energie, ausgehend von der Anregung, in die linke Plattenhälfte fließt und dort rotiert. Zur Verdeutlichung der zugehörigen Körperschallausbreitung ist in Abb. 2 die Verschiebung  $u$  (senkrecht zur Platte) für verschiedene Phasenlagen einer halben Schwingperiode ( $0^\circ$ – $180^\circ$ ) ab-



**Abbildung 1:** STI einer Platte im eingeschwungenen Zustand (Energiefluss im zeitlichen Mittel) bei 174,3 Hz (Pfeile = FR, farbliche Hinterlegung = FD).

gebildet. Klar erkennbar ist, dass diese Bewegung der Energie mit der Rotation der Wellenbäuche auf der Platte in einer Schwingperiode übereinstimmt.

## Untersuchungsziel und -hypothesen

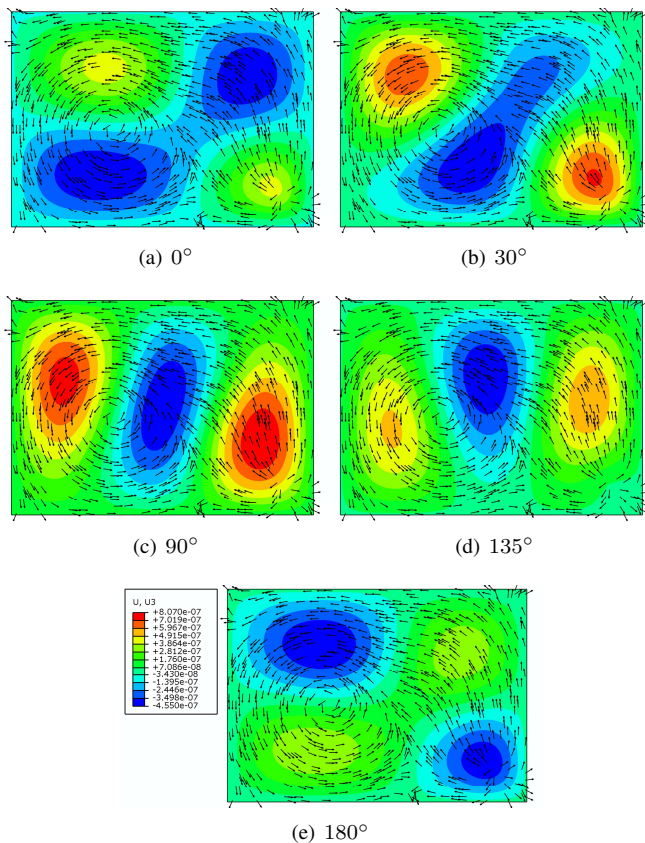
Zunächst wird das Untersuchungsziel konkretisiert und das Vorgehen, wie Strukturenänderungen vorgenommen werden, beschrieben. Abschließend werden zwei zu untersuchende Hypothesen aufgestellt.

### Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist es, eine Methode zu entwickeln, mit welcher Strukturen gezielt so geändert werden können, dass sich die Schallabstrahlung ausgewählter Strukturbereiche reduziert. In den durchgeführten Untersuchungen wird als Kenngröße für die Schallabstrahlung die äquivalente abgestrahlte Schallleistung (ERP) herangezogen. Diese stellt eine Vereinfachung der real abgestrahlten Schallleistung dar, da sie annimmt, dass der Abstrahlgrad konstant 1 beträgt. Für eine erste Bewertung verschiedener Ansätze ist sie allerdings ausreichend. Untersucht wird, ob die STI als Basis für die zu entwickelnde Methode verwendbar ist, da sie – wie in der Einleitung aufgezeigt – ein hohes Potenzial besitzt. Die Idee hinter den Untersuchungen ist es, Design-Regeln für eine akustische Optimierung von Strukturen anhand der STI abzuleiten.

### Strukturänderungen in den Untersuchungen

In den Untersuchungen werden Strukturen über die Applikation von Punktmassen und diskreten Federn geändert. Die Punktmassen werden auf die Knoten ausgewählter Elemente des FE-Netzes und die Federn zwischen je zwei Knoten der Elemente gesetzt. Die Federn erhöhen lokal die Steifigkeit in allen sechs Freiheitsgraden. Der Vorteil dieser abstrakten Strukturänderungen ist es, dass durch diese lokalen Impedanz erhöhungen die Einflüsse von Steifigkeit und Masse nicht nur gekoppelt, sondern auch getrennt untersucht werden können. Ebenso lassen sich aus Punktmassen und diskreten Federn



**Abbildung 2:** Verschiebung einer Platte im eingeschwungenen Zustand bei 174,3 Hz bei verschiedenen Phasenlagen (Pfeile = FR, farbliche Hinterlegung = Verschiebung  $u$ ).

vielfältige Geometrien abstrahieren – sowohl auf ebenen als auch auf gekrümmten Strukturen. Die Dämpfung des Modells wird durch die Punktmassen und die Federn nicht erhöht. Ziel ist es, die Strukturen selbst zu optimieren. Die geeignete Verteilung von Dämpfungsbelägen wird als eigenständiger, nachfolgender Schritt in der Produktentwicklung gesehen, der hier nicht betrachtet wird.

### Untersuchungshypothesen

In diesem Beitrag werden zwei Hypothesen aufgestellt und nacheinander untersucht. Hypothese 1 lautet: „Die Flussrichtung der STI gibt Hinweise, wie Änderungen auf Strukturen appliziert werden müssen, damit die ERP sinkt.“ Hypothese 2 beinhaltet statt der Richtung des Energieflusses die Energiemenge: „Die Flussdichte der STI gibt Hinweise, wie Änderungen auf Strukturen appliziert werden müssen, damit die ERP sinkt.“

### Ergebnisse der Hypothese 1

Zunächst wird das Vorgehen zur Überprüfung der Hypothese 1 beschrieben und anschließend das Ergebnis an einem Beispiel vorgestellt.

#### Vorgehen

Verschiedene Modifikationen werden auf einer Platte anhand der FR-Analyse ihrer STI appliziert. Hierbei werden empirisch verschiedene geometrische Formen aus Punktmassen

und diskreten Federn an verschiedenen Positionen auf der Platte untersucht. Die Form der Modifikationen besteht u.a. auch aus sogenannten mehrteiligen Konturen (siehe dazu die gezeigte Modifikation in Abb. 3(d)). Bezüglich der Positionen der Modifikationen auf der Platte werden unterschiedliche Ausrichtungen hinsichtlich der FR der STI gewählt. So werden beispielsweise Modifikationen so appliziert, dass sie beispielsweise auf Energiepfaden, quer zu Energiepfaden, über Wirbeln etc. liegen.

Von allen erstellten Modellen wird anschließend eine Modalanalyse durchgeführt, um ihre Eigenfrequenzen zu identifizieren. Anschließend werden harmonische Analysen aller Modelle in deren ersten 15 Eigenfrequenzen (Moden) durchgeführt. Die Anregung erfolgt (wie bei der Platte ohne Modifikation) immer unten rechts. Im Postprocessing werden von jedem Modell in jeder Mode die STI in der gesamten Platte sowie die ERP der linken Plattenhälfte bestimmt.

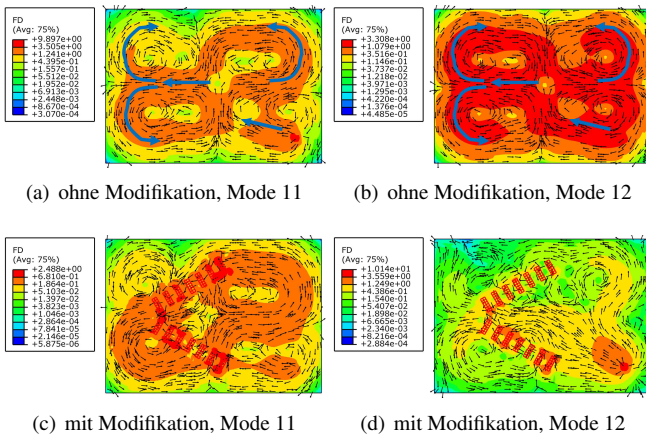
Über einen Vergleich der ERP aller Modelle innerhalb einer Mode (gleiche Modenreihenfolge) wird für jede Mode ein Ranking der Modifikationen erstellt. Je niedriger die ERP eines Modells ist, desto besser ist das Modell aus akustischer Sicht. An den Modellen mit der niedrigsten und der höchsten ERP in einer Mode wird im Anschluss untersucht, wie die jeweilige Modifikation in Bezug zur FR der STI der Platte ohne Modifikation positioniert ist. Ziel ist es, so eine Regel für erfolversprechende Änderungspositionen zu identifizieren.

### Ergebnis

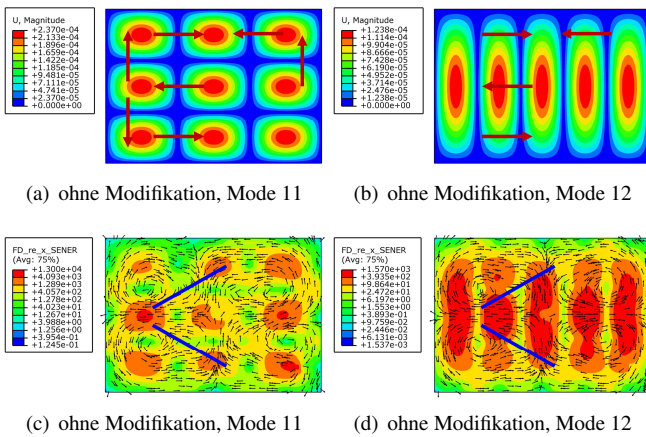
Die Untersuchungen zeigen, dass die FR der STI alleine nicht ausreicht, um Modifikationen so zu platzieren, dass die ERP sinkt. Dies wird in Abb. 3 am Beispiel der Moden 11 (links) und 12 (rechts) gezeigt. In beiden Moden weist die STI der Platte ohne Modifikation eine sehr ähnliche FR auf (Abb. 3(a) und 3(b)). Die blau eingezeichneten Pfeile heben die maßgeblichen Richtungen des Energieflusses hervor. Die gleiche Modifikation (ein um 90° gedrehtes V als mehrteilige Kontur) führt in beiden Moden zu einer Änderung der STI (Abb. 3(c) und 3(d)). Der Einfluss der Modifikation auf die ERP führt in beiden Moden aber zu einem entgegengesetzten Verhalten. In Mode 11 schneidet diese Modifikation im Vergleich zu allen anderen untersuchten Modifikationen am besten ab und senkt die ERP von 6,9 W bei der Platte ohne Modifikation auf 0,4 W. In Mode 12 hingegen gehört diese Modifikation zu den schlechtesten. Die ERP steigt im Vergleich zur Platte ohne Modifikation sogar von 1,8 W auf 7,5 W an.

Um dieses unterschiedliche Verhalten zu erklären, sind im nächsten Schritt viele weitere Strukturgrößen für die Platte ohne Modifikation in beiden Moden analysiert worden. Die Schwingformen und das Produkt aus der FD der STI und der Dehnungsenergie (SENER) geben eine Antwort für das Verhalten und werden daher vorgestellt. Die Schwingformen der Moden 11 und 12 sind in den Abb. 4(a) bzw. 4(b) zu sehen. Hierbei handelt es sich um den Betrag der euklidischen Norm der komplexen Verschiebung. Die Produkte  $FD \cdot SENER$  sind in den Abb. 4(c) und 4(d) dargestellt.

Es ist klar zu erkennen, dass die STI der Platte ohne Modifikation in beiden Moden durch verschiedene Schwingformen verursacht wird. In Mode 11 ist die Betriebsschwingform



**Abbildung 3:** STI der Platte ohne Modifikation (oben) und mit gleicher Modifikation (unten) in den Moden 11 und 12.



**Abbildung 4:** Verschiebung (oben) und Produkt aus FD und SENER (unten) der Platte ohne Modifikation in den Moden 11 und 12.

durch die (3,3)-Mode (Abb. 4(a)) und in Mode 12 (Abb. 4(b)) durch die (5,1)-Mode dominiert. Die Produkte  $FD \cdot SENER$  der Platte ohne Modifikation geben eine Erklärung, weshalb die gleiche Modifikation in beiden Moden zu einem so unterschiedlichen Ergebnis führt. Die blauen Linien in den Abb. 4(c) und 4(d) markieren die Position, auf der die Modifikation in beiden Moden appliziert wird. Die Verteilung von  $FD \cdot SENER$  ähnelt in beiden Moden der der Schwingform (3·3 bzw. 5·1 Maxima-Bereiche). Allerdings sind hier im Gegensatz zur Schwingform die Maxima unterschiedlich stark ausgeprägt. In Mode 11 ist die Modifikation über drei Maxima positioniert und behindert so deren Ausbildung. In Mode 12 ist die Modifikation hingegen so positioniert, dass sie zwar im Bereich von zwei Maxima liegt, allerdings exakt neben deren absoluten maximalen Ausprägungen.

Die in den Abb. 3 und 4 dargestellten Ergebnisse falsifizieren die aufgestellte Hypothese „Die Flussrichtung der STI gibt Hinweise, wie Änderungen auf Strukturen appliziert werden müssen, damit die ERP sinkt.“ auf eine anschauliche Art und Weise. Die Flussrichtung alleine ist somit nicht ausreichend, um Positionen für Änderungsmaßnahmen auf Strukturen zu identifizieren.

## Ergebnisse der Hypothese 2

Im ersten Schritt wird das Vorgehen zur Überprüfung der Hypothese 2 beschrieben. Anschließend werden drei exemplarische Ergebnisse vorgestellt.

### Vorgehen

Zur Untersuchung der Hypothese 2 wird die FD der STI einer Platte in den ersten 15 Eigenmoden analysiert. Die Platte selbst sowie die Schritte bis einschließlich der STI-Bestimmung sind identisch mit dem Vorgehen zur Untersuchung der Hypothese 1. In der FD-Analyse werden diejenigen 300 Elemente in jeder Mode identifiziert, deren FD-Werte am höchsten sind. Auf diesen Elementen wird anschließend die Modifikation, d.h. die Punktmassen und die diskreten Federn appliziert. Die Form und Position der Modifikation wird damit eindeutig durch die FD-Verteilung vorgegeben.

Der Erfolg oder Misserfolg der Modifikationen wird auch hier über die ERP in der linken Plattenhälfte charakterisiert. In jeder Mode werden dazu die Werte der ERP der Platte mit und ohne Modifikation miteinander verglichen. Sinkt die ERP, so war die Modifikation erfolgreich. Steigt die ERP hingegen, hat sich das Modell durch die Modifikation verschlechtert. Das heißt, je niedriger die ERP ist, desto besser ist das Modell aus akustischer Sicht. Ziel ist es zu überprüfen, ob gemäß Hypothese die FD geeignet ist, erfolgversprechende Änderungspositionen auf einer Struktur zu identifizieren.

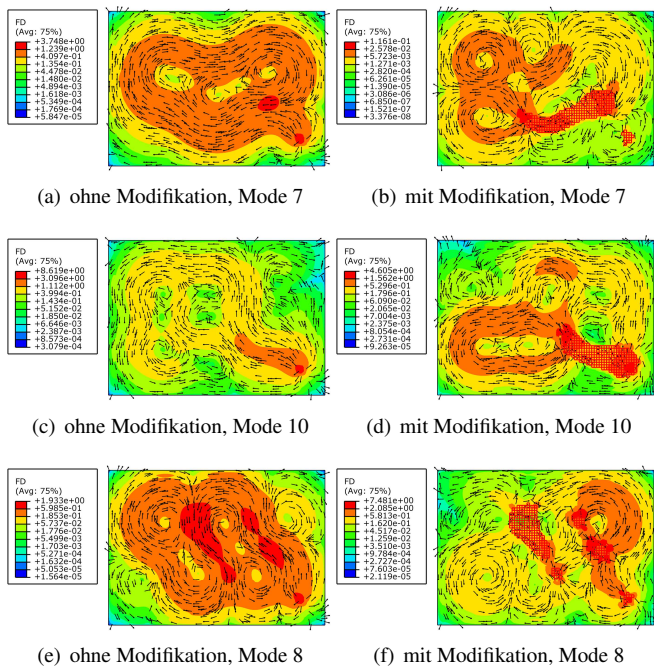
### Ergebnis

Die Untersuchung der Hypothese 2 zeigt, dass in den meisten Moden die ERP der Platte mit Modifikation gegenüber der ERP der Platte ohne Modifikation sinkt. Als erfolgreiche Beispiele sind in Abb. 5 die Moden 7 und 10 gezeigt. Die STI der Platte ohne Modifikation ist in den Abb. 5(a) bzw. 5(c) dargestellt, die der Platte mit Modifikation in den Abb. 5(b) bzw. 5(d). Die Position der Modifikation ist dort rot hervorgehoben.

In Mode 7 führt die Modifikation dazu, dass die ERP von 3,9 W auf 2 mW sinkt und in Mode 10 von 6,7 W auf 4,3 W. In beiden Fällen der Platte mit Modifikation ist zu erkennen, dass sich der ausgeprägte Energiepfad direkt ausgehend von der Kraftereinleitung nicht mehr ausbildet.

In einigen wenigen Moden steigt die ERP der Platte durch die Modifikation allerdings an. Dies ist in Mode 8 der Fall, für welche die STI der Platte ohne und mit Modifikation in den Abb. 5(e) bzw. 5(f) zu sehen ist. In dieser Mode erhöht sich die ERP von 2,3 W auf 3,7 W. Hier ist zu erkennen, dass in der Platte mit Modifikation weiterhin ein klar erkennbarer Energiepfad ausgehend von der Kraftanregung in die Struktur existiert. Er bildet sich im Gegensatz zur Platte ohne Modifikation sogar deutlicher aus. Damit ist gemeint, dass der Energiepfad schmäler ist und sich visuell stärker von der restlichen STI-Verteilung auf der Platte abhebt.

Da sich eine Strukturänderung anhand dieser Hypothese „Die Flussdichte der STI gibt Hinweise, wie Änderungen auf Strukturen appliziert werden müssen, damit die ERP sinkt.“ nicht pauschal positiv äußert, ist auch diese Hypothese im engeren Sinne falsifiziert. Allerdings überwiegt der Erfolg von



**Abbildung 5:** STI der Platte ohne Modifikation (links) und mit Modifikation (rechts) in den Moden 7, 10 und 8.

Strukturänderungen anhand der FD-Analyse gegenüber dem Misserfolg deutlich, weshalb die FD-Analyse weiter untersucht wird.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Untersuchungen zweier aufgestellter Hypothesen durchgeführt. Diese lauteten, dass die Flussrichtung oder die Flussdichte der STI aufzeigen, wie Änderungen auf Strukturen zu positionieren sind, damit die Schallabstrahlung der Strukturen gesenkt werden kann. Als Kenngröße für die Schallabstrahlung wurde die äquivalente abgestrahlte Schallleistung ERP verwendet.

Es wurde gezeigt, dass die Flussrichtung der STI alleine nicht geeignet ist, um Strukturänderungen für die Senkung der Schallabstrahlung zu definieren. Strukturänderungen basierend auf der Flussdichte hingegen waren in den meisten – aber nicht allen Fällen – erfolgreich. Nichtsdestotrotz lässt sich festhalten, dass die Flussdichte als Kenngröße für die akustische Strukturoptimierung wesentlich geeigneter erscheint als die Flussrichtung.

In weiterführenden Untersuchungen sollen die gewonnenen Erkenntnisse aus beiden Hypothesen miteinander verknüpft werden. So sollen analog zur Hypothese 2 Maxima-Bereiche auf der Struktur identifiziert werden, auf denen Strukturänderungen appliziert werden. Allerdings soll in einem neuen Schritt die Größe aus dem Produkt der Flussdichte und der Dehnungsenergie verwendet werden. Diese hatte sich in Hypothese 1 als eine Größe herausgestellt, anhand derer sich gute und schlechte Strukturänderungen im Nachhinein plausibilisieren lassen. Eine strukturelle Verbindung solcher Maxima durch Modifikationen hat sich in Hypothese 1 ebenfalls als positiv herausgestellt und soll daher ebenfalls gezielt untersucht werden.

## Literatur

- [1] Schaal, C., Bös, J. u. Melz, T.: Identifizierung signifikanter STI-basierter Skalare hinsichtlich einer verminderten Schallabstrahlung. In: DAGA 2014. (2014), 116–117
- [2] Hanselka, H. u. Bös, J.: Kap. Maschinenakustik. In: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, (Grote, K.-H. u. Feldhusen, J., Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, 24. Auflage, 2014