

Aufsätze für Schallschirme

R. Volz, M. Möser; Institut für Technische Akustik, Technische Universität Berlin

1 Einleitung

Die mögliche Verbesserung der Abschirmwirkung von Schallschirmen durch Maßnahmen im Bereich der Schirmoberkante ist seit 1995 Gegenstand von Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsvorhabens der DFG am Institut für Technische Akustik. Die theoretischen Grundlagen sowie erste Ergebnisse an einem zylinderförmigen Aufsatz wurden bereits in Vorträgen auf der DAGA 95 und 97 vorgestellt [1-3]. Im wesentlichen lassen sich danach Verbesserungen in Frequenzbereichen betragsmäßig kleiner Impedanz erwarten (z.B. Resonatoraufbau). Aufgrund von Erfahrungen an einem zylinderförmigen Aufsatz wurde ein neuer Schirmaufbau ("Orgelpfeifenprinzip") konstruiert und im reflexionsarmen Raum des Instituts vermessen.

Die Ergebnisse dieses neuen Aufsatzes werden vorgestellt und mit numerischen Berechnungen verglichen.

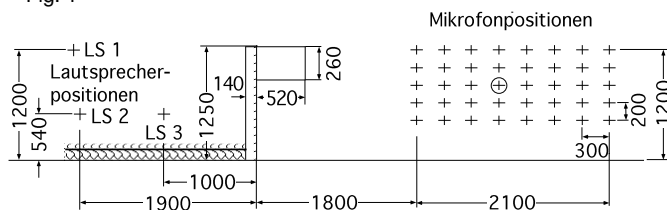
2 Experimente

Als Aufsatz wurde für die Messungen eine einfache $\lambda/4$ -Resonator-Konstruktion verwendet. Sie besteht aus insgesamt 158 unten geschlossenen Röhren (Innen- \varnothing 67 mm, Länge 205 mm Wanddicke 2 mm, $f_0 \approx 400$ Hz), die in einen ca. 3 m langen und 0,52 m breiten Holzkasten eingesetzt sind. Der Anteil der Lochfläche zur gesamten Oberfläche beträgt 43,5 %. Um höhere Moden zu bedämpfen, wurden in einer Versuchsreihe 40 mm dicke offenporige Schaumstoffpropfen an den geschlossenen Rohrenden plaziert.

Die Vermessung der Schallschutzwand mit dem Aufsatz fand im reflexionsarmen Raum (RAR) statt. Der Aufsatz wurde auf der Rückseite einer 5 m langen Wand aus 22 mm dickem Preßspanholz befestigt. Um unerwünschte Energietransportwege durch die Wand zu reduzieren, wurde der Aufbau durch eine zweite akustisch entkoppelte vorgesetzte Wand (16 mm Preßspan) auf der Sendeseite ergänzt (Fig. 1).

Dieser Schallschirm schließt beidseitig an je eine hochabsorbierende Wand des RAR an und teilt so eine Dreiecksfläche des RAR ab. Um eine Schallausbreitung über die Unterkante der Wand zu unterbinden, wurde das Tragnetz des RAR auf der Sendeseite mit 19 mm dicken Preßspanplatten vollständig abgedeckt. Um die Schalldämmung des Bodens zu erhöhen befanden sich auf einer 120 mm dicken Schaumstoffzwischenlage weitere 16 mm Preßspanplatten. Zur Reduzierung von Bodenreflexionen wurden 50 mm dicke offenporige Schaumstoffmatten auf dem sendeseitigen Boden ausgelegt. Als Quelle wurde ein Ein-Wege-Lautsprechersystem verwendet.

Fig. 1



Es schien sinnvoll, die Wirkung des Aufsatzes auf seinen konstruktiven Aufbau zu beziehen. Durchweg stellen deshalb die im folgenden angegebenen Ergebnisse das Verbesserungsmaß (VBM) in dB dar, das sich aus der folgenden Pegeldifferenz ergibt:

$$VBM = L(\text{mit Abdeckung}) - L(\text{ohne Abdeckung})$$

worin

$L(\text{mit Abdeckung})$ den Pegel bezeichnet, der im Fall des mit einer Schwerfolie abgedeckten Aufsatzes (Flächenmasse der Schwerfolie: 5 kg/m^2) gemessen wurde und

$L(\text{ohne Abdeckung})$ den Pegel bezeichnet, der für Fall des offenen Aufsatzes gemessen worden ist.

Positive VBM geben so den durch den Aufsatz tatsächlich erreichten Vorteil gegenüber einem totalreflektierenden Aufbau gleicher Geometrie an. Die Quellenregung erfolgte mit bandbegrenztem weißem Rauschen, wobei sich die Quelle an drei Positionen im Abstand von 1,90 m bzw. 1 m von der Wand in einer Höhe von 0,54 m bzw. 1,20 m über dem Boden befand. Der Schallpegel wurde an 40 Mikrofonpositionen hinter der Schallschutzwand im Frequenzbereich bis 3,2 kHz gemessen (s.a. Fig. 1). Zur Sicherheit ist bei den Messungen das anregende Schallfeld

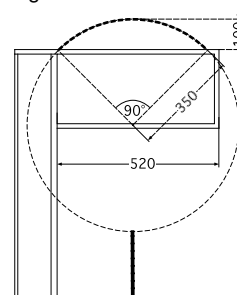
durch ein Referenzmikrofon auf Konstanz hin untersucht worden. Die Unterschiede bezüglich des Referenzsignals lagen zwischen den Messserien innerhalb einer Terz durchweg unter 1 dB.

3 Theorie

Zur Berechnung der Abschirmwirkung einer Schallschutzwand mit Aufsatz wurde als vereinfachtes Modell für den zweidimensionalen Fall eine halbunendliche Schneide mit aufgesetztem Zylinder mit einer ortsabhängigen Impedanz Z auf der Zylinderoberfläche und einer weit entfernten Linienquelle gewählt. Dabei wurde das obere Kreissegment in einem Winkelbereich von 90° mit einer lokal reagierenden Impedanz Z belegt, die das Frequenzverhalten bezüglich der Tiefenresonanzen eines $\lambda/4$ -Resonators, sowie das Verhältnis von vorhandener Rohröffnungsfläche zu schallharter Oberfläche berücksichtigt. Der restliche Zylinderumfang wurde als schallhart angesetzt (Fig. 2).

Für diese Anordnung ist $Z = -j(\rho c/\gamma) \text{ctg}(k_0 a)$, wobei γ das Verhältnis von Rohröffnungsfläche/Gesamtfläche und a die freie Rohrlänge darstellt. Um die in der Praxis vorhandene geringe Dämpfung zu berücksichtigen, wurde der Realteil der Impedanz frequenzunabhängig zu $0,05 \cdot \rho c$ gesetzt. Querresonanzen wurden dabei vernachlässigt. Bei der Simulationsrechnung mit Schaumstoffpropfen am Ende wurde die Impedanz Z aus

Fig. 2



bestimmt, wobei r_a den Reflektionsfaktor des Absorberstückes $r_a = ((Z_a/\rho c) - 1) / ((Z_a/\rho c) + 1)$ mit $Z_a = (-j\rho c k_a/k_0) \text{ctg}(k_a d)$ und $k_a = k_0 \sqrt{1 - (j\varepsilon/\omega\rho)}$ darstellt ($k_0 = \omega/c$).

$$Z = -j \frac{\rho c}{\gamma} \frac{e^{jk_0(a-d)} + r_a e^{-jk_0(a-d)}}{e^{jk_0(a-d)} - r_a e^{-jk_0(a-d)}}$$

bestimmt, wobei r_a den Reflektionsfaktor des Absorberstückes

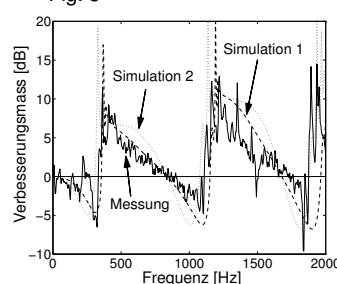
$r_a = ((Z_a/\rho c) - 1) / ((Z_a/\rho c) + 1)$ mit $Z_a = (-j\rho c k_a/k_0) \text{ctg}(k_a d)$ und $k_a = k_0 \sqrt{1 - (j\varepsilon/\omega\rho)}$ darstellt ($k_0 = \omega/c$).

Der Zylinder wurde bezüglich seiner Lage und Größe an den Versuchsaufbau angepaßt. Daraus resultiert ein Zylinderradius von 0,35 m. Nach Vorgabe des Frequenzbereichs wurde auf 64 bzw. 96 äquidistant verteilten Punkten auf der Zylinderoberfläche die Erfüllung der Randbedingungen von Druck und Schnelle bezüglich der Impedanz gefordert.

4 Ergebnisse

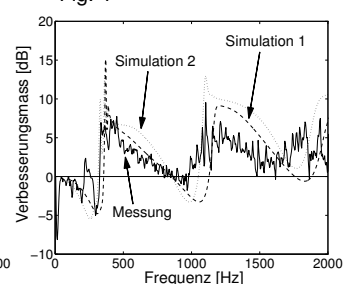
In Fig. 3 und 4 ist das VBM mit und ohne Absorberschicht am Rohrende exemplarisch für einen ausgewählten Punkt (s.a. Fig. 1) über der Frequenz bis 2 kHz für die Lautsprecherposition LS2 dargestellt. Der Abstand zur Wand beträgt 2,70 m, die Höhe über dem Boden 0,80 m. Die durchgezogene Kurve bezieht sich auf die Messergebnisse. Die gestrichelte Kurve ist die dazugehörige Simulation 1 ($\gamma = 41,5\%$). Die punktierte Kurve bezieht sich auf die Simulation 2 ($\gamma = 83\%$). Der Verlauf der Kurven zeigt das prinzipielle Verhalten eines Resonators bezüglich der erreichbaren Verbesserung: unterhalb von $f_0 (\approx 400 \text{ Hz})$ liegt Steiferverhalten der Impedanz und damit negatives VBM vor. Oberhalb dieser Frequenz bis kurz vor Ausbildung der nächsten Mode liegt Massenverhalten der Impedanz vor, was sich in positivem VBM niederschlägt. Für $\gamma = 41,5\%$ zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung.

Fig. 3



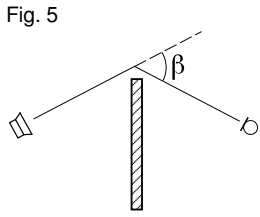
ohne Absorberschicht

Fig. 4



mit Absorberschicht

Vergleicht man Fig. 3 mit Fig. 4, so läßt sich deutlich erkennen, daß durch die Einbringung der Absorberschicht im ersten nutzbaren Oktavband ($f_m = 530$ Hz) kaum eine Verschlechterung auftritt, jedoch die Einbrüche im VBM bei ca. 1 und 1,8 kHz fast vermieden werden können; allerdings mit einer Einbuße des VBM oberhalb von 1 kHz.



In Fig. 6 - 11 ist das VBM aus den Messungen und numerischen Simulationen für alle drei Lautsprecherpositionen im Frequenzbereich von 375 bis 1500 Hz in terz- bzw. oktavbreiten Bändern über dem Beugungswinkel β aufgetragen (Fig 5). Um die maximal möglichen Verbesserungen innerhalb eines terz- bzw. oktavbreiten Bandes darstellen zu können, wurde von den genormten Frequenzbandgrenzen abgewichen. Die Symbole 'o' stellen die Meßergebnisse und 'x' die dazugehörigen Simulationen dar ($\gamma = 41,5\%$). Die Symbole '+' resultieren aus Simulationen mit $\gamma = 83\%$. Die Resultate der Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1.) In der „besten“ Terz ($f_m = 422$ Hz) betragen die gemessenen VBM, für $\beta > 30^\circ$ zwischen 5 dB und 8 dB. In der „besten“ Oktave ($f_m = 530$ Hz) liegen die VBM für $\beta > 30^\circ$ zwischen 3 und 4 dB (Fig.7, 8; ohne Absorberschicht), wobei das VBM mit β ansteigt. Die Einbringung von absorbierendem Material am Rohrende wirkt sich in diesen Frequenzbändern nur wenig verschlechternd auf die VBM aus (< 1 dB). Im anschließenden Oktavband ($f_m = 1060$ Hz) liegen die gemessenen VBM ohne Absorberschicht zwischen -1 und 1 dB, mit Absorberschicht zwischen 1 und 2 dB.
- 2.) Die Simulationsergebnisse für $\gamma = 41,5\%$ liegen im „besten“ Terz- und Oktavband (für $\beta > 20^\circ$) über den gemessenen Ergebnissen, wobei die Differenz mit β zunimmt und bis zu 2 dB beträgt. Im anschließenden Oktavband ($f_m = 1060$ Hz) zeigen die Simulationen ein mit β fallendes VBM (von 1 bis -4 dB ohne Absorberschicht und von 1 bis -1 dB mit Absorberschicht).

3.) Die Simulationen für $\gamma = 83\%$ zeigen in allen Oktavbändern eine Zunahme des VBM. Im „besten“ Oktavband ($f_m = 530$ Hz) nimmt die Verbesserung durch die Verdopplung der Resonatorfläche mit β zu und erreicht bis zu 2 dB.

5 Zusammenfassung

Numerische Berechnungen und Messungen zeigen das Potential von mit Resonatoren ausgestatteten Aufsätzen für Schallschutzwände. In einem oktavbreiten Band wurden Verbesserungen bis zu 4 dB gemessen; dabei ist der zusätzliche Vorteil, der sich aus dem nur geometrisch vergrößerten Schallumweg ergibt nicht in Rechnung gestellt. Die Berechnungen zeigen, daß durch eine Erhöhung des Resonatorflächenanteils weitere 1 bis 2 dB erzielt werden können. Prinzipiell bleiben die gemessenen Werte hinter den erwarteten Werten aus den numerischen Prognosen zurück. Dies ist möglicherweise auf eine noch nicht optimale Geometrie des gemessenen Aufsatzes und die Unterschiede zum numerischen Modell zurückzuführen. Jedoch fallen die prognostizierten Verschlechterungen im anschließenden Oktavband ($f_m = 1060$ Hz) in den Messungen nicht so groß wie angenommen aus. Die Einbringung einer Absorberschicht am Rohrende zur Bedämpfung höherer Moden (und damit zur Verringerung der Verschlechterungen im anschließenden Oktavband) zeigt ihre Wirkung und reduziert die erreichten Verbesserungen im darunterliegenden Oktavband nur unwesentlich. Folglich ist ein neuer Aufsatz geplant, der einen größeren Resonatorflächenanteil besitzt und bezüglich seiner Geometrie variabel gestaltet werden kann, um den Einfluß der Geometrie auf das VBM und damit die zusätzlich erreichbare Abschirmwirkung eines solchen Aufsatzes zu untersuchen.

6 Literatur

- [1] M. Möser, *Die Wirkung von zylindrischen Aufsätzen an Schallschirmen*, Acustica **81**, p. 565-586, 1995
- [2] M. Möser, *Schallschirme mit zylindrischen Aufsätzen*, DAGA '95, Saarbrücken, p. 691-694, 1995
- [3] R. Volz, M. Möser, *Schallschirme mit zylindrischen Aufsätzen - erste Ergebnisse*, DAGA '97, Kiel, p. 136-137, 1997

Verbesserungsmaße für ausgewählte Frequenzbänder (Fig. 6 bis 8 ohne Absorberschicht, Fig. 9 bis Fig. 11 mit Absorberschicht)

