

# Vergleich der Ansätze von numerischer und experimenteller Bestimmung der Körperschallintensität an einfachen Strukturen sowie deren messtechnische Herausforderungen.

Dr.-Ing. Jan Bräunig, Eric Hensel, Marieke Pedro

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 1187 Dresden,  
E-Mail: jan.braeunig@iwu.fraunhofer.de

## Einleitung

Eine Reduktion der Schallemission komplexer technischer Strukturen kann durch eine gezielte Beeinflussung der Körperschallübertragung effektiv umgesetzt werden. Passive Möglichkeiten stellen dabei Dämpfungsschichten oder Rippen dar. Für eine effektive Umsetzung dieser fertigungstechnisch mitunter aufwendigeren und gewichtsbringenden Maßnahmen sollte die Kenntnis über die Verteilung und Strömung der Körperschallenergie innerhalb des Bauteils jedoch möglichst mit hoher Auflösung von Ort und Intensität vorliegen.

Dieser Beitrag vergleicht Ansätze zur numerischen und experimentellen Bestimmung der Körperschallintensität, wobei der Schwerpunkt auf der Verarbeitung von experimentellen Messdaten eines 3D-Laserscanning-Vibrometers und deren Vergleich mit einem Finite-Elemente-Modell liegt.

Der Vergleich der Methoden erfolgt am Beispiel einer einfachen Struktur, die von einem elektrodynamischen Shaker angeregt wird. Nach der Beschreibung und Diskussion der einzelnen Ansätze sowie der erzielten Ergebnisse wird ein Ausblick hin zur Analyse und Herausforderungen an komplexeren Körpern gegeben.

## Theorie

Die Grundlagen des Verfahrens zur Bestimmung der körperschallbasierenden Strukturintensität (SI) als Hilfsmittel zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften über das Übertragungsverhalten mechanischer Strukturen wurden bereits von Noiseux [1], Pavic [2] und Verheij [3] eingeführt. Diese frühen Arbeiten konzentrierten sich auf die Messung der SI an dünnen Platten, Trägern und Rohren unter Verwendung von Beschleunigungssensoren. Später, mit der weiteren Entwicklungen auf dem Gebiet der Finite-Elemente-Methode (FEM), wurde es möglich, die SI numerisch hochauflösend zu berechnen [4].

Innerhalb der folgenden Beschreibungen sind unterstrichene Symbole als komplexe Größen dargestellt, fettgedruckte Symbole stehen für Tensoren und Symbole in kursiven Schriften charakterisieren skalare Werte. Die Bestimmung des komplexen SI  $I$  basiert auf der Grundlage des dynamischen Spannungstensors (1):

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \underline{\sigma}_{xx} & \underline{\tau}_{xy} & \underline{\tau}_{xz} \\ \underline{\tau}_{yx} & \underline{\sigma}_{yy} & \underline{\tau}_{yz} \\ \underline{\tau}_{zx} & \underline{\tau}_{zy} & \underline{\sigma}_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

und des komplexen Geschwindigkeitsvektors (2):

$$\underline{v} = \begin{pmatrix} \underline{v}_x \\ \underline{v}_y \\ \underline{v}_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

wobei  $\underline{I}$  durch das Produkt aus Spannungstensor und Geschwindigkeitsvektor definiert ist [4].

$$\underline{I} = -\underline{\sigma} \cdot \underline{v}. \quad (3)$$

Die körperschallbasierende Intensität stellt ein Vektorfeld dar, das die Größe und Richtung des Energieflusses einer Position innerhalb der Struktur zuordnet. Unter Bezugnahme von [3] kann das  $k$ -te Element des realen (aktiven) Teils der SI  $I_{a,k}(\omega)$  bei sinusförmiger Anregung wie folgt berechnet werden (4):

$$I_{a,k}(\omega) = -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}\{\underline{\sigma}_{kl}(\omega) \cdot \underline{v}_i(\omega)\}. \quad (4)$$

In obiger Gleichung stellt  $I_{a,k}$  die  $k$ -te Komponente der SI dar. Analog sind  $\underline{\sigma}_{kl}$  und  $\underline{v}_i$  die entsprechenden Komponenten des Spannungstensors bzw. Geschwindigkeitsvektors. Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der imaginäre Teil der SI nicht berücksichtigt.

Zum besseren physikalischen Verständnis des Intensitätsfeldes kann dessen Divergenz analysiert werden. Die Divergenz charakterisiert Quellen und Senken eines Vektorfeldes. Im Falle der SI ist die Divergenz von  $I_a$  definiert als (5):

$$\text{div } I_a = \nabla \cdot I_a = \frac{\partial I_{a,x}}{\partial x} + \frac{\partial I_{a,y}}{\partial y} + \frac{\partial I_{a,z}}{\partial z}. \quad (5)$$

Die Divergenz der SI stellt ein skalares Feld dar. Obige Gleichung (5) enthält die Summierung der räumlichen Ableitungen der SI-Komponenten. Die Divergenz der SI kann genutzt werden, um Quellen und Senken von Energieströmen zu detektieren. Die folgende Auflistung zeigt die entsprechende Bedeutung:

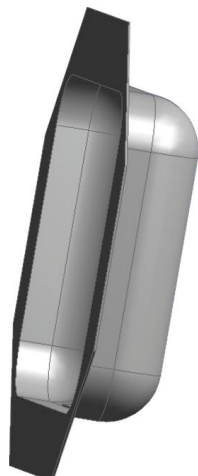
- $\text{div } I_a = 0$  beschreibt ein Vektorfeld ohne Quellen und ohne Senken.
- $\text{div } I_a > 0$  beschreibt die Position einer Quelle.
- $\text{div } I_a < 0$  beschreibt die Position einer Senke.

Der Schwerpunkt der aktuellen Untersuchungen liegt auf der möglichst genauen messtechnischen Lokalisierung einer Quelle am Untersuchungsobjekt.

## Untersuchungsobjekt und numerische Schwingungsanalyse

Gegenüber vorangegangenen Untersuchungen mit einfachen Plattengeometrien als Untersuchungsobjekt [5] wurde im

Rahmen dieser Testkampagne eine Wannengeometrie verwendet. Folgende Abbildung 2 zeigt das Testobjekt.

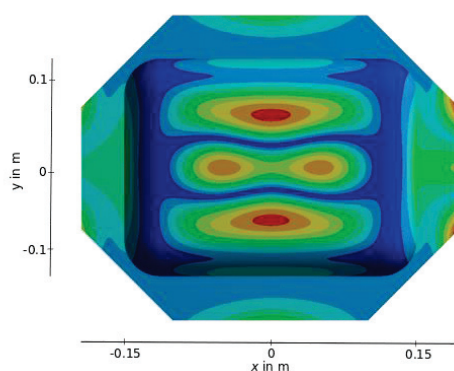


**Abbildung 2:** Untersuchungsobjekt Blechwanne

Die Höhe der circa 2 mm starken Blechwanne beträgt 420 mm, die Breite 520 mm und die maximale Tiefe 80 mm.

Die Blechgeometrie besitzt an den äußeren Randbereichen Bohrungslöcher, welche zur Anbindung der Feder-Aufhängungselemente während der Messung genutzt wurden.

In Hinblick auf die numerische Simulation der SI unter Verwendung der Messobjektgeometrie erfolgte in Ansys (ANSYS, Inc., ver. R18.1) die FEM-Analyse. Konkret wurde die Schwingform bei  $f_n = 963$  Hz nach Abgleich mit realen Messungen verwendet. Folgend ist diese dargestellt (Abbildung 3).

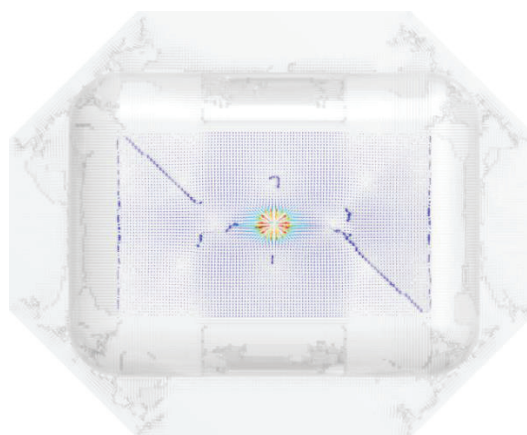


**Abbildung 3:** Im FE-Programm ermittelte Schwingform bei  $f_n = 963$  Hz

Die numerische Bestimmung der SI erfolgt auf Basis einer Frequenzganganalyse (in Ansys: harmonic response). Dazu wird das FE-Modell im Bereich der Resonanz mit einer Kraft von  $F = 0,022$  N bei 963 Hz angeregt. Die Position der Krafteinleitung im FE-Modell sowie die Kraftamplitude entsprechen dabei den Bedingungen des realen Experiments. Der Durchmesser der Krafteinleitungsstelle mit  $d_f = 5$  mm entspricht ebenso dem späteren Versuchssetup.

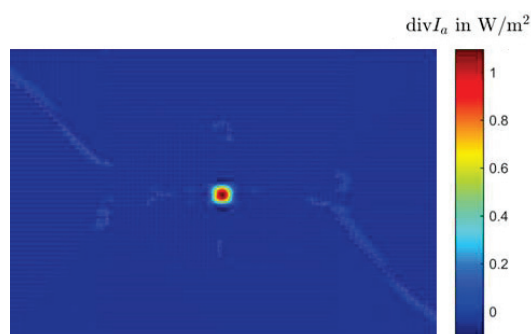
Die Ergebnisse der Frequenzganganalyse werden nach (4) verarbeitet, um den Realteil der komplexen körperschallbasierenden Strukturintensität an den diskreten Punkten der analysierten Struktur zu erhalten. Die darauf basierende Divergenz des resultierenden Vektorfeldes wird in Matlab (The MathWorks, Inc., ver. R2018a) berechnet.

Abbildung 4 zeigt die entsprechende SI der Frequenzganganalyse. Weiterhin kann in dieser Abbildung die mittige Position der Körperschallquelle gut erfasst werden.



**Abbildung 4:** Vektorfeld, numerisch berechnet

Wie bereits erwähnt, können Quellen und Senken von körperschallbasierenden Energieflüssen durch die Berechnung der Divergenz des Vektorfeldes lokalisiert werden. Da numerisch sowie experimentell keine signifikanten Senken, bspw. Absorptionselemente, appliziert wurden, sind keine ausgeprägten Minima der Divergenz zu erwarten. Entsprechend zeigt Abbildung 5 nur geringfügig negative Werte.



**Abbildung 5:** Divergenz, numerisch berechnet

## Erfassungen mit einem 3D-Scanning-Laser-Vibromter

Die messtechnische Grundlage zur Bestimmung der SI stellt in dieser Untersuchung ein 3D-Laser-Vibromter dar (LSV). Das verwendete LSV vom Typ PSV400-3D ermöglicht eine berührungslose und somit rückwirkungsfreie Erfassung von Oberflächenschwingschnellen einer Struktur in Kombination mit einer hohen Messpunktanzahl, welche in diesem Umfang von Beschleunigungssensoren kaum erreicht werden könnte

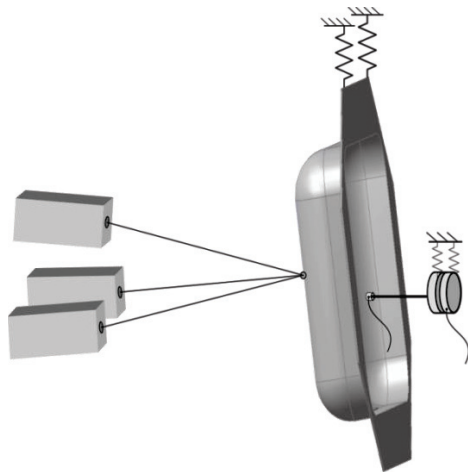
(> 200 Scanpunkte). Die Berechnung der körperschallbasierenden Intensität nach Gleichung (3) erfordert neben der Erfassung von Oberflächenschnellen auch die Bestimmung der dynamischen Dehnung der Struktur. Bei sinusförmiger Anregung können die Verschiebungen wie folgt berechnet werden (6):

$$\underline{u} = \frac{1}{j\omega} \cdot \underline{v} \quad (6).$$

Ausgehend von den Verschiebungen werden die Dehnungen berechnet.

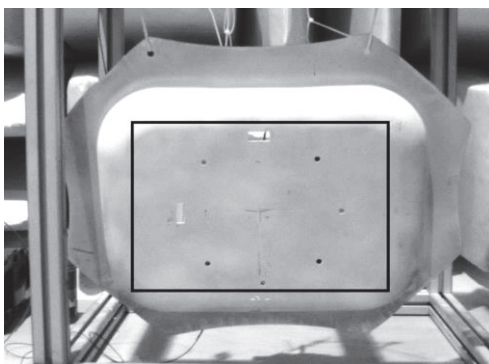
### Versuchsaufbau und experimentelle Ergebnisse

Der grundlegende Testaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Experimentelles Testsetup, bestehend aus Untersuchungsobjekt Blechwanne, rückseitig gekoppelten Shaker (Quelle) sowie frontseitig positioniertem 3D-Laser-Vibrometer

Für die Erfassung experimenteller Daten wird die Software Polytec Scanning Vibrometer (PSV, Polytec GmbH, Ver. 9.2) eingesetzt. Abbildung 7 zeigt den Analysenbereich: nur der plattenähnliche Bereich der Wanne wurde für diese Untersuchung berücksichtigt.



**Abbildung 7:** Darstellung der Divergenz auf Basis der Messdatenweiterverarbeitung über PSP

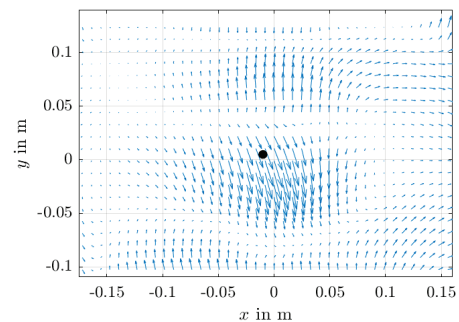
Für den Scan wird ein maximaler Abstand zwischen den Abtastpunkten von ca. 20 mm gewählt, was eine Anzahl von 6 Punkten pro Biegewellenlänge entspricht. Dies führt zu einer Gesamtzahl von 238 Antwortpunkten an der Oberfläche der untersuchten Platte. In einem ersten Schritt werden die Eigenfrequenzen und Modenformen der Struktur experimentell durch eine Rauschanregung sowie reduzierter

Abtastpunktanzahl bestimmt. Zur Steigerung der Messgenauigkeit wurden alle Experimente in einem klimatisierten akustischen Halbfreifeldraum durchgeführt, um mögliche Umgebungseinflüsse zu reduzieren (bspw. Temperaturschwankungen).

Nach Abschluss der Messung mittels 3D-Laser-Vibrometer werden die ermittelten Oberflächenschwingschnellen in einem nächsten Schritt verarbeitet. Einerseits durch die Verwendung des Polytec Strain Processors (PSP, Polytec GmbH, ver. 2.3) und andererseits über analytische Verfahren (Plattentheorie, Fourier-Verfahren).

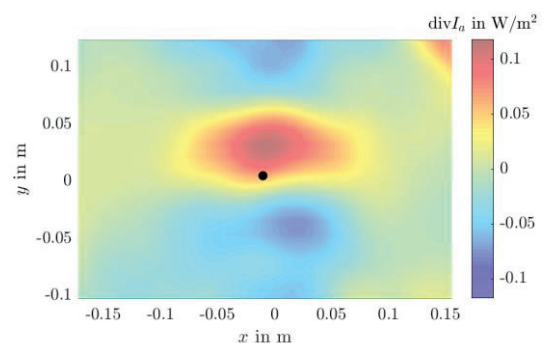
Die Software PSP ermöglicht die direkte Berechnung von dynamischen Spannungen auf Basis der ermittelten Oberflächenschwingschnellen. Innerhalb des PSP wird ein räumlicher Filter verwendet, um die erhaltenen Schwingungsdaten zu glätten. Darauf basierend erfolgte die Datenweiterverarbeitung nach obigen Gleichungen in Matlab.

In folgender Abbildung 8 ist das resultierende Vektorfeld dargestellt.



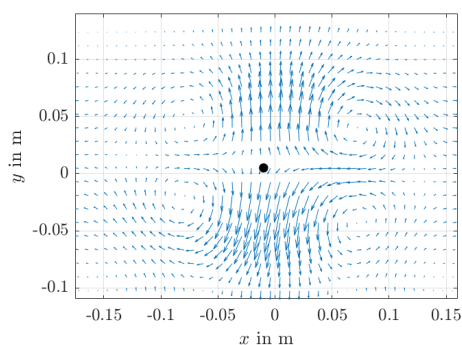
**Abbildung 8:** Darstellung des Vektorfeld auf Basis der Messdatenweiterverarbeitung über PSP

Abbildung 9 enthält die Darstellung der zugehörigen Divergenzverteilung.



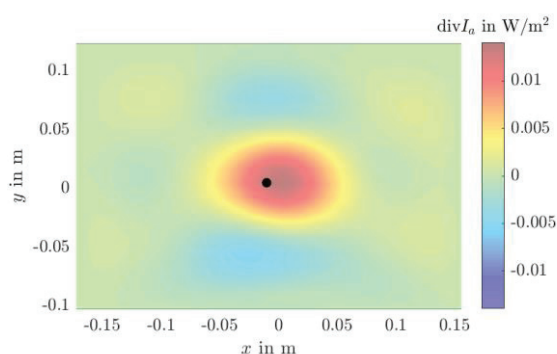
**Abbildung 9:** Darstellung der Divergenz auf Basis der Messdatenweiterverarbeitung über PSP

Erfolgt die Weiterverarbeitung der LSV-Scanning-Daten nicht im PSP sondern nach der Kirchhoff'schen Plattentheorie, resultiert das in Abbildung 10 dargestellte Vektorfeld.



**Abbildung 10:** Darstellung des Vektorfelds auf Basis der Messdatenweiterverarbeitung mit Ansatz Plattentheorie

Das Ergebnis der zugehörigen Divergenz ist in Abbildung 11 zu sehen.



**Abbildung 11:** Darstellung der Divergenz auf Basis der Messdatenweiterverarbeitung mit Ansatz Plattentheorie

Es ist darauf hinzuweisen, dass im zweiten Ansatz unter Verwendung der Plattentheorie lediglich die out-of-Plane-Schwingschnellen aus dem LSV-Scan verwendet werden.

## Gegenüberstellung von Messung und Simulation

Im Direktvergleich der Divergenz fällt zum einen der große Unterschied in der Amplitude auf:

- Numerischer Maximalwert der Div.:  $1,05 \text{ Wm}^{-2}$
- Maximalwert der Div. Ansatz 1 (PSP):  $0,12 \text{ Wm}^{-2}$
- Maximalwert der Div. Ansatz 2 (Plattentheorie):  $0,015 \text{ Wm}^{-2}$ .

Zum anderen wird bei der Gegenüberstellung von Abbildungen 5 (num.) zu Abbildung 8 und 10 (beide auf exp. Basis) ersichtlich, dass im Experiment die Körperschalleinleitung wesentlich unschärfer zu erkennen ist. Ebenso zeichnen sich im Experiment oberhalb und unterhalb der Quelle zwei Senken ab.

Als mögliche Ursachen der Effekte können folgende Punkte genannt werden:

- Auch mit hoher Ausrichtung der Krafteinleitung sowie Verwendung eines biegeweichen Stingers kann der Einfluss von Querkräften nicht ausgeschlossen werden.

- Der Umformprozess der Blechwanne führt prozessbedingt zu Variationen in der Materialstärke, die im FE-Modell nicht berücksichtigt wurden.

## Zusammenfassung und Ausblick

An diesem Beitrag ist der hohe messtechnische Aufwand zur Bestimmung der Körperschallintensität selbst an einfachen Strukturen erkennbar. Zukünftig sind weitere Messungen geplant, die zum einen Senken und zum anderen aufwendigere Abgleiche (bspw. model updating der FE-Modelle) beinhalten. Letztlich sind für tieffrequente Schwingformen auch Abgleiche mit einem optischen Messsystem auf Basis der Grauwertkorrelation vorgesehen.

## Literatur

- [1] D. U. Noiseux: Measurement of power flow in uniform beams and plates. The Journal of the Acoustical Society of America 47.1B (1970): 238-247.
- [2] G. Pavic: Measurement of structure borne wave intensity, Part I: Formulation of the methods. Journal of Sound and Vibration 49.2 (1976): 221-230.
- [3] J. W. Verheij: Cross spectral density methods for measuring structure borne power flow on beams and pipes. Journal of Sound and Vibration 70.1 (1980): 133-138.
- [4] L. Gavric, G. Pavic: A finite element method for computation of structural intensity by the normal mode approach. Journal of sound and vibration 164.1 (1993): 29-43.
- [5] E. Hensel, J. Bräunig, J. Troge, M. Klemm: Comparison of methods for the numerical and experimental determination of structure-borne sound energy flows in technical structures. In: European Acoustics Association -EAA-: Euronoise 2018, 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Reduce Noise to Improve Life, Heraklion, Crete, 27-31 May 2018, 2018, S.877-883