

# Bestimmung des Dissipations- und Transmissionsgrades dünner, endlicher Schichten bei senkrechtem Schalleinfall

Xiaoru Zhou, Horst Drotleff, Michael Leistner und Ting Zhang

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: zhou@ibp.fhg.de

## Einleitung

Für die akustische Beschreibung dünner Trennungsschichten, z.B. aus Textilien im Raum, genügt in einigen praktischen Fällen der Bezug zum Strömungswiderstand oder bei geschlossenen biegeweichen Folien zur flächenbezogenen Masse. Bei anderen Anwendungen bleiben allerdings Fragen offen und die Optimierung bedarf einer genaueren Herangehensweise. Als häufig direkt untersuchte Größe setzt sich der Absorptionsgrad aus der Summe von Dissipations- und Transmissionsgrad zusammen, Abb. 1. Ist auch letzterer bekannt, lässt sich die Dissipation berechnen. Diese Beziehung wird mit Beispielen für senkrechten Schalleinfall rechnerisch und experimentell illustriert. So kann anhand des Transmissionsgrades etwa die Abschirmungswirkung einer dünnen Trennungsstruktur abgeschätzt werden. Beispielhaft wird auch die Schalldämmung von biegesteifen Schichten berechnet und im Vergleich zum Massegesetz erörtert.

## Rechenmodell

Es wird angenommen, dass die Trennimpedanz einer dünnen Schicht  $Z_{Trenn}$  ist, siehe Abb. 1. In [1] ist eine ausführliche Beschreibung zur Herleitung der  $Z_{Trenn}$  aus unterschiedlichen Strukturen dargelegt.

Die Eingangsimpedanz einer Grenzschicht mit einer Trennimpedanz  $Z_{Trenn}$  vor einer unendlichen Luftschicht lässt sich einfach durch das Additionsprinzip berechnen, nämlich  $Z = Z_{Trenn} + Z_0$ , wobei  $Z_0 = \rho_0 c_0$  die Kennimpedanz der Luft ist. Damit ergibt sich der Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall aus dem Reflexionsfaktor  $r$  zu:

$$\alpha = 1 - r^2 = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z_{Trenn}}{Z_{Trenn} + 2Z_0} \right|^2 \quad (1.)$$

Um den Transmissionsgrad zu berechnen, muss das Verhältnis zwischen der durchgelassenen Energie und der

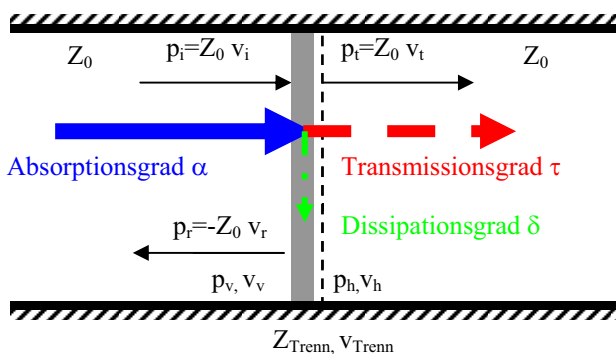


Abbildung 1. Parameter an der Trennschicht

einfallenden Energie an der Trennschicht (grauer Streifen in

Abb. 1) bestimmt werden. Die Schalldruckdifferenz  $p_v - p_h$ , zwischen Vorder- und Rückseite, bewegt die dünne Schicht mit der (Trenn-) Impedanz  $Z_{Trenn}$ :

$$p_v - p_h = Z_{Trenn} v_{Trenn} \quad (2.)$$

Da die Struktur als dünn angenommen wird, schwingen die Luftschichten, die sich sehr nah an der vorderen ( $v_v$ ,  $v$  entspricht der Schnelle) und hinteren ( $v_h$ ) Seite der Struktur befinden, gleichzeitig mit dieser ( $v_{Trenn}$ ):

$$v_i + v_r = v_v = v_{Trenn} = v_h = v_t \quad (3.)$$

Der Schalldruck vor der Struktur wird aus einfallender und reflektierender Welle zusammengesetzt:

$$p_v = p_i + p_r = Z_0 v_i - Z_0 v_r \quad (4.)$$

Aus (2) und (4) ergibt sich

$$v_i - v_r = v_{Trenn} \frac{Z_{Trenn} + Z_0}{Z_0} \quad (5.)$$

Die Gleichung (3)  $v_i + v_r = v_{Trenn} = v_t$  wird mit (5) kombiniert:

$$v_i = v_t \left( 1 + \frac{Z_{Trenn}}{2Z_0} \right) \quad (6.)$$

Der Transmissionsgrad  $\tau$  und das Schalldämm-Maß  $R$  ergeben sich dann zu:

$$\tau = \left| \frac{v_t}{v_i} \right|^2 = \left| \frac{2Z_0}{Z_{Trenn} + 2Z_0} \right|^2, R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \text{ (dB)} \quad (7.)$$

Der in der Schicht vernichtete Anteil der Schallenergie, der durch den Dissipationsgrad  $\delta$  beschrieben wird, lässt sich aus dem Absorptionsgrad  $\alpha$  und dem Transmissionsgrad  $\tau$  berechnen:

$$\delta = \alpha - \tau = 1 - \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_0}{Z_{Trenn}}} \right|^2 - \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_{Trenn}}{2Z_0}} \right|^2 = \frac{\frac{\text{Re}(Z_{Trenn})}{Z_0}}{\left( 1 + \frac{\text{Re}(Z_{Trenn})}{2Z_0} \right)^2 + \left( \frac{\text{Im}(Z_{Trenn})}{2Z_0} \right)^2} \quad (8.)$$

In Abb. 2 wird die Beziehung zwischen dem Dissipationsgrad, dem Transmissionsgrad und dem Reflexionsgrad in Abhängigkeit des Verhältnisses von  $|Z_{Trenn}/Z_0|$  (bei Annahme  $\text{Im}(Z_{Trenn}/Z_0)=0$ ) dargestellt. Wenn die Trennimpedanz  $Z_{Trenn}$  viel kleiner als die Luftkennimpedanz  $Z_0$  ist, wird die Schallwelle weniger reflektiert und ein größerer Teil der Energie dringt durch die Schicht durch. Ist  $Z_{Trenn}$  viel größer als  $Z_0$ , wird ein größerer

Teil der Energie reflektiert und ein kleinerer Teil dringt ein. In beiden Fällen ist die Dissipation relativ gering. Bei  $|Z_{Trenn}| = 2Z_0$  (ca. 820 Pa. s/m) gibt es ein Maximum der Dissipation, welche ca. 50% beträgt, wobei ca. 25% der Schallenergie reflektiert und 25% durchgelassen wird. Ist  $I_m(Z_{Trenn}/Z_0)$  nicht gleich null, wird der maximale Dissipationsgrad immer kleiner als 0.5 sein.

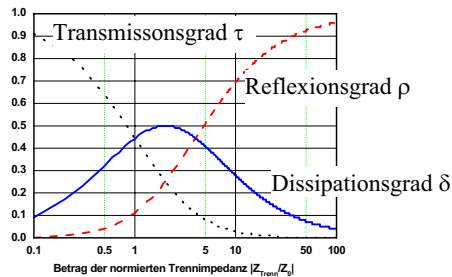


Abbildung 2:  $\rho + \tau + \delta = 1$

### Messungen an unterschiedlichen Strukturen

Der Dissipationsgrad  $\delta$  und das Schalldämm-Maß  $R$  von drei Trennschichten wurden nach dem Messverfahren in [2] gemessen (Linie im Diagramm). Der  $\delta$  wird nach Gleichung (8) (Kreis), das  $R$  wird nach (7) (Kreis) und dem Massegesetz (Strich-Punkt) berechnet. Das linke Diagramm in Abb. 3 zeigt die Dissipation eines dünnen Dekostoffs aus Synthetikfasern (Dicke ca. 1.4 mm, Flächengewicht ca. 0.5 kg/m<sup>2</sup>, Strömungswiderstand ca. 560 Pa s/m). Die Dissipation steigt zu hohen Frequenzen leicht an, ab ca. 1k Hz erreicht sie den Maximalwert von 0.5. Das gemessene  $R$  liegt bei höheren Frequenzen ( $f >$  ca. 500 Hz) zwischen den Kurven nach dem Massegesetz und der Gleichung (7).

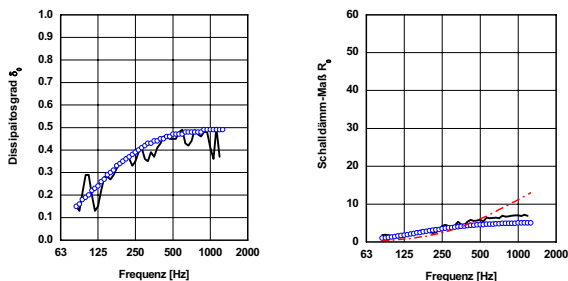


Abbildung 3:  $\delta$  und  $R$  eines Dekostoffes

Das linke Diagramm in Abb. 4 ist die Dissipation einer mikroperforierten biegeelastischen Folie (Dicke 0.42 mm, Lochdurchmesser 0.4 mm, Lochabstand 6 x 6 mm, Flächengewicht ca. 0.65 kg/m<sup>2</sup>) dargestellt. Möglicher Grund für die niedrigen Berechnungsergebnisse ist, dass bei der Berechnung der Trennimpedanz  $Z_{Trenn}$  nur die Moden bis 5-5 verwendet wurden. Werden die Biegeschwingung höherer Moden der Folie (Platte) und die Impedanz der Löcher berücksichtigt, stimmt das nach der Gleichung (7) berechnete Schalldämm-Maß mit der Messung besser überein als die Werte nach dem Massegesetz (Abb. 4, rechts).

Das linke Diagramm in Abb. 5 zeigt den Dissipationsgrad einer 2 mm dicken Aluminium Platte (Abmessung ca. 25 x 25 cm, Flächengewicht ca. 5.4 kg/m<sup>2</sup>). Die kleine Abweichung der gerechneten Resonanzen (bei ca. 160 Hz und 800 Hz) zu der Messung ist vermutlich auf die nicht klar definierte Randbedingung bei der Messung zurückzuführen.

Die Platte wurde bei der Messung im Impedanzrohr mit einer dauerelastischen Knetmasse (Terostat) befestigt. Diese Befestigung ist weder „Moment-Fest“ noch „Moment-Frei“; in der Berechnung hingegen wurde die Randbedingung „Moment-Frei“ angenommen.

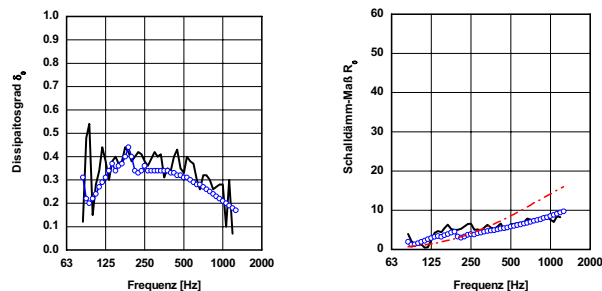


Abbildung 4:  $\delta$  und  $R$  einer mikroperforierten Folie

Bei einer biegeelastischen Platte sind die Resonanzen der einzelnen Moden in der Kurve vom Schalldämm-Maß (rechtes Diagramm in Abb. 5) zu erkennen. Die Grundmode von ca. 160 Hz stellt, wie erwartet, einen starken Einbruch dar. Von der Grundmode zu noch tieferen Frequenzen steigt das Schalldämm-Maß stark an. Das Schalldämm-Maß entspricht dem Massegesetz zwischen den Moden (bei ca. 315 Hz und ca. 1250 Hz) und oberhalb ca. 2500 Hz oder wenn die Platte sehr hohe innere Dämpfung hat. Die Effekte, dass das Schalldämm-Maß einer biegeelastischen Platte bei bestimmten Frequenzen ( $<$  125 Hz, bei 500 Hz in diesem Fall) (viel) höher als das Massegesetz ist, könnte für gewisse Anwendungen ausgenutzt werden.

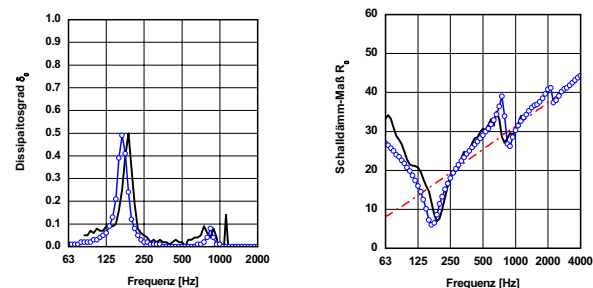


Abbildung 5:  $\delta$  und  $R$  einer 2 mm dicken Aluminium Platte

### Zusammenfassung

Ein Rechenmodell zur Abschätzung des Dissipationsgrades und Transmissionsgrades bzw. der Schalldämmung kleiner, dünner Proben bei senkrechtem Schalleinfall wird gezeigt. Die Ergebnisse der Berechnungen und der Messungen weisen ausreichende Übereinstimmungen auf. Das Rechenmodell für die Dissipation und Schalldämmung mehrschichtiger Strukturen mit Dämmstofffüllung und ihr winkelabhängiges Verhalten (im Diffusschallfeld) wird weiter entwickelt.

### Literatur

- [1] Zhou, X.; Heinz, R.; Fuchs, H.: Zur Berechnung geschichteter Platten- und Lochplatten-Resonatoren. Bauphysik, 20 (1998), Heft 3, Seite 87-95
- [2] M. Leistner, H. Drotleff: Akustische Transparenz perforierter Platten mit Stoffabdeckung. IBP-Mitteilung 456