

13 (1986) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
F.P. Mechel
Schalldämmung von ausgestopften und/oder versiegelten Fugen *)
Aufgabenstellung

Der resultierende Schallschutz zwischen Nachbarräumen oder gegen Außenlärm wird durch drei Kategorien von Schallübertragern bestimmt. Zuerst sind dies die trennenden Bauteile; darüber gibt es eine Vielzahl meist experimenteller Untersuchungen. Die zweite Gruppe bilden die flankierenden Bauteile; diese sind seit einiger Zeit in das Blickfeld der Bauakustik gerückt. Die dritte Kategorie stellen die Löcher und Fugen in den Wänden dar. Diese sind teils geplant und unvermeidlich wie Funktionsfugen an Fenstern und Türen, teils sind sie unbeabsichtigt wie an den Elementstößen elementierter Wände, an den Verbindungsstößen verschiedener Bauteile (z.B. Trennwand—Fassade, Trennwand—Decke, Trennwand—Boden). Die Schallübertragung durch solche Fugen begrenzt in vielen Fällen den durch die trennenden und flankierenden Bauteile allein erreichbaren Schallschutz.

Im Unterschied zu den beiden ersten Gruppen der Schallübertrager ist der Schalldurchgang durch Fugen relativ wenig untersucht. Hier wären die Pionier-Untersuchungen von Gomperts [1-4] zu nennen und einige experimentelle Untersuchungen aus dem IBP [5-7]. Um die Schalldämmung von Löchern und Fugen in Wänden zu verbessern, werden sie üblicherweise mit Absorptionsmaterial ausgestopft und/oder in ihren Endflächen mit einer plastischen Versiegelungsmasse versiegelt. Die Aufgabe einer theoretischen Behandlung des Schalldurchgangs durch derartige Wandöffnungen wurde bis jetzt noch nicht aufgegriffen. Eine theoretische Lösung des Problems scheint

angezeigt zu sein, um eine Übersicht über die zahlreichen Geometrie- und Materialparameter zu erhalten.

Anordnung

In einer Wand der Dicke d befindet sich eine kreisförmige Öffnung oder ein langer Spalt der Weite $2a$. Die Endflächen der Größe S können wahlweise mit einer plastischen Versiegelung versehen sein, deren flächenbezogene Massen m_1 und m_2 betragen. Wenn die Öffnung mit einem Absorbermaterial ausgestopft ist, wird dieses Material durch seine akustischen Kennwerte beschrieben, nämlich durch die normierte Ausbreitungskonstante Γ_{an} und den normierten Wellenwiderstand Z_{an} . Beide lassen sich auf einfache Weise aus dem längenbezogenen Strömungswiderstand des Materials α ermitteln [8]. Von der einen Seite soll eine ebene Schallwelle p_e unter einem Schalleinfallswinkel θ_1 einfallen.

Zerlegung der Schallfelder

Zur Berechnung wird das Schallfeld in Komponenten zerlegt, s. Bild 2. An der schallharten Oberfläche der Wand entsteht eine reflektierte Schallwelle p_r . In der Eingangsebene der Öffnung wird eine über die Fläche gemittelte Schallschnelle v_1 erzeugt. Diese Schallschnelle gibt Anlaß zu einer auf die Einlaßseite zurückgestreuten Schallwelle p_s und zu einer in den Kanal der Öffnung nach rechts laufenden Kanalwelle p_{i1} . In der Austrittsebene des Öffnungskanals findet eine teilweise Reflexion statt in die Kanalwelle p_{i2}

*) gefördert durch Stiftung Volkswagenwerk unter Projekt-Nr. 1/61 168

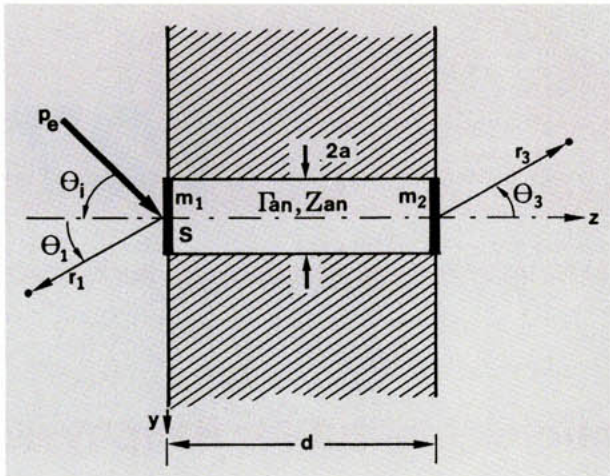


Bild 1: Schlitzförmige Öffnung in einer Wand

und eine Abstrahlung durch die abgestrahlte Welle p_t infolge der Schallschnelle v_2 in der Austrittsebene.

Diese Schallfeldkomponenten müssen zusammen die Randbedingungen erfüllen. Diese sind eine verschwindende Schallschnelle auf der Oberfläche der schallharten Wand und an den Innenwänden des Öffnungskanals, ferner die Anpassung von Schalldruck und Schallschnelle in den Endflächen der Öffnung. Daraus ergeben sich die erforderlichen Bestimmungsgleichungen für die zunächst unbestimmt an-

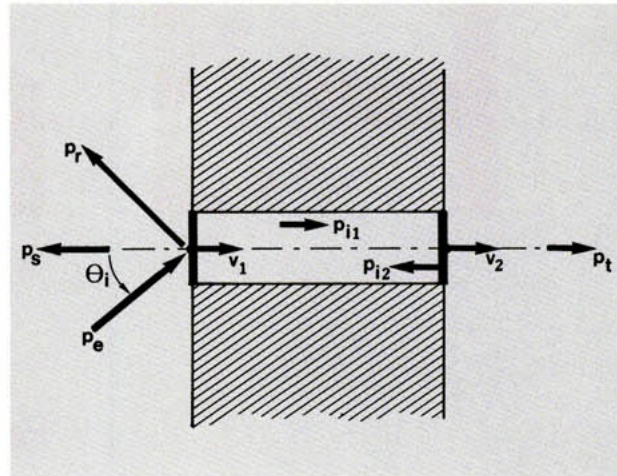


Bild 2: Schallfeldkomponenten

gesetzten Amplituden der Feldkomponenten.

Transmissionsgrad und Schalldämmmaß

Die Zielgröße ist der Transmissionsgrad τ der Öffnung, der das Verhältnis der durchgelassenen Schalleistung zu der auf die Öffnungsfläche auftreffenden Schalleistung ist. Daraus ergibt sich ein Schalldämmmaß R der Öffnung nach der Beziehung $R = -\lg \tau$. Die Schlußgleichung für den Transmissionsgrad einer kreisförmigen Öffnung beim Schalleinfallswinkel θ_1 lautet:

$$\tau(\theta) = \frac{Z_0}{\cos \theta_1} \cdot \operatorname{Re} Z_{r2} \cdot \left| \frac{2Z_a}{Z_a \cdot (Z_1 + Z_2) \cosh \Gamma_a d + (Z_a^2 + Z_1 \cdot Z_2) \sinh \Gamma_a d} \right|^2 \quad (1)$$

Darin sind Γ_a , Z_a die (nicht normierten) Kennwerte der Absorberfüllung. Bei einer Öffnung ohne Füllung sind diese zu ersetzen durch $j k_0$ und Z_0 als Kennwerte der Luftfüllung. Z_1 und Z_2 sind die Impedanzen der Endflächen. Sie werden gebildet durch die Summe der Strahlungsimpedanzen Z_{r1} und Z_{r2} sowie den Impedanzen der Versiegelungsmassen, also näherungsweise $j\omega m_1$ und $j\omega m_2$:

$$Z_1 = Z_{r1} + j\omega m_1; \quad Z_2 = Z_{r2} + j\omega m_2.$$

Bei einer schlitzförmigen Fuge in der Wand lautet der Transmissionsgrad:

$$\tau(\theta_1, \phi) = \frac{Z_a}{\cos \theta_1} \cdot \operatorname{Re} Z_{r2} \cdot \left| \frac{2 \frac{Z_a}{\cos \theta_2} \cdot \operatorname{si}(k_0 a \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \phi)}{\frac{Z_a}{\cos \theta_2} (Z_1 + Z_2) \cdot \cosh(\Gamma_a d \cdot \cos \theta_2) + \left[\left(\frac{Z_a}{\cos \theta_2} \right)^2 + Z_1 \cdot Z_2 \right] \cdot \sinh(\Gamma_a d \cdot \cos \theta_2)} \right|^2 \quad (2)$$

Gegenüber dem Schalldurchgang durch ein Loch kommt der azimutale Schalleinfallswinkel ϕ hinzu und der innere Brechungswinkel im Absorbermaterial θ_2 . Diesen bestimmt man aus der Relation:

$$\cos^2 \theta_2 = \sin^2 \phi + \cos^2 \theta_1 \cdot \cos^2 \phi.$$

Damit sind alle Bestimmungsgrößen bekannt bis auf die Strahlungsimpedanzen Z_r .

Strahlungsimpedanz

Diese Strahlungsimpedanz Z_r tritt in den Transmissionsgraden, bis auf den zweiten Faktor, immer im Wettbewerb mit der Impedanz der Versiegelung auf. Fehlt diese Versiegelung oder ist ihre Impedanz klein, dann bestimmt die Strahlungsimpedanz das Reflexionsverhalten der Mündungsflächen.

Bei einer kreisförmigen Öffnung in einer Wand wird die Strahlungsimpedanz eines Kolbenstrahlers verwendet; diese ist bekanntlich:

$$Z_r = Z_0 \cdot \left[1 - \frac{J_1(2k_0 a)}{k_0 a} + j \frac{S_1(2k_0 a)}{k_0 a} \right] \quad (3)$$

Hier und im folgenden sind $J_k(x)$, $S_k(x)$ die Bessel- bzw. Struve-Funktionen k -ter Ordnung. Für beide lassen sich gut brauchbare Näherungen angeben.

Bei der spaltförmigen Fuge werden die Endflächen zu bandförmigen Schwingungen angeregt. Ein solcher Bandstrahler in einer schallharten Wand besitzt die Strahlungsimpedanz:

$$Z_r = Z_0 \cdot x \cdot \left[H_0^{(2)}(x) + \frac{\pi}{2} [H_1^{(2)}(x) \cdot S_0(x) - H_0^{(2)}(x) \cdot S_1(x)] - \frac{1}{2x} H_1^{(2)}(x) + \frac{2j}{\pi x^2} \right] \quad (4)$$

Darin ist $x = k_0 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \theta_t}$ und $H_k^{(2)}(x)$ die Hankel-Funktion zweiter Art. Auch für diese Strahlungsimpedanz lassen sich Näherungen herleiten.

Numerische Berechnungen

Für die numerischen Berechnungen wurden folgende dimensionslose Hilfsgrößen eingeführt:

$$F = fd/c_0 ; A = 2a/d ; X = \epsilon d/Z_0 ; M = m/\rho_0 d .$$

F stellt eine Frequenzvariable dar; sie ist das Verhältnis der Wanddicke zur Schallwellenlänge. A ist ein Formparameter der Öffnung; X charakterisiert die Dichte der Ausstopfung und M ist ein Parameter für die Versiegelungsmassen. Bei der Ermittlung des Schalldämmmaßes für diffusen Schalleinfall muß über die Einfallwinkel θ_i und ϕ_i numerisch integriert werden.

Bild 3 zeigt Schalldämmmaße für senkrechten Schalleinfall von Löchern unterschiedlicher Weite in einer Wand; dabei ist das Loch leer und unversiegelt. Es treten resonanzartig negative Schalldämmmaße auf: Die Öffnung läßt mehr Schalleistung durch als geometrisch auf sie einfällt. Ein ähnliches Verhalten zeigt Bild 4 für eine leere und offene Fuge. Hier macht sich die Schalleinfallrichtung θ deutlich bemerkbar, wie Bild 5 für schrägen Schalleinfall zeigt. Den Einfluß einer Ausstopfung des Spalts mit wachsendem Strömungswiderstand verdeutlicht Bild 6 im Falle unversigelter Endflächen, und die Auswirkung unterschiedlicher Endversiegelungen (ohne Ausstopfung) zeigt Bild 7. Trotz eines mittleren Anstiegs der Schalldämmmaße mit wachsender Versiegelungsmasse beeinträchtigen die tiefen Resonanzeinbrüche den Nutzen einer solchen Maßnahme allein. Brauchbare Kurven des Schalldämmmaßes ergeben sich erst durch die Kombination einer Ausstopfung und einer Versiegelung, wofür Bild 8 ein Beispiel ist.

Näherungen

Für die vollständigen Gleichungen (1) und (2) konnten einfache Näherungen hergeleitet werden, die sich im Vergleich mit den exakten Berechnungen als sehr brauchbar und zuverlässig erwiesen. Diese Näherungen zeigen deutlicher den Einfluß der einzelnen Geometrie- und Materialparameter. So steigt die durchgelassene Schalleistung mit der vierten Potenz des Lochdurchmessers und mit der zweiten Potenz der Spaltweite. Für enge, leere Spalte erhält man:

$$\tau(\theta) = \frac{A}{\pi F} \cdot \left[1 + 2M - 4\pi^2 F^2 M (1 + M) \cos^2 \theta \right]^{-2} \quad (5)$$

Für offene und leere Spalte läßt sich dies bei tiefen Frequenzen weiter vereinfachen zu $\tau(\theta) = A/\pi F$.

Für Spalte mit Absorberfüllung findet man als tieffrequente Näherung:

$$\tau(\theta) = 4\pi h^2 FA/X^2. \quad (6)$$

Darin ist h die Porosität des Absorbermaterials.

Diese Näherungsformeln und die exakten numerischen Berechnungen für diffusen Schalleinfall bestätigen einige der experimentell festgestellten Abhängigkeiten. Sie stellen darüber hinaus sicher, bis zu welchen Größen der Parameter die Näherungen angewendet werden können.

Literatur

- [1] Gomperts, M.C.; Acustica 14(1964) 1-16. The "Sound Insulation" of Circular and Slit-Shaped Apertures.
- [2] Gomperts, M.C.; Acustica 15(1965) 191-198. The Influence of Viscosity on Sound Transmission through Small Circular Apertures in Walls of Finite Thickness.
- [3] Gomperts, M.C.; Kihlman, T.; Acustica 18(1967) 144-150. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls.
- [4] Gomperts, M.C.; Letter in J.Acoust.Soc.Am. 38(1965) 877. Comments on "Approximation to the Diffraction of Sound by a Circular Aperture in a Rigid Wall of Finite Thickness"
- [5] Gösele, K.; Decker, U.; Akust. u. Schwing.techn., DAGA-Tagg. 1972 Stuttgart, VDE-Verlag Berlin. Schalldämmung von Fugen mit porösen Dichtungsstreifen.
- [6] Ertel, H. IBP-Mitteilung Nr. 41(1978), Inst. f. Bauphys. Stuttg. Die Schalldämmung von Fugen — Möglichkeiten ihrer Verbesserung.
- [7] Ertel, H. wksb Zs. Wärme-Kälte-Schall-Brandschutz Aug. 1980. Experimentelle Untersuchungen zur Schalldämmung von Tür- und Trennwandfugen.
- [8] Mechel, F.P. Akustische Kennwerte von Faserabsorbern. Vol. I: IBP-Report BS 85/83; Vol. II: IBP-Report BS 75/82; Fraunh. Inst. Bauphys., Stuttg. 1982, 1983

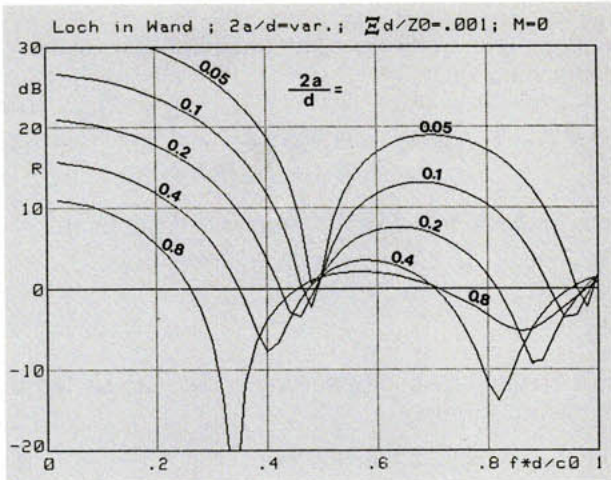


Bild 3: Schalldämmung einer Öffnung ohne Absorberfüllung für verschiedene Formfaktoren

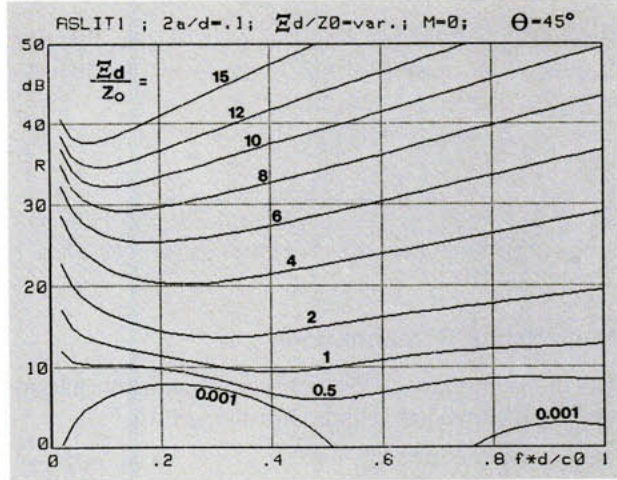


Bild 6: Schalldämmung unversiegelter schlitzförmiger Fugen bei schrägem Schalleinfall für Absorbermaterialien mit unterschiedlichen Strömungswiderständen

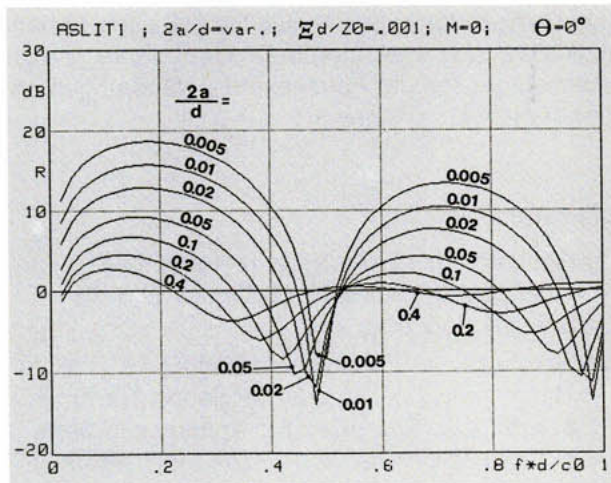


Bild 4: Schalldämmung einer schlitzförmigen Fuge ohne Absorberfüllung bei normalem Schalleinfall

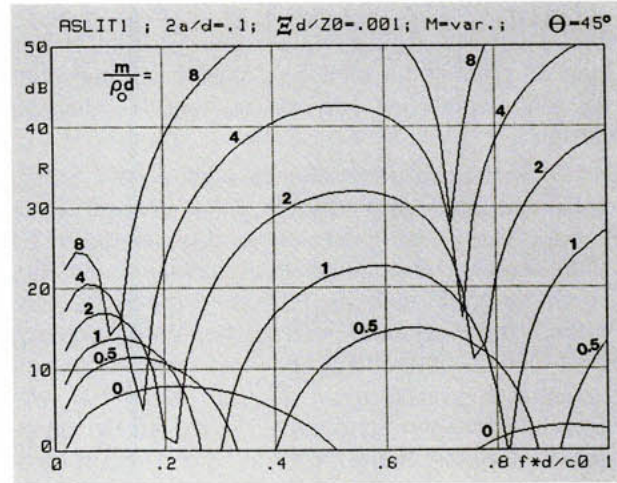


Bild 7: Schalldämmung schlitzförmiger Öffnungen ohne Absorberfüllung bei unterschiedlichen Dichtungsmaterialien

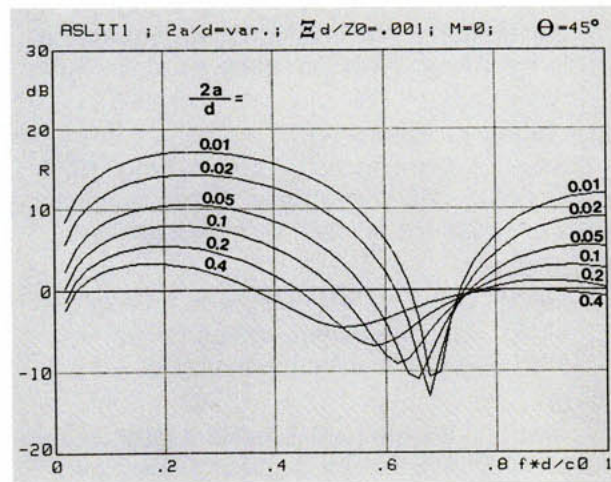


Bild 5: Schalldämmung einer schlitzförmigen Fuge ohne Absorberfüllung bei schrägem Schalleinfall

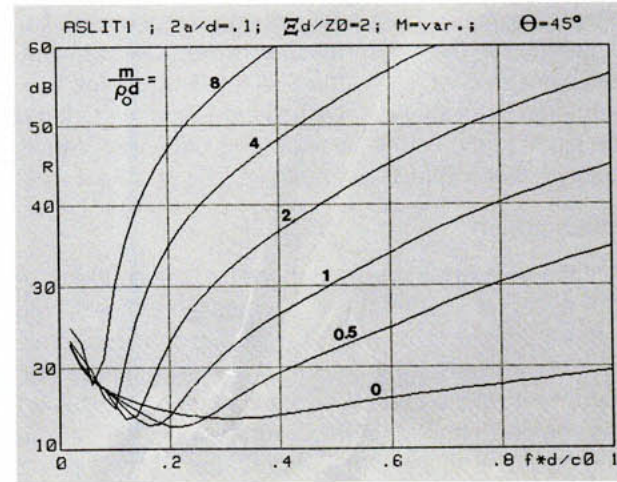


Bild 8: Schalldämmung schlitzförmiger Öffnungen mit Absorberfüllung bei unterschiedlichen Endversiegelungen

