

Effiziente Lokalisierung von Schallbrücken mittels Körperschallintensitätsmessung

Klaus Naßhan, Waldemar Maysenhölder

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

Stuttgart; Email: nasshan@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Nach wie vor führt eine mangelhafte Bauausführung häufig zu Schallbrücken, deren Beseitigung mit erheblichen Kosten verbunden sein kann oder wegen dieser Kosten erst gar nicht in Angriff genommen wird. Voraussetzung für eine kostengünstige Reparatur ist die effiziente Lokalisierung der Schallbrücken. Ein bereits 1987 [1, 2] entwickeltes Lokalisierungsverfahren basiert auf der Messung von Körperschallintensitäten und deren Auswertung. Zur Suche der Schallbrücken, die Quellen oder Senken der Körperschallenergie sind, werden mittlerweile kostengünstige, portable Geräte eingesetzt.

Grundlagen der Körperschallintensitätsmessung

Die Messung der Körperschallintensität von Biegewellen kann mit vier Beschleunigungsaufnehmern erfolgen, die kreuzförmig und parallel zu den kartesischen Achsen angeordnet sind [3]. Die Intensitätskomponente I_x ergibt sich dann näherungsweise als proportional zum Imaginärteil des Kreuzspektrums der Signale der beiden zur x-Achse parallelen Aufnehmer zu

$$I_x \approx -\frac{\sqrt{B h \rho}}{\omega^2 d} \operatorname{Im} \{ \hat{a}_2 \hat{a}_1^* \} \quad \text{eq. 1}$$

mit der Biegesteife B , der Plattendicke h , der Dichte der Platte ρ , der Kreisfrequenz ω und dem Abstand der Aufnehmer d (Zeitfaktor: $\exp(-i\omega t)$; y-Komponente entsprechend). Dabei wird vorausgesetzt:

1. Die Platte (Wand, Estrich) ist homogen und dünn im Vergleich zur Biegewellenlänge.
2. Der Meßpunkt ist von den Rändern und anderen Inhomogenitäten hinreichend weit entfernt.
3. Der Abstand der Aufnehmer ist klein gegen die Biegewellenlänge.

Der relative Fehler F einer Intensitätskomponente wird bestimmt durch den Phasenfehler ε der beiden beteiligten Meßkanäle und den mit der Biegewellenzahl k multiplizierten Aufnehmerabstand [1, 2]:

$$F = \frac{\varepsilon}{k d} + \frac{(k d)^2}{6} \quad \text{eq. 2}$$

Dieser wird für

$$k d = \sqrt[3]{3\varepsilon} \quad \text{eq. 3}$$

minimal, was bei der Wahl des Aufnehmerabstandes d zu berücksichtigen ist.

Messung der Körperschallintensität mittels portablen Personalcomputer

Moderne Messwerterfassungskarten gestatten die Messung der Körperschallintensität mittels Personal Computer. In der realisierten Lösung wurde in einen portablen PC eine 16-kanalige, 16-Bit-Meßwerterfassungskarte der Firma Datatranslation (DT321) einge-

baut, die mit einer Summenabtastrate von bis zu 250 kHz abtastet. Die Beschleunigungsaufnehmer stammen von der Firma Kistler (Modell 8702B25), die Halterung für sie wurde selbst gebaut. Ein Programm namens 'Locate It!' steuert die Meßwerterfassung, wertet die Meßsignale aus und errechnet daraus die Intensitäten und deren Standardabweichungen.

Suchverfahren zur Bestimmung der Lage von Schallbrücken

Zur Bestimmung der Lage von Schallbrücken werden zunächst die an verschiedenen Punkten gemessenen und über ausgewählte Frequenzbänder gemittelten Intensitätsvektoren zu Geraden verlängert und deren Schnittpunkte ermittelt. Da die Richtungen der Vektoren mit Unsicherheiten behaftet sind, erhält man um jeden Schnittpunkt ein Rechteck, das die Unsicherheit des Schnittpunkts angibt. So dann wird klassifiziert, ob es sich bei dem Schnittpunkt um eine Quelle, eine Senke oder keins von beiden handelt. Zeigen beide Intensitätspfeile auf den Schnittpunkt, ist er eine Senke, weisen beide vom Schnittpunkt weg, liegt eine Quelle vor. Sollten zwei Intensitätsvektoren nahezu parallel sein oder zum gleichen Punkt gehören, wird kein Schnittpunkt berechnet. Nun werden die Schnittpunkte nach der Klassifikation sortiert und Quellen und Senken angezeigt. Der Benutzer kann dann entscheiden, welche Quellen und Senken er für die weitere Auswertung verwenden will. Dies kann sowohl durch An- und Abwählen einzelner Schnittpunkte geschehen oder durch logische Operationen (z.B. $0,5 \text{ m} < x\text{-Koordinate} < 2 \text{ m}$) erfolgen. Aus den ausgewählten Quellen oder Senken wird dann ein mittlerer Schnittpunkt errechnet. Dafür wird das mit der reziproken Standardabweichung gewichtete arithmetische Mittel der einzelnen Schnittpunkte gebildet und die Standardabweichung dieses mittleren Schnittpunktes bestimmt. Als Ergebnis liegt dann ein Rechteck vor, in dem eine Schallbrücke vermutet wird.

Verifikationsexperimente

Spanplatte mit bis zu drei Schallbrücken

Eine Spanplatte (2,5 m x 1,25 m x 2,5 cm) wurde auf einer 3 cm dicken Mineralwollschicht auf dem Betonboden eines Prüfstandes gelagert. Als Schallbrücken dienten Schraubverbindungen mit dem Prüfstandsboden. Sie wurden nacheinander bei (1,85 m, 0,43 m), (0,63 m, 0,83 m) und (1,45 m, 1,03 m) „eingebaut“. Messung und Auswertung erfolgten durch verschiedene Personen; der auswertenden Person waren zum Zeitpunkt der Auswertung die Positionen der Schallquellen unbekannt. Bild 1 zeigt eine Darstellung während der Lokalisierung. Das weiße Rechteck stellt die Spanplatte dar. Die Quellen-Schnittpunkte sind durch blaue Kreise markiert, ihre Unsicherheit durch blauschraffierte Rechtecke. Die gewichtete Mittelung der blauen Quellen resultiert im rot karierten Rechteck, in dem eine Schallbrücke vermutet wird. Die Ergebnisse der Lokalisierung sind in Tabelle 1 zusammengefaßt (Frequenzbänder: 200 ... 400 Hz beziehungsweise 400 ... 800 Hz). In keinem Fall weicht das Lokalisierungsergebnis von der tatsächlichen Schallbrückenposition um mehr als 15 cm ab. Bis auf eine Koordinate im Fall mit

allen drei Schallbrücken liegen die tatsächlichen Positionen innerhalb der Fehlergrenzen.

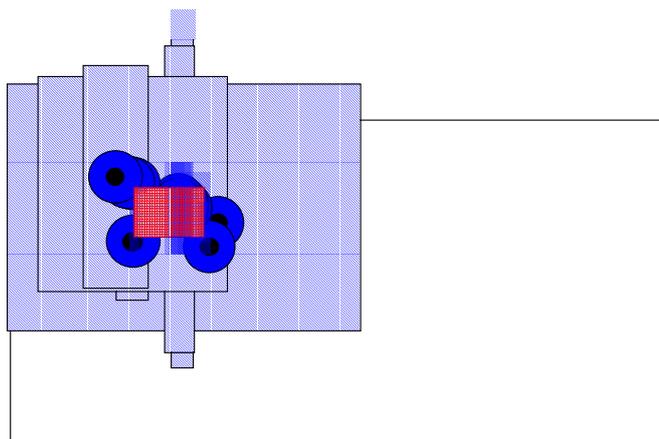


Bild 1: Grafische Darstellung der Lokalisierung einer Schallbrücke. (Bedeutung der Symbole siehe Text)

Anzahl der Schallbrücken	Tatsächliche Position der Schallbrücken	Lokalisierungsergebnis
1	X = 1,85 m Y = 0,43 m	X = 1,98 ± 0,20 m Y = 0,41 ± 0,23 m
2	X = 1,85 m Y = 0,43 m	X = 1,86 ± 0,04 m Y = 0,56 ± 0,19 m
	X = 0,65 m Y = 0,83 m	X = 0,63 ± 0,12 m Y = 0,76 ± 0,25 m
3	X = 1,85 m Y = 0,43 m	X = 1,90 ± 0,14 m Y = 0,39 ± 0,12 m
	X = 0,65 m Y = 0,83 m	X = 0,59 ± 0,14 m Y = 0,89 ± 0,09 m
	X = 1,45 m Y = 1,03 m	X = 1,55 ± 0,07 m Y = 0,91 ± 0,06 m

Tabelle 1: Positionsbestimmung der Schallbrücken einer mit dem Boden verschraubten Spanplatte

Estrich im Prüfstand

In einem weiteren Versuch wurde eine Schallbrücke in einen Zement-Estrich eingebaut. Die Estrichplatte war 4,75 m * 3,75 m * 5 cm groß und auf einem Schaumstoff schwimmend gelagert. Zur Herstellung der Schallbrücke wurde ein Loch in den Estrich gebohrt, eine Metallplatte auf den Estrich angedübelt und mit einer Gewindestange ein Verbindung zum Prüfstandsboden hergestellt. Die Schallbrücke befand sich bei X = 3,50 m und Y = 1,50 m. Zur Suche der Schallbrücke wurde sowohl auf der Estrichplatte bei X = 2,50 m und Y = 1,50 m und in der Türöffnung des Prüfstands auf dem Boden mit Hammerschlägen angeregt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Es zeigte sich, dass die Lokalisierung bei Anregung auf dem Prüfstandsboden einfacher und mit geringeren Meßfehlern behaftet ist. Die Nähe der Schallquelle wirkt sich

im Falle der Anregung auf der Estrichplatte negativ auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus. In einer Kontrollauswertung wurde auch die Lage der Schallquelle ermittelt.

Anregung	Auswertebereich	Gemessene Position der Schallbrücke
Auf Estrichplatte	200 - 400 Hz	X = 4,00 ± 0,38 m Y = 1,52 ± 0,22 m
	400 - 800 Hz	X = 3,68 ± 0,33 m Y = 1,73 ± 0,85 m
Auf Prüfstandsboden	200 - 400 Hz	X = 3,44 ± 0,05 m Y = 1,23 ± 0,24 m
	400 - 800 Hz	X = 3,46 ± 0,04 m Y = 1,26 ± 0,17 m

Tabelle 2: Positionsbestimmung der Schallbrücke eines schwimmenden Estrichs

Zusammenfassung

Es wurde ein PC-gestütztes Meßverfahren für Körperschallintensitäten und zur Lokalisierung von Schallbrücken implementiert und an Modellen und realen Bauteilen erprobt. Trotz meßtechnisch ungünstiger, jedoch realitätsnaher Situationen (wenig bedämpfte Platten) konnten mittels der Intensitätsmethode die Schallbrücken mit einer Genauigkeit von 15 cm bis 30 cm lokalisiert werden. Wenn das Bauteil nicht direkt, sondern über die Schallbrücke angeregt wurde, war die Lokalisierung einer Schallbrücke einfacher und genauer.

Die Anwendung der Methode, insbesondere die Auswertung der Daten, erfordert eine gewisse Sachkenntnis. Das Programm 'Locate It!' sollte deshalb nicht nur als 'Blackbox' benutzt werden.

Messungen an Modellen und Bauteilen in den Prüfständen des Instituts für Bauphysik haben gezeigt, daß das Verfahren reif ist, in Feldversuchen seine Leistungsfähigkeit zu beweisen. Ergänzend dazu werden weitere Laborversuche an anderen Typen von Bauteilen folgen.

Dank

Wir danken Herrn Dipl.-Ing. T. Kenner für die Durchführung der Messungen in den Prüfständen des Instituts für Bauphysik. Das Projekt wurde teilweise aus Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (Aktenzeichen: Z 6 - 5.4.00-09 / II 13 - 80 01 00-09) gefördert.

¹ Maysenhölder, W.; Schneider, W.: Entwicklung eines Messverfahrens zur Lokalisierung von Körperschallbrücken in mehrschaligen Wänden, Bericht aus dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, BS 166/87, 1987

² Maysenhölder, W.; Schneider, W.: Sound bridge localization in buildings by structure-borne sound intensity measurements. *Acustica* 68 (1989) 258-262

³ Pavic, G.: Measurement of structure-borne wave intensity, Part I: Formulation of the methods, *J. Sound Vib* 49 (1976) 221-230