

Körperschallausbreitung in Gebäuden

Untersuchungsmöglichkeiten mit einem Intensitätsmeßverfahren

Kurzfassung

Bauakustische Körperschallmessungen haben sich bisher fast ausschließlich auf die Messung von Schwingungsamplituden beschränkt („Körperschallpegel“). Die für einen wirksamen Schallschutz so wichtige Frage, wie sich die Schwingungsenergie ausbreitet, wird aber durch eine reine Pegelmessung meistens nicht zuverlässig beantwortet. Zu diesem Zweck muß die Körperschallintensität gemessen werden.

Unter gewissen Bedingungen läßt sich die Körperschallintensität relativ einfach aus dem Kreuzspektrum zweier Beschleunigungssignale bestimmen. Die Grundzüge dieser in der Bauakustik noch neuen Meßtechnik werden erläutert. Ihr Einsatz bei der Lokalisierung von Schallbrücken und beim Studium der Schalllängsdämmung zeigt die deutliche Überlegenheit gegenüber reinen Körperschallpegelmessungen.

Summary

Propagation of structure-borne sound in buildings – investigations by means of an intensity measuring technique. Structure-borne sound measurements in building acoustics were so far mainly restricted to the measurement of vibrational amplitudes (“structure-borne sound level”). However, the question of how the vibrational energy is propagated – a very important question for an efficient sound insulation – can often not be answered reliably on the basis of mere level measurements. For this purpose the vibrational intensity has to be measured.

Under certain conditions the vibrational intensity can be determined relatively simply from the cross spectrum of two acceleration signals. The essential aspects of this measuring technique, which is still new in building acoustics, are outlined. When used for localizing sound bridges and for studying flanking transmission, this technique has shown its clear superiority compared to mere structure-borne sound level measurements.

1 Einleitung

Die Ausbreitung von Körperschall in Gebäuden gehört zu den schwierigsten Kapiteln der Bauakustik. Das rührt zum Teil daher, daß in festen Körpern sowohl longitudinale als auch transversale akustische Wellen auftreten können, während der Luftschall ausschließlich aus Longitudinalwellen besteht. Die Berechnung der Körperschallausbreitung in Gebäuden wird jedoch überwiegend dadurch erschwert, daß sich ein Gebäude aus zahlreichen platten- und stabförmigen Bauteilen zusammensetzt. Die mannigfachen und oft nur ungenau bekannten Körperschallkopplungen zwischen angrenzenden Bauteilen lassen quantitative Aussagen – wenn überhaupt – nur in besonders einfachen Fällen zu; der rechnerische Aufwand ist enorm.

Unter diesen Umständen kommt der Messung der Körperschallausbreitung besondere Bedeutung zu. Üblicherweise mißt man mit einem auf dem Bauteil angebrachten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer die zur Oberfläche senk-

rechte Schwingungskomponente. Obwohl auf diese Weise (bei tieferen Frequenzen) nur BiegeWellen erfaßt werden, ist diese Methode für viele Zwecke ausreichend, weil die anderen Wellenarten praktisch keinen Luftschall abstrahlen. (Man sollte allerdings im Auge behalten, daß sich BiegeWellen beim Übergang von einem Bauteil zum anderen in Longitudinalwellen umwandeln können und umgekehrt Longitudinalwellen in BiegeWellen.) Derartige Schwingungsmessungen, vereinfachend Körperschallpegelmessungen genannt, vermitteln aufschlußreiche Informationen über das akustische Verhalten von Bauteilen und über die Ausbreitung des Körperschalls. Sie geben aber keine direkte Auskunft darüber, woher die Schwingungsenergie kommt und wohin sie geht. Gerade diese Fragen sind jedoch entscheidend, wenn es um Schalldämmung und insbesondere um Schalldämpfung geht oder um die Aufklärung der Ursachen eines mangelhaften Schallschutzes. Die gewünschten Antworten liefert die (Körperschall-)Intensität, die angibt, wieviel Schwingungsenergie im zeitlichen Mittel pro Flächen- und Zeiteinheit in welche Richtung fließt.

Wie man Körperschallintensitäten messen kann, wird im folgenden Abschnitt beschrieben; die letzten beiden Abschnitte sind wichtigen Anwendungsbeispielen gewidmet.

Die den Abschnitten 2 und 3 zugrunde liegenden Untersuchungen wurden gefördert durch den Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft und die Gips-Schüle-Stiftung.

2 Ein Körperschallintensitätsmeßverfahren

2.1 Grundlagen

Die einfachste Methode, die Intensität von Körperschall (genauer: von BiegeWellen in einer homogenen Platte) zu messen, benützt zwei Beschleunigungsaufnehmer, die in einem gegenüber der BiegeWellenlänge λ kurzen Abstand d auf der Platte aufgeklebt werden. Sind die beiden Aufnehmer längs der x -Richtung angebracht, berechnet sich die x -Komponente I_x des Intensitätsvektors \vec{I} aus den Beschleunigungssignalen a_1 und a_2 der beiden Aufnehmer nach der Formel

$$I_x \approx -\frac{\sqrt{B\rho h}}{2\omega d} \operatorname{Re} \langle (a_1 + a_2) \int (a_2 - a_1) * dt \rangle_t \quad (1)$$

(B ist die Biegesteife, ρ die Massendichte, h die Dicke der Platte; ω bezeichnet die Kreisfrequenz der harmonischen Schwingungen $a_{1/2} = \hat{a}_{1/2} \exp[-i\omega t]$, t die Zeit, Re den Realteil und $\langle \dots \rangle_t$ einen zeitlichen Mittelwert.) Gleichung (1) ist analog zur entsprechenden Gleichung für Luftschallintensitätsmessungen mit zwei Mikrofonen [1]. Der wesentlichste Unterschied besteht darin, daß beim Körperschall der Faktor vor dem zeitlichen Mittelwert frequenzabhängig ist, beim Luftschall jedoch nicht. Das bedeutet, daß Gl. (1) nur für sinusförmige Schwingungen anwendbar ist.

Bauakustische Körperschallintensitätsmessungen wurden erstmals von Kruppa [2] an Wänden durchgeführt, und zwar mit den für Luftschallintensitätsmessungen üblichen Auswertegeräten unter Berücksichtigung von (1). Eine einfache Umformung dieser Gleichung führt auf

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

d.h. die Intensität ist proportional zum Imaginärteil des Kreuzspektrums beider Beschleunigungssignale. Der Gültig-

Dr. rer. nat. Waldemar Maysenhölder, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 7000 Stuttgart 80. Physikstudium an der Universität Stuttgart, Diplom 1978, Promotion 1981 mit einem Thema aus der theoretischen Festkörperphysik.

1981 bis 1986 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische und Angewandte Physik der Universität Stuttgart. Studienaufenthalte in England und USA.

Seit 1986 in der Abteilung Bauakustik am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.

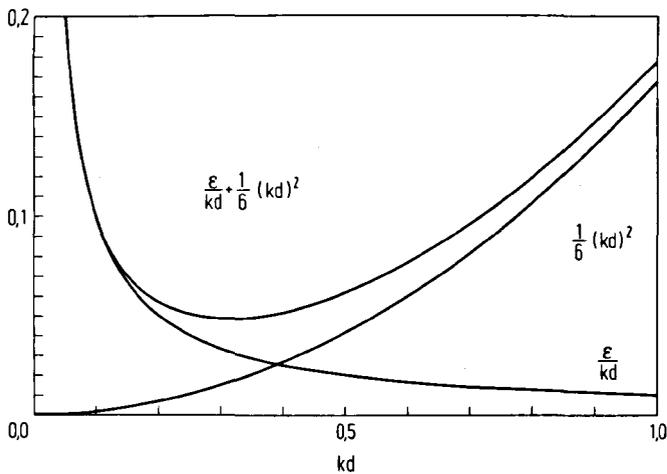


Bild 1. Relativer Meßfehler nach Gl. (4) mit $\epsilon = 0.01$

keitsbereich beider Gleichungen ist sowohl zu hohen als auch zu tiefen Frequenzen hin eingeschränkt. Wie schon erwähnt, muß der Aufnehmerabstand d klein gegen die Biegewellenlänge

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{Eh^2}{3\rho(1-\sigma^2)}} \sqrt{\frac{\pi}{f}} \quad (3)$$

sein ($E =$ Youngscher Modul, $\sigma =$ Poissonsche Zahl, $f = \omega/2\pi$). Außerdem sollte $\lambda \geq 6h$ erfüllt sein, um die Anwendbarkeit von Gl. (3) zu gewährleisten [3]. Zu tiefen Frequenzen hin muß darauf geachtet werden, daß der Meßpunkt mindestens eine halbe Wellenlänge von den Rändern, von Inhomogenitäten und von Anregestellen der Platte entfernt ist. Andernfalls wird die Intensitätsmessung durch Biegewellennahfelder, die in Gl. (1) und (2) nicht berücksichtigt sind, verfälscht. Eine ausführlichere Diskussion des Einflusses der Nahfelder findet sich bei *Noiseux* [4].

Die Meßgenauigkeit bei tiefen Frequenzen wird bestimmt durch die Phasendifferenz ϵ beider Meßkanäle, d. h. der beiden Aufnehmer mit ihren Ladungsverstärkern. Sie sollte in der Größenordnung von einem Grad liegen. Da die Phasendifferenz zwischen a_1 und a_2 gleich kd ist ($k = 2\pi/\lambda$), beträgt der relative Meßfehler ϵ/kd . Um ihn klein zu halten, müßte man den Abstand d groß machen; andererseits soll $d \ll \lambda$ gelten. Für eine bestimmte Frequenz läßt sich der relative Meßfehler [5]

$$F(kd) = \frac{\epsilon}{kd} + \frac{1}{6} (kd)^2 \quad (4)$$

durch $kd = \sqrt[3]{3\epsilon}$ minimieren. Für $\epsilon = 0.01 \approx 0.5^\circ$ beträgt er ungefähr 5% (Bild 1).

2.2 Grafische Darstellung der Meßergebnisse

Die in den folgenden Beispielen gemessenen Intensitäten wurden mit Gl. (2) gewonnen, d. h. es wurden Kreuzspektren gemessen. Für die Intensitäten werden lediglich die Imaginärteile benötigt. Da aber die Realteile natürlich mitgemessen werden, ist es naheliegend, diese Information ebenfalls auszunützen. Der Realteil des Kreuzspektrums $\hat{a}_2 \hat{a}_1^*$ ist nämlich für $d \ll \lambda$ gleich dem Betragsquadrat der Schwingungsamplitude, entspricht also dem bisher üblicherweise gemessenen Körperschallpegel.

Um ein möglichst aufschlußreiches Bild eines Schwingungszustandes zu erhalten, sollten Körperschallpegel und -intensität gleichzeitig grafisch dargestellt werden. Es bietet sich an, die Intensität als Pfeil, den Pegel als Kreis darzustellen.

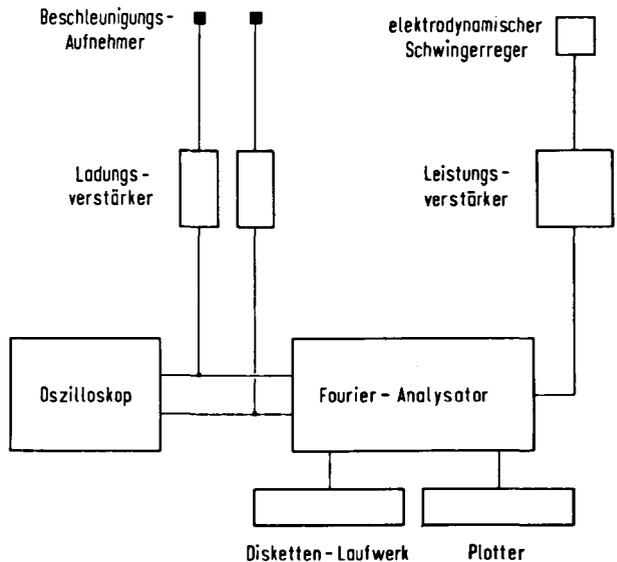


Bild 2. Schematischer Aufbau der Meßapparatur

Die Frage ist, welcher relative Maßstab sinnvoll wäre. Er wird hier so gewählt, daß die Länge des Pfeils mit dem Radius des Kreises übereinstimmt, wenn die Schwingung der Platte durch eine einzelne ebene Biegewelle beschrieben werden kann. (Da es uns auf Absolutwerte vorläufig nicht ankommt, setzen wir den Radius des Kreises proportional zum Realteil des Kreuzspektrums, die Länge des Pfeiles proportional zum mit $\cot(kd)$ multiplizierten Imaginärteil [5].) Es kann gezeigt werden [5], [6], daß im Gültigkeitsbereich von Gl. (2) der „Intensitätspfeil“ nicht über den „Pegelkreis“ hinausragen kann. Ist der Pfeil kürzer als der Radius, deutet dies darauf hin, daß die Schwingung durch Überlagerung von mehreren Biegewellen beschrieben werden muß. Im Extremfall ist die Intensität gleich Null, z. B. in einer stehenden Welle oder in einem vollständig diffusen Wellenfeld.

Als Beispiel für diese Art der Darstellung diene eine Messung an einer Plexiglasplatte ($2 \times 3 \text{ m}^2$, 1 cm dick), die am Rand mit einer Sandschicht bedämpft und in der Mitte durch einen elektrodynamischen Schwingerreger angeregt wurde [5]. Bild 2 zeigt schematisch die Meßapparatur. Die Kreuzspektren wurden auf Diskette gespeichert. Die Auswertung und grafische Darstellung erfolgte mit einem *Pascal*-Programm auf einem Tischrechner.

Die Ergebnisse an jedem Meßpunkt sind mit dem Abstand zum Zentrum multipliziert, um die Pfeile nahe den Rändern besser erkennen zu können (Bild 3). An allen Meßpunkten ist die Pfeillänge ungefähr gleich dem Kreisradius, d. h. Reflexionen der vom Zentrum ausgehenden Kreiswelle (die an jedem Meßpunkt praktisch als ebene Welle in radialer Richtung angesehen werden kann) an den Rändern der Platte wurden durch die Sandschicht weitgehend unterdrückt. Ohne Dämpfung im Material müßte die Intensität einer Kreiswelle umgekehrt proportional zum Abstand r vom Zentrum abnehmen. In der mit r multiplizierten Darstellung müßten daher alle Pfeile gleich lang sein. Aus der tatsächlich vorliegenden Abnahme der Pfeillänge mit zunehmendem Abstand r kann der Verlustfaktor von Plexiglas auf 3% abgeschätzt werden.

Bild 3 demonstriert auch die außerordentliche Richtungsgenauigkeit des Intensitätsmeßverfahrens. Die Abweichungen von der radialen Richtung betragen (von einigen Punkten am Rand abgesehen) ungefähr 1° . Die Mittelung über ein breites Frequenzband (1 ... 4 kHz) trägt wesentlich zu dieser hohen Genauigkeit bei, weil sich dadurch Ablenkungen durch (schwache, aber doch noch vorhandene) reflektierte Intensitäten zum Teil aufheben. Stört man die Ausbreitung der Kreis-

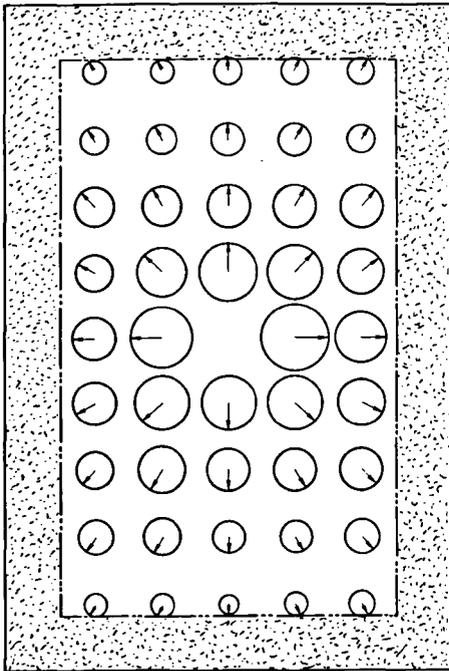


Bild 3. Schwingungsbild einer im Zentrum angeregten Plexiglasplatte mit Randbedämpfung (punktiert). Die Ergebnisse an jedem Punkt sind mit dessen Entfernung zum Zentrum multipliziert. Die Körperschallpegel (Kreise) und -intensitäten (Pfeile) sind Mittelwerte über Frequenzen von 1 kHz bis 4 kHz

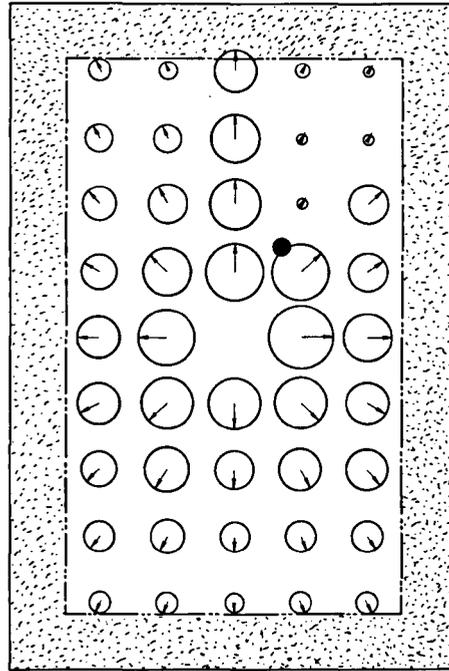


Bild 4. Wie Bild 3, jedoch mit einer ungefähr 1 kg schweren Störmasse ●

welle durch eine aufgeklebte Masse (Bild 4), erkennt man deutlich die Schattenwirkung dieser Störung, die die Intensität in ihrer Richtung zwar kaum beeinflusst, im Betrag aber drastisch reduziert.

3 Lokalisierung von Schallbrücken

Eine für die Baupraxis interessante Anwendungsmöglichkeit der Körperschallintensitätsmessung stellt die Suche nach Schallbrücken dar. Ein im Rahmen des Projekts [5] entwickeltes Lokalisierungsverfahren sei hier kurz beschrieben (siehe auch [6]).

Die Idee ist folgende: Man verlängere die gemessenen Intensitätspfeile nach hinten und bestimme die Schnittpunkte dieser Verlängerungen. Bei geradliniger Ausbreitung der Schwingungsenergie von einer punktförmigen Quelle fallen alle Schnittpunkte mit der Quelle zusammen, falls keine weiteren Schallquellen vorhanden sind und keine Reflexionen auftreten. In diesem einfachen Fall (Bild 3) genügen zur Lokalisierung der Quelle im Prinzip zwei Intensitätsmessungen. In den meisten Fällen wird die Richtung vom Meßpunkt zur Schallbrücke aber durch Reflexionen verfälscht, und zwar umso mehr, je weiter der Meßpunkt von der Schallbrücke entfernt ist. Man muß an mehr als nur zwei Punkten messen – möglichst um die Schallbrücke herum verteilt –, erhält dadurch mehrere Schnittpunkte, die nicht mehr zusammenfallen werden, und bestimmt einen mittleren Schnittpunkt, wobei die einzelnen Schnittpunkte nach ihrer Unsicherheit gewichtet werden. Meßpunkte, die weit von einer vermuteten Schallbrücke entfernt sind, wird man schließlich bei der Lokalisierung nicht mehr berücksichtigen.

Zur Erprobung dieses Lokalisierungsverfahrens wurde im nebenwegfreien Wandprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik eine zweischalige Kalksandsteinwand errichtet. Die Dicke der Schalen betrug 115 mm bzw. 175 mm, die Fläche ungefähr $4 \times 3 \text{ m}^2$. Der ca. 55 mm breite Zwischenraum war mit Mineralfaserplatten bedämpft. Eine Schallbrücke zwi-

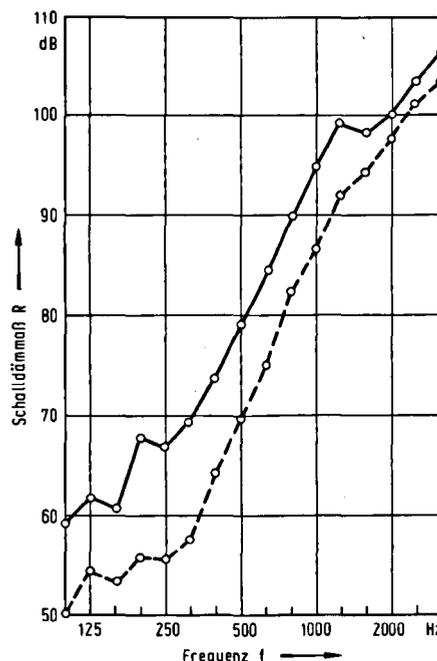


Bild 5. Luftschalldämmung der Kalksandstein-Doppelwand (— ohne Schallbrücke; --- mit Schallbrücke)

schen beiden Schalen verschlechterte das bewertete Schalldämmmaß von 79 dB auf 70 dB (Bild 5).

Zur Lokalisierung der Schallbrücke wurde die dünnere Wandschale mit einem elektrodynamischen Schwingerreger angeregt; auf der dickeren Schale wurden die Messungen vorgenommen, und zwar zunächst an vier gleichmäßig über die Fläche verteilten Punkten (Bild 6). Das Ergebnis war ein mittlerer Schnittpunkt in 40 cm Entfernung vom tatsächlichen Ort der Schallbrücke. Drei weitere Meßpunkte um diesen Schnittpunkt herum führten schließlich zu einer Lokalisierung der Schallbrücke auf 8 cm genau; die beiden Meßpunkte auf der linken Seite wurden dabei nicht mehr berücksichtigt.

Man sieht, daß die Intensitäten auch in der Nähe der Schallbrücke nicht genau von dieser wegzeigen. Das dürfte

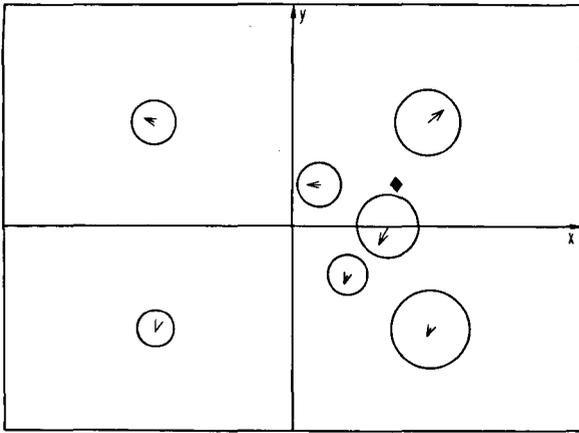


Bild 6. Schwingungsbild der durch die Schallbrücke ♦ angeregten Kalksandsteinwand (Mittelwerte über Frequenzen von 500 Hz bis 2 kHz)

weniger auf den Einfluß von Reflexionen als vielmehr auf die Inhomogenität des Mauerwerks zurückzuführen sein. Die unter diesen Umständen erstaunliche Lokalisierungsgenauigkeit verdanken wir einer geschickten Auswahl der Meßpunkte und vor allem einer geeigneten Gewichtung bei der Mittelung über die Schnittpunkte. Eine weitere Voraussetzung für eine zuverlässige Lokalisierung ist eine „günstige“ Wahl des Frequenzbandes, über das die Intensitäten gemittelt werden [5], [6].

Daß die gute Lokalisierung mit nur sieben Meßpunkten kein Zufall war, zeigte ein weiterer Versuch mit einer Schallbrücke in Randnähe. Auch hier gelang eine Lokalisierung auf ungefähr 10 cm genau mit nur sieben Meßpunkten. Damit erwies sich das hier skizzierte Verfahren der konventionellen Methode, die auf der Basis vieler Körperschallpegelmessungen die Schallbrücke am Ort maximalen Pegels vermutet, als eindeutig überlegen.

4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Das Studium der Körperschallausbreitung bei der Längsdämmung ist ein weiteres wichtiges Gebiet für den Einsatz der Körperschallintensitätsmeßtechnik, da insbesondere die Energieflüsse von der Sende- zur Empfangsseite, von der Sendeseite in die Trennwand oder in andere an die Längswand angrenzende Bauteile noch wenig bekannt sind. Die gleichzeitige Darstellung von Körperschallpegel und -intensität erlaubt aber nicht nur Rückschlüsse auf den Energiefluß, sondern auch auf die angeregten Schwingungsmoden – vor allem bei tieferen Frequenzen. Darüber hinaus wird eine systematische Untersuchung der Dämpfung von BiegeWellen im Wandmaterial möglich. Die Dämpfung von Körperschall spielt eine wichtige Rolle bei der Längsdämmung, da ja aufgrund des Energieerhaltungssatzes die in die Bauteile eingespeiste Schwingungsenergie entweder als Luftschall abgestrahlt oder durch Dämpfung in Wärme umgewandelt werden muß. Es erscheint durchaus wahrscheinlich, daß Intensitätsmessungen Wege weisen werden, wie die Dämpfung von Bauteilen verändert werden sollte, um eine Verbesserung der Längsdämmung zu erzielen.

Bild 7 illustriert die Verhältnisse bei einer 30 cm dicken Kalksandsteinwand (11 m lang, 3 m hoch) im mittleren Frequenzbereich (458 Hz bis 1170 Hz). Eine 24 cm starke Querwand teilte diese Längswand ungefähr in der Mitte in zwei Hälften. Die dabei entstandene Stoßfuge war mit Mörtel ausgefüllt. Die rechte Hälfte wurde durch einen Lautsprecher beschallt, der sich nahe der rechten oberen Ecke befand.

Die Abnahme des Körperschallpegels von der Sendeseite zur Empfangsseite ist deutlich sichtbar; die Intensitätspfeile sind vorzugsweise nach links gerichtet. Nahe der Querwand ist

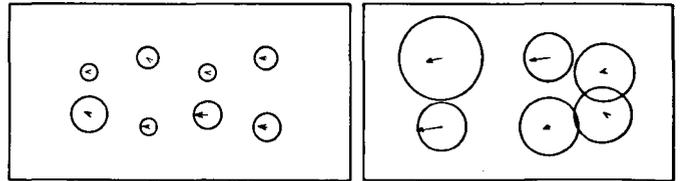


Bild 7. Schwingungsbilder der beiden Hälften einer Kalksandstein-Längswand. Die Anregung erfolgte hinter der rechten Hälfte nahe der rechten oberen Ecke durch Lautsprecher (Mittelwerte über Frequenzen von 458 Hz bis 1170 Hz)

das Körperschallfeld vorwiegend aus nach links laufenden Wellen zusammengesetzt, während weiter rechts und weiter links der relativ geringe Energietransport eher auf stehende Wellen oder ein diffuses Feld hindeutet. An solchen qualitativen Beobachtungen können sich nun quantitative Analysen anschließen, z. B. Abschätzungen der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten an der Querwand, am linken und am rechten Rand sowie der Dämpfung in der Längswand. Darauf soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden, da die entsprechenden Untersuchungen, die Frau Dipl.-Ing. E. Veres am hiesigen Institut durchführt, noch nicht abgeschlossen sind.

Im Unterschied zum Lokalisierungsverfahren, bei dem der Betrag der Intensität im Vergleich zur Richtung eine untergeordnete Rolle spielt, wird man in zahlreichen anderen bauakustischen Anwendungen der Intensitätsmessung eher am Betrag als an einer genauen Richtung interessiert sein. Zuverlässige Absolutwerte der Intensität liefert die hier beschriebene Meßmethode aber nur in einem beschränkten Frequenzbereich (vgl. Abschnitt 2). Zum Glück ist es jedoch in vielen Fällen ausreichend, die relative Änderung der Intensität an verschiedenen Stellen eines Bauteils zu kennen; dadurch kann die Beschränkung zu höheren Frequenzen hin etwas überschritten werden. Andernfalls müßten eventuell aufwendigere Verfahren der Körperschallintensitätsmessung herangezogen werden (siehe z. B. [7]).

Als weitere bauakustische Anwendungsmöglichkeiten des Intensitätsmeßverfahrens seien genannt: Untersuchung der Energieflüsse bei der Direktschalldämmung von Wänden und Fenstern (interessant vor allem im Hinblick auf die Randbedingungen und die Energieübertragung an den Rändern), Körperschallausbreitung in Wänden mit „linienförmigen“ Inhomogenitäten (Installationsrohre, Balken, Stahlträger, Dickenänderungen, Dehnfugen etc.), Körperschallausbreitung im Mauerwerk u. a. m. Im Grunde genommen wäre zu überlegen, ob sich nicht in all den Fällen, in denen bisher nur Körperschallpegelmessungen durchgeführt wurden, mit Körperschallintensitätsmessungen wesentliche zusätzliche Erkenntnisse erzielen ließen.

Literatur:

- [1] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Geräuschintensitätsmeßverfahren – Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. VDI-Berichte 526, VDI-Verlag, Düsseldorf 1984.
- [2] Kruppa, P.: Measurement of Structural Intensity in Building Constructions. Appl. Acoust. 19 (1986), S. 61–74.
- [3] Cremer, L. und Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag, Berlin 1982, Berichtigter Nachdruck, S. 112.
- [4] Noiseux, D. U.: Measurement of power flow in uniform beams and plates. J. Acoust. Soc. Am. 47 (1970), S. 238–247.
- [5] Maysenhölder, W. und Schneider, W.: Entwicklung eines Meßverfahrens zur Lokalisierung von Körperschallbrücken in mehrschaligen Wänden. Bericht BS 166/87 aus dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart 1987.
- [6] Maysenhölder, W. und Schneider, W.: Sound bridge localization in buildings by structure-borne sound intensity measurements. Acustica (eingereicht).
- [7] Pavić, G.: Structural surface intensity: an alternative approach in vibration analysis and diagnosis. J. Sound Vib. 115 (1987), S. 405–422.