

# Numerische Simulation von Schalldämmproblemen der Bauakustik

Sabine Langer, Heinz Antes

Institut für Angewandte Mechanik, TU Braunschweig; Email: [s.langer@tu-bs.de](mailto:s.langer@tu-bs.de)

## Einleitung

Der Entwurf moderner Bauten sollte nicht alleine unter konstruktiven und ästhetischen Gesichtspunkten erfolgen, sondern insbesondere die bauphysikalischen Aspekte zur Sicherstellung der Wohnqualität berücksichtigen.

Das akustische Verhalten von Hochbauten stellt sich dabei als komplexes Wechselwirkungsproblem dar, bei dem sowohl die unterschiedlichen Bauelemente und -stoffe wie auch die Umgebung eine große Rolle spielen. Eine Abschätzung dieses Verhaltens in der Entwurfsphase gestaltet sich daher als sehr schwierig. Den bauphysikalischen Schallschutznachweisen liegen in der Regel Mess- oder Erfahrungswerte von einzelnen Referenzbauteilen zugrunde, aus denen überschlägig die Schalldämmung des gesamten Bauwerks ermittelt wird, obwohl eine numerische Simulation schneller und effektiver wäre.

## Berechnungsgrundlagen

Bei den Trennbauteilen im Hochbau handelt es sich in der Regel um plattenförmige Bauteile. Die Schalldämmung dieser Platten entspricht dem Widerstand, den sie der Schalltransmission entgegenbringen. Die Platten werden durch Luft- oder Körperschall in Schwingungen versetzt, so daß sie wiederum Schall abstrahlen und so der Schall transmittiert wird. Den größten Anteil an der Schalltransmission haben dabei die Biegeschwingungen  $w$ , die hier mit einer passenden Plattentheorie erfaßt werden. Es ist dies die Kirchhofftheorie (s. Gl. (1)) für dünne Trennbauteile (wie z.B. Fensterscheiben) und die Timoshenko-Mindlin-Platte (s. Gl. (2)) für Wände. Eine Abgrenzung der Theorien in Abhängigkeit der Bauteildicke und Anregungsfrequenz findet sich in [2].

$$B\Delta\Delta w + \rho h\ddot{w} = p_B \quad (1)$$

$$B\Delta\Delta w - \left(\frac{B\rho}{G} + \rho I\right)\Delta\ddot{w} + \rho h\ddot{w} + \rho I\frac{\rho}{G}\ddot{\ddot{w}} = p_B - \frac{B}{Gh}\Delta p_B + \frac{\rho I}{Gh}p_B \quad (2)$$

Die Ausbreitung des Luftschalldrucks  $p$  wird im Modell durch die Wellengleichung nach Gl. (3) für ideale, kompressible Fluide beschrieben.

$$\Delta p - \frac{1}{c^2}\ddot{p} = 0 \quad (3)$$

Die numerische Berechnung von Schalldämmproblemen der Bauakustik erfolgt mit der Finiten-Element-Methode im Frequenzbereich. Dazu werden die differentiellen Beziehungen durch einen harmonischen Zeitanatz in den Frequenzbereich überführt. Für das Fluid erhält man dann die Helmholtz-Gleichung.

Es werden die Strukturen wie Wände, Decken, Fensterscheiben u.s.w. ebenso mit Finiten Elementen diskretisiert (Gl. (5)) wie alle abgeschlossenen Fluidgebiete, wie z.B. die Luft in den Zimmern oder Gasfüllungen in den Zwischenräumen der Fenster (Gl. (4)). Ist die Schallausbreitung aus oder in die Umgebung

von Interesse, so wird für dieses unendlich ausgedehnte Gebiet wegen der bekannten Vorteile zusätzlich die Randelementmethode verwendet. Die Interaktionen zwischen den einzelnen Bauteilen untereinander und mit den umgebenden Luftgebieten werden durch eine strenge Kopplung der Gebiete und damit auch der Methoden basierend auf dem Arbeitsprinzip realisiert [2,3].

$$\left(\mathbf{K}_1 - k^2\mathbf{K}_2\right)\mathbf{p} = -\rho\omega^2\mathbf{C}^T\mathbf{w}^{(i)} \quad (4)$$

$$\left(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}\right)^*\mathbf{w} = -\mathbf{C}\mathbf{p}^{(i)} \quad (5)$$

Vielfältige Faktoren beeinflussen die Schalltransmission durch die einzelnen Teile eines Gebäudes und damit deren bauakustische Eigenschaften. Zu unterscheiden sind Einflüsse aus Baustoffeigenschaften, Einflüsse des Bauteilaufbaus und der Einfluß der Schallanregung sowie die Auswirkungen der Geometrie auf die Schalldämmung. Diese Faktoren müssen sich durch ein numerisches Berechnungsverfahren abbilden lassen, wenn mit diesem die Schalldämmwirkung von Gebäudeteilen simuliert werden soll. Im nächsten Abschnitt wird daher auf die Modellierung der Flankenübertragung und die Modellierung von inhomogenen Wänden sowie Dämmstoffen näher eingegangen und es werden Rechnungen zu diesen Problemen vorgestellt.

## Beispielrechnungen

### Flankierende Bauteile

Der Einfluß der Flankenübertragung auf die Schalldämmung findet Berücksichtigung durch die Implementierung der Gleichung für die elastische Scheibe. Mit dieser Differentialgleichung können in-plane Wellen von plattenförmigen Bauteilen erfaßt werden, die an Ecken in BiegeWellen umgewandelt werden und damit den Einfluß der Flankenübertragung ausmachen.

Der Einfluß flankierender Wände soll hier an einer kleinen Modellkonfiguration studiert werden. Es wird der Schalldurchgang durch eine gelenkig gelagerte Metallplatte mit den Abmessungen 0,386 m x 0,304 m und  $E = 104\text{ GPa}$ ,  $\rho = 8500\text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 0,37$  sowie einer Dicke von 0,9144 mm in einen Raum mit einer Tiefe von 0,542 m untersucht. Als Schallabsorptionsgrad der Wände wird 0,343 angenommen. Für die Luft wird hier und in den weiteren Beispielen eine Schallgeschwindigkeit  $c_F$  von 346 m/s und eine Dichte  $\rho_F$  von 1,21  $\text{kg/m}^3$  angesetzt.

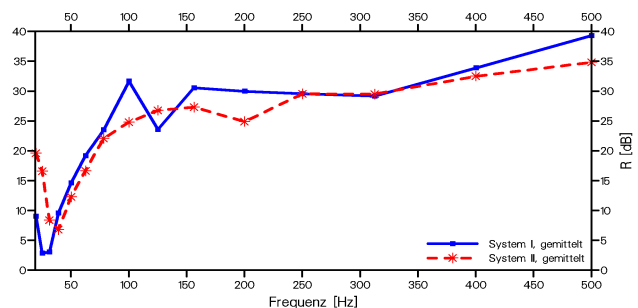


Abbildung 1: Einfluß flankierender Bauteile

Die terzgemittelten Schalldämmkurven in Abb. 1 zeigen den Vergleich einer Berechnung ohne Berücksichtigung der flankie-

renden Bauteile (System I) mit einer Berechnung bei der die flankierenden Metallplatten biegesteif an das Trennbauteil angeschlossen sind (System II). Es zeigt sich eine verschlechterte Schalldämmung beim System II, da hier Energieableitung in den Raum auf den zusätzlichen Wegen der Schallableitung über die flankierenden Bauteile möglich ist.

### Inhomogene Wände

In der Realität weisen Wände häufig kein isotropes Materialverhalten auf. Es sind in Regel, wie z.B. bei Mauerwerk, ausgezeichnete Richtungen vorhanden, so daß eine orthotrope Platte implementiert ist, die diesem speziellen richtungsabhängigen Materialverhalten Rechnung trägt.

Auch komplexe Wandaufbauten, z.B. mit einer Putzschicht auf Mauerwerk oder Fachwerk können modelliert werden, in dem ein Homogenisierungsverfahren verwendet und erweitert wurde [1]. Dieses Verfahren führt auf homogenisierte Materialparameter für eine orthotrope Mindlin-Platte.

Der Einfluss von inhomogenen Wänden auf die Schalldämmung wird hier am Beispiel einer Wand aus Kalksandstein (KS) und Kalkmörtel (M) untersucht. Dabei werden Berechnungen unter Verwendung des Homogenisierungsverfahren für unterschiedlich stark abweichenden Elastizitätsmoduli für Steine und Mörtel einer Berechnung gegenübergestellt, bei der durch flächenhafte Mittelung der Materialparameter ein "gleichwertiges" isotropes Material bestimmt wurde. Die Werte für die Querkontraktion sind  $\nu_{KS} = 0,15$  bzw.  $\nu_M = 0,25$ , für die Dichte  $\rho_{KS} = 1700$  bzw.  $\rho_M = 1600 \frac{kg}{m^3}$  und für den Verlustfaktor  $\eta$  jeweils 0,04.

Den Berechnungen liegen folgende Annahmen für die Geometrie zugrunde: Die Wand ist 2,95 m x 4,25 m x 0,24 m groß und der dahinterliegende Raum weist eine Tiefe von 4,00 m auf. Die Kalksandsteine haben Abmessungen von 115 mm x 71 mm x 24 mm und als Breite für Längs- und Querfugen werden jeweils 10 mm angenommen.

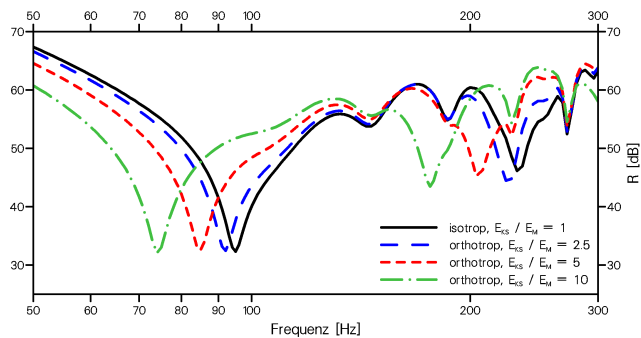


Abbildung 2: Schalldämm-Maß bei Variation des E-Moduls der Bestandteile

Erwartungsgemäß zeigen die Ergebnisse der Berechnungen in Abb. 2 eine starke Abhängigkeit vom Grad der Inhomogenität. Je größer der Unterschied zwischen den Elastizitätsmoduli der einzelnen Bestandteile ist, desto stärker weichen die Ergebnisse für eine orthotrope Berechnung mit den homogenisierten Eingangsparametern ( $E_{KS}/E_M = 2,5 \dots 10$ ) von der isotropen Berechnung mit flächenhaft gemittelten Größen ( $E_{KS}/E_M = 1$ ) ab. Dies bestätigt, daß die Vereinfachung zu isotropen Materialverhalten für Mauerwerk nicht zutrifft und das vorgestellte Verfahren Anwendung finden muß.

### Dämmstoffe

Im Hochbau finden häufig poröse Baustoffe Anwendung, da

diese sowohl unter wärmeschutztechnischen aber auch unter Schallschutz-Gesichtspunkten vorteilhaft sind. Bei luftgesättigten, starren oder sehr weichen porösen Medien breitet sich in einem solchem Material nur Dichtewellen aus, die mit der modifizierten Helmholtz-Gleichung beschrieben werden können. Aus den Materialdaten des porösen Materials wird eine frequenzabhängige, effektive Schallwellengeschwindigkeit für ein sog. äquivalentes Fluid ermittelt und diese findet Eingang in die Berechnung nach Gl. (4). Eingangsgrößen in die Berechnung der effektiven Größe ist die Porosität  $\phi[-]$ , der Strukturfaktor  $\alpha_\infty[-]$ , der längenbezogene Strömungswiderstand  $R_L[Ns/m^4]$  und der viskose bzw. thermische Verlustfaktor  $\Lambda_v$  bzw.  $\Lambda_t[\mu m]$  (vgl. Tab. 1).

Die Auswirkungen der Wahl unterschiedlicher Dämmstoffe auf die Güte der Schalldämmung wird mit diesem Berechnungsbeispiel studiert. Dabei wird in den Zwischenraum einer Doppelwand aus jeweils 1,25 cm starkem Gipskarton ( $E = 3$  GPa,  $\nu = 0,15$ ,  $\rho = 8000 [kg/m^3]$ ,  $\eta = 0,005$ ) mit den Abmessungen 1,00 m x 1,20 m, die einen 0,80 m von einem 1,20 m tiefen Raum trennt, verschiedene Dämmmaterialien der Dicke 5 cm platziert. Als Dämmmaterial wird Mineralfaserdämmung (MIFA), Polycarbodiimide (PCD), Polyurethane (PUR) und Steinwolle ausgewählt. Die Materialdaten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

	$\phi$ [-]	$\alpha_\infty$ [-]	$R_L$ [Ns/m <sup>4</sup> ]	$\Lambda_v$ [ $\mu m$ ]	$\Lambda_t$ [ $\mu m$ ]
MIFA	0,95	1,40	25000	93	186
Steinwolle	0,94	2,10	135000	49	166
PUR	0,90	7,80	25000	226	226
PCD	0,97	2,52	87000	36	116

Tabelle 1: Materialkennwerte der porösen Dämmstoffe

Ein Vergleich der terzgemittelten Schalldämmkurven bei Verwendung verschiedener Dämmmaterialien (s. Abb. 3) ergibt große Unterschiede. Es zeigt sich, daß Materialien mit einem großen längenbezogenen Strömungswiderstand und einem kleinen Strukturfaktor die besten Schalldämmwerte liefern.

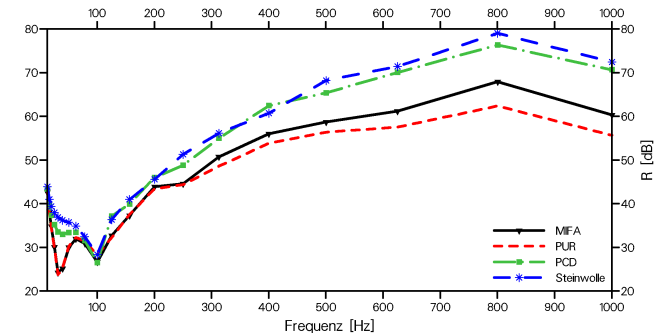


Abbildung 3: Schalldämm-Maß bei Verwendung verschiedener Dämmstoffe

1. Ackermann, L.: Simulation der Schalltransmission durch Wände, Braunschweiger Schriften zur Mechanik, Vol. 43, 2001.
2. Langer, S.: Schalltransmission durch Isolierverglasung, Braunschweiger Schriften zur Mechanik, Vol. 41, 2001.
3. Langer, S.; Antes, H.: Analyses of Sound Transmission through Windows by Coupled Finite and Boundary Element Methods, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 89, pp. 78–85, 2003.