

Zur Berechnung von Reflexionsschalldämpfern

U.J. Kurze, Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Str. 11, 82152 Planegg bei München

1. Anwendungsformen

Reflexionsschalldämpfer werden in Kanälen insbesondere dann eingesetzt, wenn bestimmte Töne oder Klänge mit einfachen Mitteln ohne Faserabsorber gedämpft werden sollen. Wichtige Anwendungsgebiete sind Ansaug- und Abgasleitungen von Motoren und Rauchgasleitungen von Feuerungsanlagen. Für kleine Mengenströme in Rohrleitungen ist die Grundform rund. Große Mengenströme erfordern den Einsatz von Kulissen, für die eine rechteckige Grundform vorherrscht. Wird aus betrieblichen Gründen ein geringer Druckverlust gefordert, werden runde oder rechteckige Abzweigungsresonatoren verwendet.

2. Auslegung

Die Bemessung von Reflexionsschalldämpfern erfolgt vielfach nach Erfahrungswerten, obwohl seit mehr als 60 Jahren Berechnungsverfahren erarbeitet worden sind [1]. Besonders viele Rechenergebnisse beruhen auf der eindimensionalen Leitungstheorie [2] im Bereich von Schallwellenlängen, die groß gegenüber den Querabmessungen der Leitung sind. Nur in diesem Bereich ist eine enge Kopplung der Leitung mit Abzweigungsresonatoren möglich, die zu einer nennenswerten Dämpfung führen kann. Die Anwendung der Ergebnisse auf kritische Fälle mit besonderen Gasen, bestimmten Temperaturen und speziellen Frequenzbändern führt nicht immer zum gewünschten Erfolg. Die Abstimmung oder die Höhe der Dämpfung kann unzureichend sein. Zur Verbesserung stehen grundsätzlich mit FEM und BEM moderne Rechenverfahren zur Verfügung, will man über bekannte Berechnungen zur Wellenausbreitung mit trigonometrischen Funktionen für Rechteckformen und Besselfunktionen für runde Formen hinausgehen. Praktisch bestehen jedoch Probleme mit der Strömung und Konflikte mit der Prämisse, dass Reflexionsschalldämpfer mit einfachen Mitteln auszulegen sind. Hier wird der Ansatz beschrieben, die Leitungstheorie in einfacher Weise durch Längenkorrekturen zur Frequenzabstimmung und durch Strömungskorrekturen an Lochblechen zur Bestimmung der Höchstdämpfung zu erweitern.

3. Längenkorrekturen bei Rechteckkanälen

Zweigt von einem Kanal durch Bleche unterteilt eine Reihe von Kammern ab, die jeweils schmaler als eine Halbwellenlänge sind, so ergibt die einfache Leitungstheorie ein sehr hohes Dämpfungsmaximum bei der Viertelwellenlängen-Resonanz längs der Kammern. Am Kammereingang ist der Schalldruck nahezu Null und nach der eindimensionalen Leitungstheorie damit auch im gesamten Leitungsquerschnitt. Über die Breite einer Abzweikkammer ändert sich nach der eindimensionalen Leitungstheorie die Phase nicht, sodass auch nach einer Reihe von Kammern nicht mit einer Phasenänderung zu rechnen ist. Beide Aussagen treffen nicht ganz zu. Zur Korrektur kann die zweidimensionale Wellentheorie herangezogen werden [3].

In Abb. 1 ist das Dämpfungsmaß $D_h = 8,7 \operatorname{Re}(\Gamma h)$ dargestellt, das sich als Dämpfung je Kanalbreite für eine lokal wirksame Wand mit der Tiefe d an einem Kanal der Breite h über einen Abstand längs des Kanals mit der Länge h streng aus der transzendenten Bestimmungsgleichung

$$\sqrt{(\Gamma h)^2 + (kh)^2} \tan\left(\sqrt{(\Gamma h)^2 + (kh)^2}\right) = -kh \tan(kd) \quad (1)$$

mit der Wellenzahl k für die Grundmode ergibt. In guter Übereinstimmung mit der Näherung durch eine quadratische Gleichung ist das Dämpfungsmaß unterhalb der Resonanzfrequenz 0, nimmt etwa bei der Resonanz ein Maximum von 11 dB an und fällt nach einer halben Oktave wieder auf 0 ab.

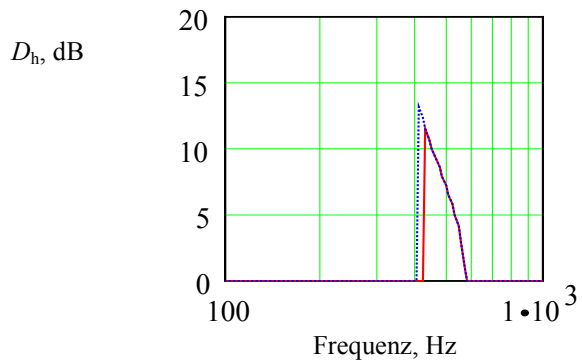


Abb. 1: Dämpfung je Kanalweite $h = 0,1$ m für $d = 0,2$ m tiefe Kammern, — nach Gl.(1), --- quadratische Näherung

Schließt der dämpfende Kanal vorn und hinten an einen ungedämpften Kanal mit harten Wänden an, so treten dort Unstetigkeitsdämpfungen auf, die sich nach der Leitungstheorie jeweils aus $D_s = 20 \lg\left(\frac{1}{2}\left|\sqrt{-j\Gamma/k} + 1/\sqrt{-j\Gamma/k}\right|\right)$ dB (2)

errechnen. Zusammen mit einem Wechselwirkungsglied

$$D_w = 20 \lg\left|1 - \left(\frac{1 + j\Gamma/k}{1 - j\Gamma/k}\right)^2 e^{-2\Gamma l}\right| \text{ dB} \quad (3)$$

ergibt sich für einen gedämpften Kanal der Länge l die in

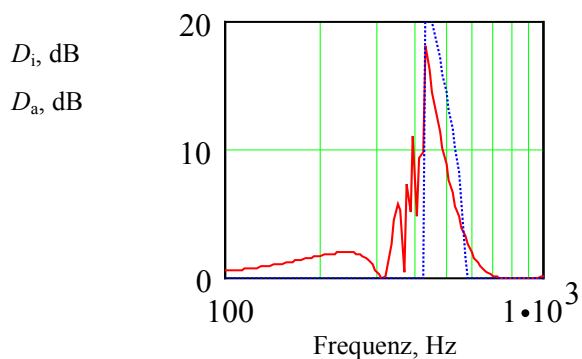


Abb. 2: Einfügungsdämpfungsmaß D_i (—) und Ausbreitungsdämpfungsmaß $D_a = D_h l / h$ (---) für einen Schalldämpfer nach Abb. 1 mit $l = 0,2$ m Länge

Abb. 2 dargestellte Dämpfung. Zur Ausbreitungsdämpfung tritt insbesondere unterhalb der Resonanzfrequenz eine Reflexionsdämpfung infolge unterschiedlicher Phasengeschwindigkeiten hinzu.

Rechenergebnisse nach der einfachen Leitungstheorie, in der der Kanal mit gekammerter Wand allein durch Querschnitts-

flächen und Längen der Elemente nachgebildet ist, sind in Abb. 3 angegeben. Eine Unterteilung in Kammern

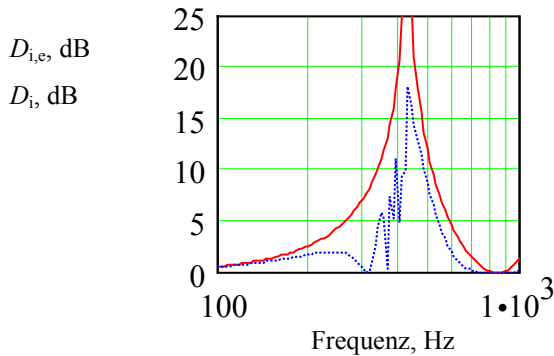


Abb. 3: Einfügungsdämpfungsmaß $D_{i,e}$ (—) nach der einfachen Leitungstheorie ohne Längenkorrekturen im Vergleich mit dem Ergebnis D_i (···) von Abb. 2

der Breite $b=l/n$ wirkt sich im Ergebnis nicht aus. Die Unterschiede zum Ergebnis von Abb. 2 sind erheblich. Berücksichtigt man jedoch die Phasenänderung von Kammer zu Kammer durch eine Längenkorrektur l/n für n Kammertrennwände, so ergibt sich, wie in Abb. 4 dargestellt, eine gute Übereinstimmung unterhalb der Resonanzfrequenz. Oberhalb der Resonanzfrequenz wird die Übereinstimmung mit der zweidimensionalen Theorie durch eine

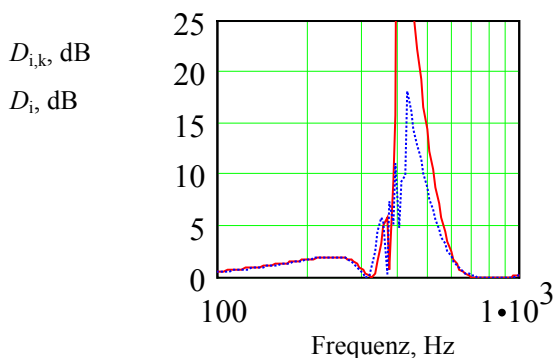


Abb. 4: Einfügungsdämpfungsmaß $D_{i,k}$ (—) nach der Leitungstheorie mit Längenkorrekturen für $n = 10$ Kammern im Vergleich mit dem Ergebnis D_i (···) von Abb. 2

Längenkorrektur für die Kammertiefe mit $0,8l/n$ verbessert, sofern die Kammerbreite b deutlich kleiner als die Kanalbreite h ist. Unbefriedigend ist die Höhe des berechneten Dämpfungsmaximums. Sie wird mit der Berücksichtigung von Strömung korrigiert.

4. Einfluss von Strömung

Werden Abzweige zur Strömungsführung durch Lochbleche mit der Porosität σ abgedeckt, an denen bei Kanalströmung mit der Machzahl M ein auf den Kennwiderstand ρc bezogener Strömungswiderstand $|M|(1-\sigma)/(4\sigma^2)$ auftritt, so kann eine erhebliche Dämpfung der Abzweigresonatoren auftreten. Andere Einflüsse sind häufig vergleichsweise klein. In Abb. 5 sind Ergebnisse von Vergleichsrechnungen nach der Leitungstheorie und nach der zweidimensionalen Theorie dargestellt, wobei Änderungen der Längenkorrektur durch das Lochblech berücksichtigt sind.

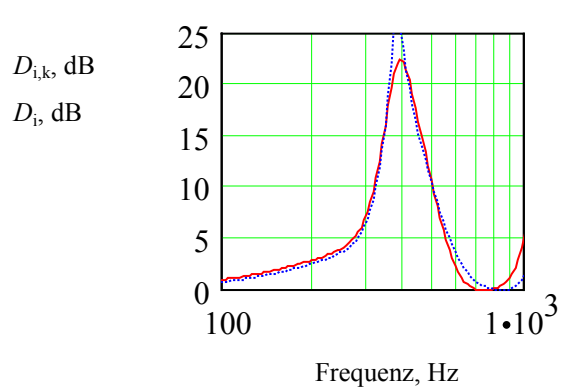


Abb. 5: Einfügungsdämpfungsmaß $D_{i,k}$ (—) nach der Leitungstheorie mit Längenkorrekturen für $n = 10$ Kammern mit Lochblechabdeckung ($\sigma = 0,3$) im Vergleich mit dem Ergebnis D_i (···) der zweidimensionalen Theorie für Kanalströmung mit 40 m/s

Die Rechenergebnisse befinden sich in befriedigender Übereinstimmung mit Messwerten.

5. Weitere Längenkorrekturen

Lange Kammern, die auf tiefe Frequenzen abgestimmt sind, werden häufig parallel zum Kanal geführt. Sie lassen sich im Rahmen der Leitungstheorie als strömungsfreie Abzweige von Abzweigen modellieren, die nicht über Lochbleche getrennt sind. An ihnen ist eine Längenkorrektur erforderlich, die erfahrungsgemäß von der Breite b des vorangehenden Abzweigs abhängt (s. Abb. 6).

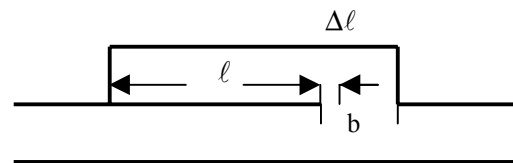


Abb. 6: Längenkorrektur Δl am Abzweig vom Abzweig

Rotationssymmetrische Abzweige von runden Rohren besitzen keine konstante Querschnittsfläche sondern erweitern sich mit dem Radius. Um die erste Resonanz im Abzweig vom Innenradius r_i bis zum Außenradius $r_a < 5 r_i$ zu bestimmen, kann näherungsweise mit der Viertelwellenlängenresonanz in einem Rohr mit konstantem Querschnitt und der der Länge

$$(r_a - r_i) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{r_a - r_i}{r_a + r_i} \right)$$

gerechnet werden.

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der BBM-Technik GmbH durchgeführt.

Schrifttum

- [1] K. Gösele: Über die Dimensionierung von Schalldämpfern nach dem Reflexionsprinzip, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 68, 15 – 18, 1959
- [2] M.L. Munjal: Acoustics of ducts and mufflers. New York: John Wiley & Sons, 1987
- [3] U. Kurze: Untersuchungen an Kammerdämpfern, Acustica 15, 139 – 150 (1965)