

MESSUNG DER KÖRPERSCHALLINTENSITÄT MIT EINEM SCANNING LASER DOPPLER VIBROMETER

Stefan Schoenwald^a, Trevor R T Nightingale^b

a) Kurz u. Fischer GmbH, Beratende Ingenieure, Brückenstraße 9, 71364 Winnenden

b) Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0R6

EINLEITUNG

Der Bericht bietet einen Überblick über eine Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik in Stuttgart, bei der ein Scanning Laser Doppler Vibrometer und eine speziell entwickelte Software verwendet wurde um die Körperschallintensität auf Stab- und Plattenstrukturen zu messen und systematisch den Einfluss verschiedener Messparameter sowie des Schallfeldes auf die Messergebnisse zu untersuchen. Das Projekt wurde am Institute for Research in Construction des National Research Council Canada in Ottawa durchgeführt und betreut.

GRUNDLAGEN

Im folgenden werden die grundlegenden Gleichungen der Intensität für Plattenstrukturen beschrieben. Stäbe stellen einen vereinfachten Sonderfall dar. Es wurde angenommen, dass die Struktur homogen, isotrop und deren Dicke d in Richtung der gemessenen Auslenkung sehr viel kleiner als die Wellenlänge ($\lambda \ll 6d$) ist. Deshalb kann die Theorie der dünnen Stäbe/Platten verwendet und die Intensität (W/m), die durch BiegeWellen übertragen wird, als Produkt der Kräfte (F) und Momenten (M) mit der dazugehörigen Schallschnelle (ξ^{\otimes}) und den Winkelgeschwindigkeiten (θ^{\otimes}) ausgedrückt werden,

$$I_x = \langle Q_x \xi^{\otimes} \rangle_t + \langle M_x \theta_x^{\otimes} \rangle_t + \langle M_{xy} \theta_y^{\otimes} \rangle_t \quad (1)$$

wobei die Indizes x und y die Richtung in der Plattenebene und t die Zeit beschreiben. Der erste Term von Gl. 1 ist die durch die Scherkraft hervorgerufene Intensitätskomponente und abhängig von der Biegesteifigkeit B der Struktur,

$$I_{x,sf} = -B \cdot \left\langle \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) \cdot \xi^{\otimes} \right\rangle_t \quad (2)$$

der zweite Term von Gl. 1 ist die sogenannte Biegemomentenkomponente,

$$I_{x,sm} = B \cdot \left\langle \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^{\otimes} \right\rangle_t \quad (3)$$

und der dritte Term die von der Poissonzahl μ abhängige Torsionsmomentenkomponente der Intensität

$$I_{x,tm} = B \cdot (1 - \mu) \cdot \left\langle \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} \right\rangle_t \quad (4)$$

Bei einer Platte wird die Körperschallintensität durch alle drei Komponenten, bei einem Stab hingegen nur durch die Scherkraft- und Biegemomentenkomponente bestimmt. Das Verhältnis der Beträge der Kraft- und der Summe der Momentenkomponenten ist durch Diskontinuitäten der Struktur und des Schallfeldes, wie z. B. durch Quellen, Senken, Grenzen, Stossstellen, etc., bestimmt. Im Freifeld im hinreichenden Abstand zu obengenannten Unregelmäßigkeiten sind die Beträge gleich.

Die Schwierigkeit bei der Messung der Intensität besteht in der Ermittlung der Ortsableitungen der Auslenkung in Gl. 2 bis 4.

Unter der Annahme von Fernfeldbedingungen und einer modifizierten Momentenkomponente entwickelte Noiseux [1] mit Hilfe des Finiten Differenzenverfahrens eine Messmethode, bei der das Schnellesignal an zwei Messpunkten ausreicht, um den Leistungsfluss in einer vorgegebenen Richtung in der Struktur zu bestimmen:

$$I_x = - \frac{2\sqrt{B \cdot m'}}{\Delta} \cdot \text{Im}\{G_{12}\} \quad (5)$$

Hierbei ist G_{12} das Kreuzspektrum der Schnellesignale an den Messpunkten 1 und 2, Δ der Punktabstand, und m' die flächenbezogene Masse.

Um den Leistungsfluss in einem Punkt auf einer Platte bestimmen zu können muss der resultierende Vektor aus zwei orthogonal zueinander gemessenen Intensitätsvektoren ermittelt werden.

Auf gleiche Weise können auch die Ortsableitungen höherer Ordnung in Gl. (2) bis Gl. (4) mit dem Finiten Differenzen Verfahren bestimmt werden [2]. Im Falle eines Stabs kann die Scherkraft- und Bie-

gemomentenkomponente aus den Schnellesignalen, gemessen an vier kollinearen Punkten, bestimmt werden,

$$I_{x,sf} = \frac{B}{\omega \cdot \Delta^3} \cdot \left\langle \text{Im}(6G_{32} - G_{31} - G_{42} + G_{12} - G_{43}) \right\rangle_t \quad (6)$$

$$I_{x,sm} = \frac{B}{\omega \cdot \Delta^3} \cdot \left\langle \text{Im}(2G_{32} - G_{31} - G_{42} - G_{12} + G_{43}) \right\rangle_t \quad (7)$$

wobei ω die Kreisfrequenz ist. Die Gesamtintensität ist die Summe der einzelnen Komponenten.

Zur Bestimmung des resultierenden Intensitätsvektors in einem Punkt auf einer Platte mit dieser Methode muss die Schnelle in 13 definierten Punkten gemessen und daraus anschließend drei Intensitätskomponenten in jeweils zwei orthogonale Richtungen berechnet werden. Die entsprechenden Terme sind von McGary in [2] beschrieben.

MESSSYSTEM

Die Messung der Schnellesignale auf der Struktur in einem vorgegebenen Punktrastrer erfolgte mit einem Scanning Laser Vibrometer (Polytec PSV300) und die Anregung der Struktur mit einem elektrodynamischen Shaker, der mit einer Rauschquelle betrieben wurde, die mit dem Messintervall synchronisiert war. Da das PSV 300 System die Schnelle zu jeder Zeit nur an einem einzigen Punkt messen kann, wurde die Phasenbeziehung aus der komplexen Transferfunktion zwischen dem Anregesignal (Kraft gemessen mit einem Impedanzkopf) und der in jedem Punkt gemessenen Schnelle [3] bestimmt. Die Intensitätsvektoren wurden anschließend mit einer speziell entwickelten Software mit dem Fernfeld und dem Finiten Differenzen Verfahren ermittelt.

MESSUNGEN AM SEMIINFINITEN STAHLSTAB

Der Messaufbau bestand aus einem Stahlstab (1000x19x4.8 mm) dessen eines Ende frei und mit dem Shaker über einen Impedanzkopf angeregt wurde. Das andere Ende war fest eingespannt und auf einer Länge von 400 mm in viskosem elastischem Dämpfungsmaterial eingebettet. Es wurde angenommen, dass nur am bedämpften Ende des Stabs Verluste auftreten und die Kraft senkrecht in der Längsachse angreift, so dass keine Torsion erzeugt wird. In diesem Fall entspricht die eingeleitete Leistung der Punktquelle, die aus dem Schnelle und Kraftspektrum am Anregepunkt ermittelt werden kann, dem Produkt der Intensität auf dem Stab und der Querschnittsfläche.

EINFLUSS DES PUNKTABSTANDS

Im Rahmen der Messungen an dem Stab wurde festgestellt, dass es einen optimalen Punktabstand zwischen den Messpunkten gibt. Dieser kann als Funktion der BiegeWellenlänge dargestellt werden. Für das 2-Punkt-Verfahren wurde in einer Studie ein Punktabstand im Bereich von $0.15\lambda < \Delta < 0.2\lambda$ empfohlen. Eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge erfolgte bisher noch nicht. In Darstellung 1 ist der Fehler der gemessenen Intensität in Abhängigkeit des Verhältnis von Punktabstand und Wellenlänge dargestellt. Bei beiden Methoden ist die Wahl des richtigen Punktabstands wichtig, um gute Messergebnisse zu erhalten. Große Punktabstände bedingen eine Überschätzung, kleine ein Unterschätzung des Betrages der Intensität. Bei sehr großen Punktabständen kommt es sogar zu Fehlern in der Richtung der Vektoren. Gute Ergebnisse können nur in einem sehr schmalen Bereich um den optimalen Punktabstand von $\Delta=0.25\lambda$ bei der 2-Punkt und von $\Delta=0.35\lambda$ bei der 4-Punkt-Methode erzielt werden.

NAHFELDEINFLÜSSE UND QUALITÄTSINDIKATOREN

Des weiteren wurden am semiinfiniten Stahlstab auch Einflüsse durch Nahfelder von Diskontinuitäten untersucht. In diesen Bereichen wurde wie zu erwarten bei der 2-Punktmethode ebenfalls eine Unter- oder Überschätzung der Intensität festgestellt. Bei der 4-Punktmethode traten diese Erscheinungen nicht auf. Im Fernfeld waren zudem die Momenten und Kraftkomponente gleich groß. Folglich kann das Verhältnis der beiden Größen zur Beschreibung der Charakteristik des Schallfeldes verwendet werden.

Außerdem wurde die Aussagekraft des Qualitätsindikator R_{II} [4], der mit dem Feldindikator bei der akustischen Intensität vergleichbar ist, genauer untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung ist in [5] beschrieben.

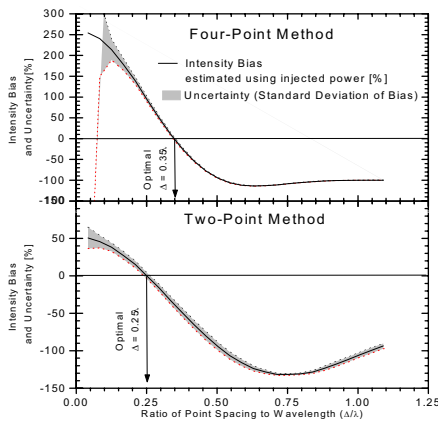


Abb. 1: Fehler und Unsicherheit im Betrag der Intensität als Funktion des Punktabstand Δ und der BiegeWellenlänge λ .

MESSUNGEN AN PLATTEN

Im folgenden wurde die Intensität auf einer Platte (2.41 x 1.25 x 0.0115 m) gemessen, die in einem reflexionsarmen Raum mit Federn aufgehängt war. Hierfür wurde das Schnellsignal in ca. 8000 Messpunkten, die in einen gleichmäßigen Raster auf der Platte verteilt waren, ermittelt. In der Querachse der Platte wurde eine Rippe (1.225 x 0.235 x 0.0187 m) mit 4 bzw. 16 gleichmäßig über die Breite der Platte verteilten Schrauben befestigt. Die Kante der Rippe war maschinell geglättet und presste dicht an die Platte an. Beide Plattenstreifen waren aus Plexiglas (Dichte: 1191.3 kg/m³ E-Modul: 4.59x10⁹ N/m² Poissonzahl: 0.289). Das Messobjekt wurde mit einem Shaker an zwei unterschiedlichen Punkten angeregt. Der erste war auf der Rippe in einem Abstand von 16,5 cm von der Platte und einer Höhe von 53 cm von der unteren Kante, so dass die Energieeinleitung über die Stoßstelle in die Platte erfolgt. Der zweite Anregepunkt lag im unteren Bereich der linken Plattenhälfte in ca. 35 cm Abstand von der unteren Kante und 75 cm von der Rippe. Hierbei konnte der Leistungstransport über die Stossstelle von der linken zu rechten Plattenhälfte untersucht werden.

Die Intensität wurde mit dem 2-Punkt und 13-Punkt-Verfahren gemessen. In diesem Bericht wurden nur die Ergebnisse gemessen mit der 2-Punkt-Methode bei 1000 Hz in einem ca. 60 cm breiten Streifen im Bereich des Rippenstosses dargestellt, da die betrachtete Richtung der Vektoren nur geringfügig durch das Nahfeld beeinflusst wird.

ANREGUNG DER RIPPE

In Abb. 2a ist die Intensität auf der Platte als die Rippe mit 16 Schrauben in einem Abstand von jeweils 7,8 cm befestigt dargestellt. Der Schraubenabstand entspricht bei der betrachteten Frequenz ca. einer halben Wellenlänge. Das Muster ist liniensymmetrisch zur

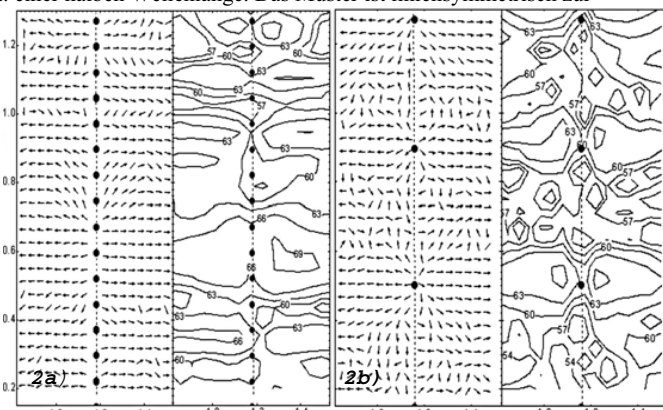


Abb. 2: Intensität (links: Richtung, rechts: Betrag [dB]) auf der Platte bei Anregung der Rippe (a) Rippe mit 16 Schrauben, b) Rippe mit 4 Schrauben an Platte befestigt

Stoßstelle und die meisten Vektoren weisen senkrecht von dieser Geraden weg. Außerdem ist keine nennenswerte Verringerung der Beträge in Abhängigkeit zum Abstand von der Stoßstelle erkennbar. Beides ist charakteristisch für eine Linienquelle. Die Rippe verhält sich folglich wie linienverbunden mit der Platte, obwohl definierte Befestigungspunkte vorliegen. Die Unregelmäßigkeiten im Vektorfeld konnten mit Modenerscheinungen auf der Rippe in Verbindung gebracht und nachgewiesen werden.

Abb. 2b zeigt den Leistungsfluss als die Rippe mit nur 4 Schrauben in Abstand von 39 cm (ca. 2λ) befestigt ist. Die Vektoren deuten klar von den Befestigungspunkten der Rippe weg, so dass jeder als unabhängige Quelle identifiziert werden kann. Zwischen diesen Quellen ist die Richtung der Vektoren zufällig verteilt. Dies liegt an der Überlagerung von Feldern gleich großer Intensität von nebeneinander liegenden Quellen. Die Beträge der Vektoren sind in direkter Nähe der Befestigungspunkt sehr groß und nehmen mit zunehmenden Abstand ab. In diesem Fall liegen unabhängige Punktquellen an den Schraubenpunkten vor. Die Rippe ist mit der Platte punktuell verbunden.

ANREGUNG DER LINKEN PLATTENHÄLFTE

In Abb. 3a wurde die linke Hälfte der Platte angeregt. In diesem Bereich ändert sich die Richtung der Vektoren in Abhängigkeit vom Ort. Diese Zirkulation des Leistungsflusses deutet auf Moden hin. Im Bereich der Rippe sind die Vektoren parallel zur ihr ausgerichtet. Dies zeigt an, dass ein Großteil der einfallenden Energie reflektiert wird. Auf der rechten Seite deuten die Vektoren über die gesamte Breite der Platte senkrecht von der Stoßstelle weg. Die Stossstelle hat den Charakter einer Linienverbindung.

In Abb. 3b ist die Rippe wiederum mit nur vier Schrauben befestigt, in deren Zwischenraum ein gleichmäßiger Energietransport über die Stoßstelle gemessen wurde. Im Bereich dicht bei den Befestigungspunkten ist die Richtung der Vektoren ungeordnet. Die Beträge sind zudem sehr viel geringer als in den anderen Bereichen der Platte. Die Verschraubungen scheinen dem System Energie zu entziehen. Die Schrauben erscheinen als punktuelle Energiesenken im Vektorfeld.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein Messsystem zur detaillierten Messung des Leistungsflusses in homogenen, isotropen und dünnen Strukturen entwickelt und validiert. Der Einfluss verschiedener Messparameter auf die Ergebnisse wurde systematisch untersucht. Das Beispiel der Platten-Rippenverbindung hat gezeigt, dass das Messsystem ein sehr hilfreiches Instrument bei der Untersuchung des Leistungsflusses bei einer Vielzahl von Anwendungen ist.

LITERATUR

- [1] Noiseux, D.U., JASA, Vol. 47, No. 1, 1970, pp. 238-247.
- [2] McGary, M.C., NASA Technical Memorandum, No. 89124, 1988
- [3] Linjama, J., Lahti, T., JSV, Vol. 153, Nr. 1, 1992, S. 21-36.
- [4] Linjama, J., Proceedings 2nd Conference on Dynamics 1983, S.289ff
- [5] S. Schoenwald, T. Nightingale, Canadian Acoustics Vol. 29, No.3., S. 100f

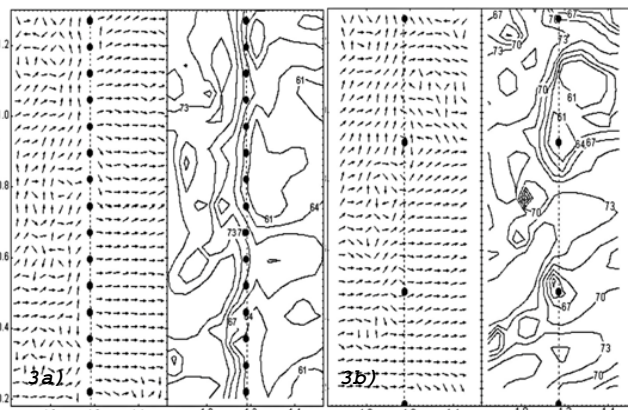


Abb. 3: Intensität (links: Richtung, rechts: Betrag [dB]) auf der Platte bei Anregung auf der linken Plattenseite (a) Rippe mit 16 Schrauben, b) Rippe mit 4 Schrauben an Platte befestigt