

## Schallabsorption von zweilagig mikroperforierten Stellwänden

Roman Wack, Moritz Späh

Fraunhofer Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart

E-Mail: moritz.späh@ibp.fraunhofer.de

### Einleitung

In Ausstellungsräumen und Messehallen wird die Raumakustik in der Planung und Gestaltung oftmals nicht berücksichtigt. Hier spielen andere Eigenschaften der Räumlichkeiten und der Aufbauten eine wichtige Rolle. Im Allgemeinen steht die Optik an erster Stelle, danach kommen Fragen der Praktikabilität, des schnellen Auf- und Abbaus von Einbauten und Messeständen, Kosten etc. Über die Akustik, die in den Räumen entsteht, wird in der Regel nicht nachgedacht. In vielen Fällen führt dieses Vorgehen zu akustischen Bedingungen, die die Aufgabe der Menschen in diesen Räumen sehr erschwert oder teilweise unmöglich macht.

Auf Messeständen ist es eine zentrale Aufgabe, mit Kunden zu kommunizieren, die beworbenen Produkte zu erklären und zu Verkaufsabschlüssen zu kommen. Hierbei ist eine ausreichend gute Akustik unerlässlich, um in angemessener Lautstärke und mit ausreichender Ungestörtheit Gespräche erfolgreich führen zu können.

In Ausstellungsräumen macht sich die Akustik dann bemerkbar, wenn zur optischen Darbietung der Ausstellungsstücke die akustische Übermittlung von Inhalten hinzukommt. Dies tritt bei Vernissagen und bei immer beliebter werdenden Führungen durch Museen auf sowie, in weitaus größerem Umfang, in modernen interaktiven Ausstellungen. Hier zeigt sich schnell, ob durch angemessene Schallabsorption im Raum Bedingungen herrschen, die gute Kommunikation ermöglichen.

In vielen dieser Räume ist die Akustik ausgesprochen schlecht, weil es an Schallabsorption mangelt. Hierfür bieten sich Stellwände an, die in der Regel viel freie Oberfläche bieten, oftmals aber keine absorbierenden Eigenschaften aufweisen. Wichtig ist dabei, dass die optischen und konstruktiven Eigenschaften der Wandsysteme nicht verloren gehen.

### Stellwand

Die akustische Optimierung eines Stellwandensystems wurde für die Firma MBA am Fraunhofer IBP durchgeführt. Ausgangspunkt war das vorhandene Wandsystem Mila-wall Serie 100, das als Stellwandensystem im Messebau, in Museen und auch in Büros eingesetzt werden. Die Konstruktion der Wände zeichnet sich durch eine geringe Dicke der Bauteile von 40 mm, ein geringes Gewicht, eine einfache Montage und eine hochwertige Optik aus. Diese wird erreicht, indem die Oberflächen mit Folien bezogen sind, die ausgewechselt werden können. Der Eingriff in die Konstruktion und die Optik sollte bei der Entwicklung möglichst gering sein, dennoch sollte die Stellwand nun schallabsorbierend wirken.

Erste Überlegungen gingen dahin, den vorhandenen Wabenkern der Stellwand durch einen porösen Absorber zu ersetzen. Ein solcher Eingriff hätte jedoch eine Änderung der gesamten Konstruktion der Wände nach sich gezogen. Daher wurde dieser Ansatz verworfen und ein neuer Ansatz verfolgt, bei dem die beiden äußeren Platten der Stellwand mit einer Lochung versehen wurden. Als schallabsorbierende Schicht wurde die beidseitig aufgebrachte Folie vorgesehen, indem sie mikroperforiert wurde. Als Entwicklungsziel wurde ein Dissipationsgrad von 0,6 im mittleren Frequenzbereich angestrebt. Die Wandkonstruktion der Ausgangswand ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Stellwand Mila-Wall Serie 100 von MBA.

### Entwicklungsmethode

Die Entwicklung der absorbierenden mikroperforierten Wand erfolgte sowohl rechnerisch mit der Transfermatrix-Methode, als auch mittels Messungen im Impedanzrohr. Dadurch konnte das Rechenmodell messtechnisch überprüft und optimiert werden. Danach wurde die akustische Wirkung der optimierten Schichtung der Wand rechnerisch durch Integration über alle Einfallswinkel auf ihre Schallabsorption im diffusen Schallfeld abgeschätzt. Im letzten Schritt wurden optimierte Konstruktionen im Hallraum aufgebaut und ihr Dissipationsgrad gemessen.

### Impedanzrohr

Zur Messung der Schallabsorption bei senkrechtem Schalleinfall wurde das am IBP vorhandene Impedanzrohr mit einem Querschnitt von 250 mm x 250 mm und einer Länge von 7500 mm eingesetzt. Abweichend von der üblichen Verwendung wurde das Rohr mit einem

reflexionsarmen Abschluss durch einen Mineralwolle-Keil mit einer Länge von 1000 mm ausgestattet. Der Einbau der Probe erfolgte mittig im Rohr. Das Impedanzrohr ist in Abbildung 2 dargestellt.

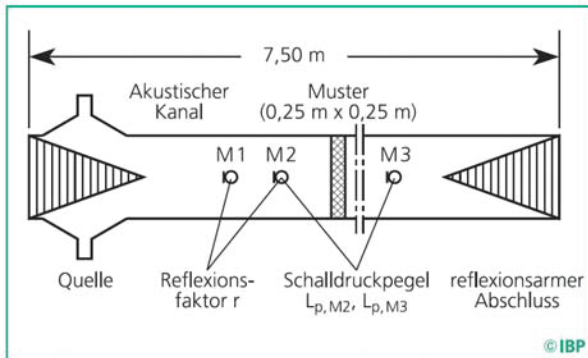


Abbildung 2: Impedanzrohr zur Messung der Proben

Vor der Probe, aus Richtung der einfallenden Welle, wurde mittels Zwei-Mikrofontechnik der Reflexionsgrad  $r$  an der Probenoberfläche aus der Messung des komplexen Reflexionsfaktors in Anlehnung an [1] berechnet. Die Methode ist in [2] beschrieben. Mittels eines dritten Mikrofons M3 hinter der Probe konnte aus der Messung der Pegeldifferenz zwischen einfallender Welle und Mikrofon der Transmissionsgrad  $\tau$  bestimmt werden. Der Dissipationsgrad  $\delta$  der Probe ergibt sich dann aus:

$$\delta = \alpha - \tau = 1 - r - \tau \quad (1)$$

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  beinhaltet sowohl den Dissipationsgrad als auch den Transmissionsgrad  $\tau$  und ist für Aufbauten vor schallharten Oberflächen eine sinnvolle und übliche Angabe zur Beschreibung der Schallabsorption. Für die hier beschriebenen frei stehenden Stellwände wird hier der Dissipationsgrad angegeben, aus dem durch Multiplikation mit der beidseitigen Oberfläche der Stellwände die äquivalente Absorptionsfläche berechnet werden kann.

## Transfermatrix-Methode

Die Transfermatrix-Methode ermöglicht die Modellierung der in Gleichung (1) beschriebenen akustischen Eigenschaften einer Wandkonstruktion. Dafür wird für jede akustisch wirksame Schicht der Wand eine Transfermatrix aufgestellt, die multiplikativ miteinander gekoppelt werden. Die Gesamtmatrix ergibt sich dann zu:

$$M = M_S^{-1} T_1 T_2 T_3 \dots M_E \quad (2)$$

Dabei ist

$$M_S = M_E = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \cos\theta/Z_0 & -\cos\theta/Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

die Matrix sende- und empfangsseitig, d.h. auf Seiten der einfallenden Welle und der durchgelassenen Welle.  $\theta$  ist der Winkel der einfallenden Welle zur Flächennormalen.

$Z_0$  ist die Kennimpedanz der Luft. Der Reflexionsgrad wird aus der Gesamtmatrix durch:

$$r = \left| \frac{M_{21} + M_{22}R_1}{M_{11} + M_{12}R_1} \right|^2 \quad (4)$$

und der Transmissionsgrad durch:

$$\tau = \left| \frac{1}{M_{11} + M_{12}R_1} \right|^2 \quad (5)$$

bestimmt. Dabei ist die Randbedingung hinter der Probe  $R_1 = 0$ , wenn keine rücklaufende Welle wie in unserem Fall auftritt. Für eine Luftschicht im inneren der Wand wird die Transfermatrix mit

$$T_L = \begin{bmatrix} \cos(k_0 \cos\theta d) & j \frac{Z_0}{\cos\theta} \sin(k_0 \cos\theta d) \\ j \frac{\cos\theta}{Z_0} \sin(k_0 \cos\theta d) & \cos(k_0 \cos\theta d) \end{bmatrix}$$

berechnet. Dabei ist  $j$  die imaginäre Einheit,  $k_0$  die Wellenzahl in Luft und  $d$  die Dicke der Luftschicht. Ist diese Luftschicht kassetiert, z.B. durch eine Wabenkonstruktion, so wird der Winkel  $\theta = 0$  innerhalb der Wand festgehalten.

Für zylindrische Löcher ist die Transfermatrix gegeben mit:

$$T_Z = \begin{bmatrix} 1 & Z_Z / \varepsilon_Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

mit:

$$Z_Z = j\omega\rho_0 t \left[ 1 - \frac{2}{k_m \sqrt{-j}} \frac{J_1(k_m \sqrt{-j})}{J_0(k_m \sqrt{-j})} \right] \quad (7)$$

Dabei ist  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $\rho_0$  die Luftdichte,  $t$  die Plattendicke,  $J_0$  und  $J_1$  Besselfunktionen erster Ordnung.

$k_m$  wird als Perforationskonstante bezeichnet und berechnet sich aus

$$k_m = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{\eta}} \quad (8)$$

Mit  $d$  dem Lochdurchmesser und  $\eta$  der dynamischen Viskosität der Luft.  $\varepsilon_Z$  ist der Lochflächenanteil der Löcher auf der Platte.

Beim Übergang der Luftschicht zur gelochten Schicht und von der gelochten Schicht zur Luftschicht muss jeweils die Mündungskorrektur durch eine Transfermatrix wie in Gleichung (6), bei der  $Z_Z$  durch  $Z_M$  ersetzt wird, mit:

$$Z_M = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2\omega\rho_0\eta} + j 0.85 d k_0 Z_0 \right] \quad (9)$$

berücksichtigt werden. Beim Übergang von gelochter Schicht zu einer Schicht mit hohem Strömungswiderstand, wie z.B. einer Vlieslage, entfällt die Mündungskorrektur. Die Vlieslage selbst wird mit einem spezifischen Strömungswiderstand durch die Transfermatrix:

$$T_B = \begin{bmatrix} 1 & Z_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

berücksichtigt. Dabei ist  $Z_B$  die Impedanz für die Vlieslage (nach Mechel „porösen Belag“) ohne Dicke:

$$Z_B = \left( \frac{1}{\sigma} + \frac{1}{j \omega m''} \right)^{-1} \quad (11)$$

Mit  $\sigma$  dem spezifischen Strömungswiderstand und  $m''$  der flächenbezogenen Masse des Vlieses. Wird dieses Vlies allerdings an die Lochplatte angeklebt, so wird die „akustische Masse“  $m''$  sehr groß und kann in (11) als unendlich angesetzt werden. Damit entfällt der zweite reaktive Term in (11). In diesem Fall ergibt sich für

$$Z_B = \sigma \quad (12)$$

Für auf Lochplatte geklebtes Vlies muss allerdings für die Transfermatrix auch der Lochflächenanteil der Lochplatte berücksichtigt werden:

$$T_B = \begin{bmatrix} 1 & \sigma / \varepsilon_Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Damit wird der Stömungswiderstand um den Lochflächenanteil erhöht. Diese Vorgehensweise bestätigte auch die messtechnische Ermittlung des Stömungswiderstands der Lochplatte mit aufgeklebtem Vlies.

Für den Fall einer mikroperforierten Folie, aufgeklebt auf eine Lochplatte, wird für die Transfermatrix ein vergleichbarer Ansatz gewählt:

$$T_Z = \begin{bmatrix} 1 & \frac{Z_{MP}}{\varepsilon_{MP} \varepsilon_Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Hierbei muss die Impedanz  $Z_{MP}$  der Mikroperforation mit dem Lochflächenanteil der Mikroperforation  $\varepsilon_{MP}$  und dem Lochflächenanteil der Lochplatte  $\varepsilon_Z$  gewichtet werden. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass sich die einzelnen Lochungen der Mikroperforation nicht gegenseitig beeinflussen. Die weiter unten gezeigten Ergebnisse zeigen, dass dieser neue Ansatz zur Berücksichtigung der Lochplatte eine gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung ermöglicht.

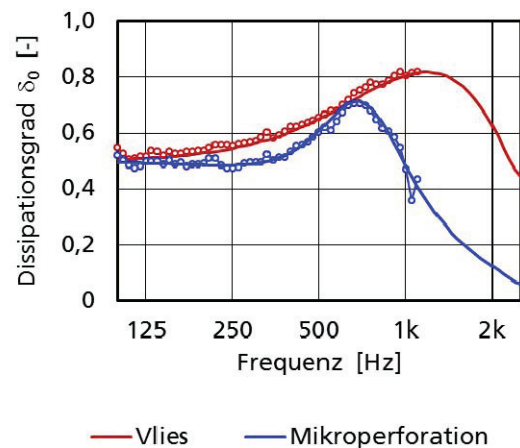
## Messungen und Modell

Der erste zweilagige Aufbau, der im Impedanzrohr eingebaut wurde, war ein Lochblech in zwei Schichten, das mit Akustikvlies beklebt war. Beide Schichten hatten einen

Abstand von 68 mm. Im Transfermatrixmodell wurde dieser Aufbau mit Matrizen für jeweils die einfallende Welle, die Mündungskorrektur, das Lochblech 1, den Akustikvlies 1, den Luftzwischenraum mit  $d = 68$  mm, den Akustikvlies 2, das Lochblech 2, die Mündungskorrektur von Lochblech 2 zur Luft und eine Matrix für die angrenzende Luft hinter der Probe modelliert. Alle weiteren Modellierungen wurden analog zu diesem Beispiel aufgebaut.

## Ergebnisse Impedanzrohr

Der erste Aufbau bestand aus Lochblech mit der Bezeichnung „Rg 5-10“ und hatte eine Dicke von 1 mm. Der Lochdurchmesser war 5 mm, der Lochabstand war 10 mm, der Lochflächenanteil betrug 19%. Das Vlies hatte einen spezifischen Strömungswiderstand von 95 Pa s/m, Lochblech mit Vlies hatte einen gemessenen Strömungswiderstand von 490 Pa s/m. Vergleichend dazu wurde ein Aufbau aus mikroperforiertem Blech mit 0,6 mm Dicke, Lochdurchmesser 0,5 mm, Lochabstand 5 mm und Lochflächenanteil 0,8 % mit einer Luftschichtdicke von 69 mm gemessen. Der Dissipationsgrad beider Proben ist in Abbildung 2 dargestellt.

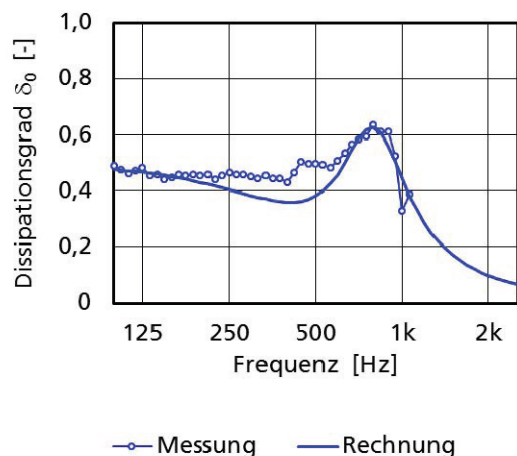


**Abbildung 2:** Messung (-o-) und Rechnung (-) des zweilagigen Lochblechs mit Akustikvlies im Abstand von 68 mm sowie für mikroperforiertes zweilagiges Blech im Abstand von 69 mm.

Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung für beide Aufbauten. Damit konnte das Transfermatrixmodell verwendet werden, um optimierte Materialgeometrien für einen Wandaufbau zu ermitteln. Diese wurden dann im Impedanzrohr messtechnisch überprüft.

In Zusammenarbeit mit dem Hersteller wurde eine auf Schallabsorption optimierte Wandkonstruktion entwickelt, die die Belange der Konstruktion der Wand und die Anforderungen an die Oberflächen berücksichtigte. Daher wurde die Grundkonstruktion der Wand beibehalten. Sie besteht aus einem Wabenkern, der beidseitig mit Holzwerkstoffplatten belegt ist. Diese wiederum sind mit Dekorfolie beklebt. Um akustische Wirksamkeit herzustellen wurden beide Holzwerkstoffplatten gelocht und die Dekorfolie mikroperforiert. Durch das Transfermatrix-Modell konnten die Parameter der Lochungen optimiert

werden. Aus Stabilitätsgründen der Konstruktion war der Lochflächenanteil der Holzwerkstoffplatten auf 40% begrenzt. Für einen ähnlichen zweilagigen Aufbau mit Lochplatte „Rd 10-15“ mit 1 mm Dicke, Lochflächenanteil 40%, Lochdurchmesser 10 mm und beidseitig aufgeklebter mikroperforierter Folie mit Lochflächenanteil von 0,8%, einem Lochdurchmesser von 0,5 mm und einem Lochabstand von 5 mm sind Messung und Rechnung in Abbildung 3 dargestellt.



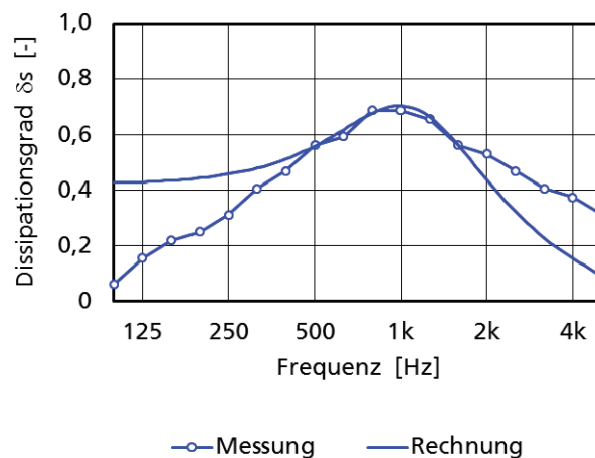
**Abbildung 3:** Messung (-o-) und Rechnung (-) des zweilagigen Aufbaus mit mikroperforierter Folie aufgeklebt auf Lochplatte im Abstand von 38 mm.

Auch dieser Vergleich zeigt eine recht gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung, vor allem im Bereich des hohen Dissipationsgrads unterhalb 1 kHz. Damit wird der Ansatz der Berücksichtigung der Lochflächenanteile in der Transfermatrix für die mikroperforierte Schicht auf Lochblech, Gleichung (14), bestätigt.

## Ergebnisse Hallraum

Die optimierten Konstruktionen aus dem Impedanzrohr wurden danach auch im Hallraum vermessen. Die Berechnung beruht ebenfalls auf dem Transfermatrix-Modell, allerdings wurde durch Integration über alle Schalleinfallswinkel (von 0 bis 78°) das diffuse Schallfeld im Hallraum berücksichtigt. Dagegen wurde im Berechnungsmodell die endlichen Abmessungen der 8 Probekörper im Hallraum von 1,0 m x 1,6 m nicht berücksichtigt. Der Vergleich der Stellwände mit zweilagig mikroperforierter Folie (Löcher genadelt, Lochdurchmesser ca. 0,15 mm, Foliendicke ca. 0,15 mm, Lochabstand ca. 1,76 mm auf Lochblech „Rd 5-7“ mit 3,4 mm Dicke, Lochflächenanteil 40% und Lochdurchmesser von 5 mm im Abstand von 34 mm und Wabenkern (kassettiert gerechnet) ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Vergleich zeigt im mittleren Frequenzbereich gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung und Werte des Dissipationsgrads von über 0,6. Tieffrequent werden höhere Werte berechnet als gemessen, was auf die endliche Größe der Probekörper im Hallraum zurückzuführen ist. Bei tiefen Frequenzen kann der Schall um die Probekörper herum beugen, was zu einer geringeren Dissipation der Stellwände führt. Dagegen kann die Abweichung zu höheren Dissipationsgraden bei hohen

Frequenzen nicht so einfach erklärt werden. Hier könnten sich mehrere Effekte, wie z.B. die Konstruktion am Rand der Stellwände, wo die luftdurchlässige Pappwabe durch einen Rahmen geschlossen ist, positiv auf die Dissipation auswirken.



**Abbildung 4:** Messung (-o-) und Rechnung (-) der zweilagigen mikroperforierten Folie auf Lochblech im Abstand von 40 mm unter diffusem Schalleinfall im Hallraum.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dieser Konstruktion im wichtigen mittleren Frequenzbereich ein guter Dissipationsgrad mit  $\delta > 0,6$  erreicht werden konnte, ohne dass die Stellwände optisch und konstruktiv grundlegend verändert wurden. Bei höheren Frequenzen nimmt die Dissipation ab, jedoch nicht so stark wie es die Berechnung prognostiziert. Da in diesem Frequenzbereich in der Regel Schallabsorption durch andere Materialien und Personen vorhanden ist, muss dieser Abfall nicht negative Auswirkungen auf die Raumakustik haben. Weiterhin zeigte die Untersuchung, dass mittels Transfermatrix-Methode gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung im Impedanzrohr und im Hallraum erreicht werden kann. Im tiefen Frequenzbereich ergeben sich allerdings für Stellwände geringere Dissipationsgrade. Daher ist es von Vorteil, größere zusammenhängende Stellwände einzusetzen.

## Literatur

- [1] DIN EN ISO 10534-2: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion. Oktober 2001. Mit Berücksichtigung von DIN EN ISO 10534-2 Berichtigung 1, November 2007.
- [2] M. Leistner, H. Drotleff: IBP Mitteilung 456: Akustische Transparenz perforierter Platten mit Stoffabdeckung. Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2004.