

Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines Messverfahrens für die Schallabsorption von profilierten Lärmschutzwänden

Daniel F. P. Pazos, Lutz Weber, Philip Leistner und Klaus Sedlbauer

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, D-70569 Stuttgart, Deutschland, Email: dfp@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Zur Entwicklung eines Messverfahrens, das die Bestimmung des Schallabsorptionsgrades von Lärmschutzwänden mit profilierter Oberfläche in situ ermöglicht, sind Modellmessungen an verkleinerten Wänden im reflexionsarmen Raum vorgesehen. Der erste Schritt hierbei bestand in einer Validierung des verwendeten Versuchsaufbaus. Es wurde unter anderem untersucht, unter welchen Voraussetzungen sich das von dem verwendeten Lautsprecher erzeugte Schallfeld im Bereich der untersuchten Wände mit hinreichender Genauigkeit als ebene Welle betrachten lässt. Die Messungen erfolgten mit zwei Mikrofonen gleichzeitig, wobei sowohl Phase als auch Betrag des Schallpegels an verschiedenen Positionen im Raum bestimmt wurden.

Die Untersuchungen dienen dazu, die mit dem theoretischen Modell von Holford-Urusovskii [1] berechnete Feldverteilung vor periodisch profilierten Oberflächen messtechnisch zu verifizieren. Ein weiteres wichtiges Ziel besteht darin, aus den im Nahfeld vor der Wandoberfläche gemessenen Schallpegeln rechnerisch auf die Pegelverteilung im Fernfeld zu schließen.

Übertragbarkeit zwischen Nah- und Fernfeld

Bei der In-situ-Messung der Schallreflexion an profilierten Lärmschutzwänden treten vor allem zwei Probleme auf. Das erste Problem besteht darin, dass bei Nahfeldmessungen – wie sie z. B. beim MLS-Verfahren nach DIN CEN/TS 1793-5: 2003-08 (Adrienne-Methode) zur Unterdrückung von Umgebungsstörungen verwendet werden – infolge der Fokussierung des Schallsignals eine Verfälschung der Ergebnisse erfolgt. Dies ist der Grund, weshalb das Adrienne-Verfahren zum Teil messtechnisch korrekte aber physikalisch sinnlose Ergebnisse (wie z.B. Reflexionsgrade $R > 1$) liefert. Das zweite Problem bei den Messungen besteht in der Eliminierung der vorhandenen Störgeräusche, wenn die Anwendung des MLS-Messverfahrens wegen des oben genannten Schwierigkeit nicht möglich ist.

Eine geeignete Lösung zur Charakterisierung der Schallabsorption von Lärmschutzwänden mit profilierter Oberfläche stellt möglicherweise die Übertragung der Ergebnisse vom Nahfeld auf die akustische Wirkung im Fernfeld dar. Die Grundlage hierzu liefert das Holford-Urusovskii-Modell (H.-U.-Methode), das eine exakte Lösung für das Problem der diffusen Reflexion einer ebenen Welle (Wellenlänge $\lambda = 2\pi/k$) liefert, die auf eine unbegrenzte periodische Oberfläche auftrifft (Periode Λ , Schalleinfallwinkel φ_0). Das reflektierte Feld wird als eine Summe von ebenen Wellen mit komplexen Amplituden \underline{R}_n und Streuwinkeln φ_n beschrieben:

$$\cos \varphi_n = \alpha_n = \cos \varphi_0 + n \lambda / \Lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

$$|\cos \varphi_n| \leq 1$$

Die H.-U.-Methode erlaubt es durch die Lösung eines Gleichungssystems die gestreuten Amplituden \underline{R}_n zu berechnen. Die Methode liefert eine gute Darstellung des reflektierten Nahfeldes vor profilierten Oberflächen. Wegen den vorausgesetzten unbegrenzten Abmessungen der Oberfläche ergeben sich jedoch keine praxisrelevanten Angaben über das Fernfeld.

Andererseits lässt sich nach der Beugungstheorie zeigen, dass der Reflektionsfaktor für den Winkel φ im Fernfeld einer Struktur, die aus genügend vielen parallel und periodisch (Periode Λ) angeordneten Stäben (jeder mit Breite b und Höhe H) besteht, folgenden Ausdruck hat:

$$R \approx \begin{cases} R(\varphi, \varphi_0, k, b, H), \cos \varphi = \alpha_n & |\cos \varphi| \leq 1 \\ 0 & \cos \varphi \neq \alpha_n \end{cases} \quad (2)$$

Hierbei ist die Abhängigkeit der Reflektionsfaktoren von den Parametern φ, φ_0, k, b und H lediglich durch eine Spalt- sowie eine Tiefeninterferenzfunktion [2] gegeben.

Der Reflektionsfaktor im Fernfeld R (Gleichung 2) nimmt daher nur für die Eigenwinkel φ_n der Reflexionen im Nahfeld von Null verschiedene Werte an. Dies deutet darauf hin, dass eine Übertragung der Ergebnisse vom Nahfeld auf die akustische Wirkung im Fernfeld möglich ist, wenn eine Verknüpfung zwischen den Amplituden \underline{R}_n der reflektierten Wellen (Berechnung nach der H.-U.-Methode) mit den jeweiligen Reflektionsfaktoren im Fernfeld R vorhanden ist. Diese Verknüpfung wird durch Labormessungen an Proben mit profilierten, periodischen Oberflächen untersucht.

Validierung des verwendeten Versuchsaufbaus

Die Amplituden \underline{R}_n der reflektierten Wellen im Nahfeld sollen durch Messungen an profilierten Proben in einem reflexionsarmen Raum bestimmt werden. Der erste Schritt hierbei besteht in der Validierung des verwendeten Versuchsaufbaus. So muss insbesondere geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen sich das von dem verwendeten Lautsprecher erzeugte Schallfeld im Bereich der Probe (Kantenlänge 2 m) mit hinreichender Genauigkeit als ebene Welle – wie bei der H.-U.-Methode vorausgesetzt – betrachten lässt. Dies wurde durch Messungen des Phasengangs ($\Delta \Phi_1$) und der Übertragungsfunktion (H_1) zwischen zwei Mikrofonen untersucht, welche in genügendem Abstand im Vergleich zur Probenlänge (L) und Wellenlänge vor dem Lautsprecher angeordnet wurden.

Wegen der begrenzten Größe des reflexionsarmen Raums (10,4 x 10,3 m²) wurde das erste Mikrofon (A) in den Abständen $R = 5,30$ m sowie $R = 7,30$ m direkt vor den Lautsprecher (Q) gestellt. Da die Probenlänge ca. $L = 2$ m beträgt, wurde das zweite Mikrofon (B) im Abstand von $d = 1$ m ($= L/2$) zu A in der Ebene senkrecht zur Verbindungslinie Q - A positioniert (siehe Abbildung 1).

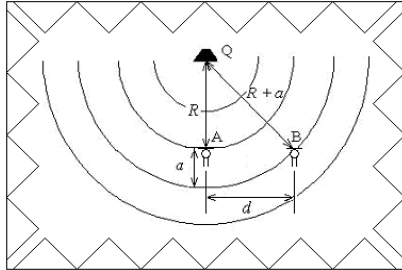


Abbildung 1: Messanordnung im reflexionsarmen Raum zur Charakterisierung des verwendeten Schallfeldes (Lautsprecher Q, Mikrofone A und B).

Damit das Schallfeld des Lautsprechers näherungsweise als ebene Welle betrachtet werden kann, sollte die Abstandsdifferenz zwischen dem Lautsprecher und den beiden Mikrofonen a (Abb. 1) sehr viel kleiner als die Wellenlänge λ sein:

$$a = -R + \sqrt{R^2 + d^2} \ll \lambda \quad [m] \quad (3)$$

Um die Messungen zu kontrollieren, wurde eine weitere Messreihe durchgeführt, bei der sich die beiden Mikrofone dicht nebeneinander ($d = 0,035$ m) in gleichem Abstand vor dem Lautsprecher befanden.

Als Messgerät diente ein Norsonic RTA 840 Dual Channel Real Time Analyser. Die Anregung erfolgte mit stationären Sinus-Signalen bei Frequenzen zwischen 250 Hz bis 8000 Hz (Generator SPN Rohde & Schwarz). Als Lautsprecher wurde eine B&K Sound Source Type 4224 eingesetzt (Angaben über die Richtcharakteristik lagen nicht vor).

Ergebnisse der Messungen

In Abbildungen 2 und 3 sind einige der ermittelten Messergebnisse beispielhaft dargestellt. Aufgetragen ist jeweils der Betrag der Phasenverschiebung $|\Delta\Phi_1|$ in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Verhältnis a/λ . Neben den Messkurven sind auch die theoretisch berechneten Werte eingezeichnet (wegen $0^\circ \leq |\Delta\Phi_1| < 360^\circ$ gilt für die theoretische Phasenverschiebung $\Delta\varphi = 360^\circ(a/\lambda - \lfloor a/\lambda \rfloor)$).

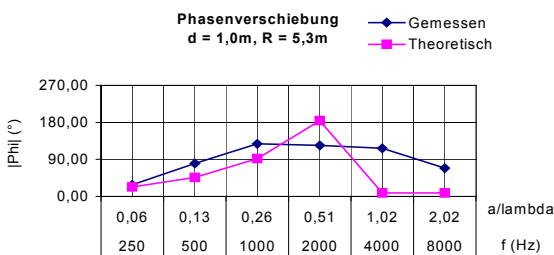


Abbildung 3: Messreihe 1 ($R = 5,30$ m, $d = 1,0$ m). Die Abstandsdifferenz der beiden Mikrofone betrug $a \approx 0,09$ m.

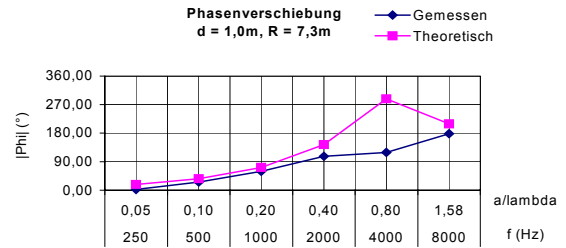


Abbildung 2: Messreihe 2 ($R = 7,30$ m, $d = 1,0$ m). Die Abstandsdifferenz der beiden Mikrofone betrug $a \approx 0,07$ m.

Diskussion und Ausblick

Bei allen Messreihen stimmen die Ergebnisse zumindest zwischen 1 und 2 kHz gut mit der Theorie überein. Die Phasenverschiebung erhöht sich mit zunehmender Frequenz, da das Verhältnis a/λ anwächst. Wird die Frequenz, die einer Phasenverschiebung von 360° entspricht, überschritten, wiederholt sich der Vorgang.

Bei den Kontrollmessungen mit einem Mikrofonabstand von $d = 0,035$ m (hier nicht dargestellt), ergaben sich für die gemessene Phasenverschiebung $\Delta\Phi_1$ erwartungsgemäß sehr kleine Werte (bis maximal ca. 10°). Die Übertragungsfunktion (H_1) zwischen den Mikrofonen wies Werte bis maximal 1 dB auf. Dies ist als positives Ergebnis zu werten, da bei den Messungen mit $d = 1,0$ m für die Phasenverschiebung (ca. $0^\circ - 180^\circ$) und die Übertragungsfunktion (ca. 0,4 - 1,6 dB) im Vergleich hierzu deutlich größere Werte auftraten.

Obgleich die Richtcharakteristik des Lautsprechers noch nicht untersucht wurde, zeigen die Ergebnisse, dass sich das erzeugte Schallfeld vor der Probenoberfläche zumindest bei tiefen Frequenzen mit hinreichender Genauigkeit als ebene Welle betrachten lässt. Bei hohen Frequenzen bestehen hingegen Abweichungen, die beim Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen der Holford-Urusovskii-Methode zu berücksichtigen sind. Größere Abstände zwischen Probe und Lautsprecher zur Verbesserung der Homogenität des Feldes sind wegen der begrenzten Größe des reflexionsarmen Raumes leider nicht möglich. Andererseits werden die im Weiteren geplanten Messungen zum großen Teil im Nahfeld vor der Probenoberfläche mit dicht benachbarten Mikrofonen durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass sich das Schallfeld unter diesen Bedingungen in guter Näherung wie eine ebene Welle verhält.

Danksagung

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen eines Stipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Literatur

- [1] Holford, R. L.: Scattering of sound waves at a periodic, pressure-release surface: An exact solution. J. Acoust. Soc. Amer. 70 (1981) 1116-1128.
- [2] Meyer, E., Bohn, L.: Schallreflexion an Flächen mit periodischer Struktur. Acustica 3 (1952), 195-207.