In-situ-Messverfahren zur Bestimmung des Reflexionsfaktors komplexer Oberflächen

Philipp Bechtel, Tobias Langenbucher, Carsten Hudasch und Christian Kleinhenrich

Cervus Consult GmbH, 47877 Willich, E-Mail: consult@cervus.de

Einleitung

Bei der akustischen Gestaltung von Räumen werden in der Regel die Beträge der komplexwertigen Reflexions- oder Absorptionskoeffizienten zur Beschreibung von Material- und Wandeigenschaften verwendet. Diese können im Hallraum oder Impedanzrohr ermittelt werden. Beide Messverfahren sind nicht anwendbar, wenn das Reflexionsverhalten einer Wand oder eines anderen Elements in situ bestimmt werden soll. Sie liefern keine Aussage über Phasenbeziehungen und die Richtungsabhängigkeit der Koeffizienten. Es bedarf aber eben dieser Informationen, um das Reflexionsverhalten von Wand- oder Oberflächenstrukturen gegenüber Schallimpulsen zu beschreiben und zu beurteilen. In diesem Beitrag wird daher ein In-situ-Messverfahren vorgestellt, das den spektralen, komplexen Reflexionsfaktor in Abhängigkeit vom Einfalls- und Ausfallwinkel einer Wandkonstruktion bestimmt. Hierzu wird ein Mikrofonarray eingesetzt, um das generierte Schallfeld vor einer Probe aufzuzeichnen und anschließend mittels Nahfeldholografie in einlaufende und reflektierte Wellen zu zerlegen. Zur Validierung des In-situ-Messverfahrens werden damit erzielte Resultate mit denen genormter Verfahren verglichen. Abschließend beschreibt der Beitrag die ortsabhängige Vermessung und Beurteilung einer Keil-Steg-Struktur aus absorbierendem Material.

Aufbau und Funktionsweise

Während der Messphase wird entsprechend Abbildung 1 wenige Meter vor der Probe ein Aktivlautsprecher platziert, der exponentielle Sinus-Sweeps wiedergibt. Das resultierende Schallfeld wird vor dem Messobjekt durch Mikrofone erfasst. Diese sind jeweils als Paare in Schallausbreitungsrichtung auf einer vertikalen Halterung angeordnet. Die Mikrofonhalterung wird schrittweise in horizontaler Richtung vor der Wandoberfläche bewegt. Dadurch erfolgt die automatisierte Abtastung in zwei Ebenen parallel zum Prüfobjekt. Da die Höhe des Mikrofonarrays ebenfalls variabel ist, kann eine sehr feine Abtastung vor dem Messobjekt realisiert werden. Die Abstände der Mikrofone untereinander beziehungsweise die Feinheit der Abtastung ergeben sich aus der angestrebten oberen Grenzfrequenz.

In der Nachbearbeitungsphase werden zunächst aus den aufgezeichneten Sweep-Signalen die Impulsantworten für jede angefahrene Mikrofonposition gebildet. Im nächsten Schritt erfolgt die Definition von Ersatzquellen und Rekonstruktionspunkten. Ersatzquellen dienen der Beschreibung einlaufender und reflektierter Feldanteile der Probe. Außerdem lassen sich darüber Störfelder beschreiben, die beispielsweise durch Decken- und Bodenreflexionen der Messumgebung erzeugt werden. An den Rekonstruktionspunkten sollen die Signale der Ersatzquellen synthetisiert und die komplexwertigen Reflexionskoeffizienten bestimmt werden.

Mittels Nahfeldholografie erfolgt abschließend die Zerlegung des Schallfeldes in seine Einzelkomponenten. Die nun getrennt voneinander vorliegen einlaufenden und reflektierten Feldanteile ermöglichen die Bestimmung der Reflexionskoeffizienten an den Rekonstruktionspunkten. Die Funktionsweise der Nahfeldholografie wird unter anderem bei Fernandez Grande [1] und Natarajan [2] ausführlich behandelt.

Abbildung 1: Aufbau des Messsystems – Links: Übersicht – Rechts: Nahaufnahme der Mikrofonhalterung

Validierungsmessungen

Zur Validierung des In-situ-Messverfahrens wurde das System entsprechend Abbildung 1 in einem Büroraum aufgebaut. Die Höhe der Stahlbetondecke betrug 2,5 m und der Abstand zur seitlichen Fensterfront höchstens 1,5 m. Zur Befestigung der Proben wurde eine Halterung konstruiert, in der Absorberplatten mit einer maximalen Breite und Höhe von jeweils 1,2 m und 1,4 m eingespannt werden können. Diese Vorrichtung befand sich vor einer Leichtbauwand mit Glasscheibe. Das Messsystem wurde mit insgesamt sieben Mikrofonen betrieben, von denen sechs als Paare angeordnet waren. Der horizontale Abstand innerhalb eines Mikrofonpaares betrug 2,5 cm in Schallausbreitungsrichtung. In vertikaler Richtung besaßen die Mikrofone einen Versatz von 6 cm. Das siebte Mikrofon wurde auf Höhe des mittleren Empfängerpaares positioniert und ist 14 cm beziehungsweise 16,5 cm weiter entfernt vom Messobjekt als die übrigen Mikrofone (siehe rechter Teil in Abbildung 1).

Zur Vermessung einer Probe wurden bei dem verwendeten Aufbau insgesamt drei Messreihen benötigt. Pro Durchgang wurde an 12 Positionen mit einem horizontalen Abstand von 2 cm gemessen. Anschließend wurde das Array in seine Ausgangsposition zurückgefahren und um 2 cm manuell nach oben verschoben und die nachfolgende Messreihe begonnen. Insgesamt wurden zwei Ebenen

mit den Kantenlängen von 24 cm und 16 cm sowie eine weitere Ebene mit den Kantenlänge von 24 cm und 6 cm parallel zur Probe abgetastet. Aus den so gewonnenen Messdaten und den daraus resultierenden Impulsantworten erfolgte anschließend die Feldzerlegung.

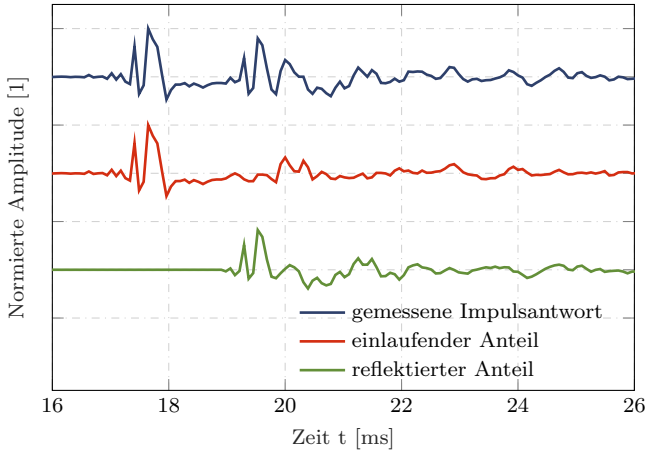


Abbildung 2: Zerlegung einer gemessenen Impulsantwort

Die Zerlegung des Schallfeldes in einlaufende und reflektierte Feldanteile ist für die Position des mittleren Messmikrofons exemplarisch in Abbildung 2 dargestellt. Der blaue Schalldruckzeitverlauf stellt die gemessene Impulsantwort dar. Der einlaufende Anteil $\underline{p}_e$ ist in rot und die reflektierte Welle $\underline{p}_r$ in grün dargestellt. Der ortsabhängige komplexe Reflexionsfaktor $\underline{R}$ kann dann mit

$$\underline{R} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_e}$$

im Frequenzbereich berechnet werden. Der Schallabsorptionsgrad α ergibt sich aus

$$\alpha = 1 - |\underline{R}|^2.$$

Absorbermaterial aus Melaminharz

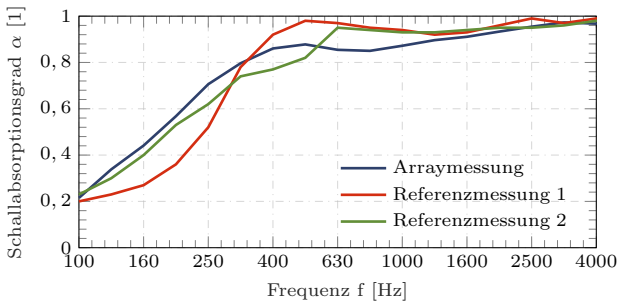


Abbildung 3: Schallabsorptionsgrade pro Terzband für Schaumstoff aus Melaminharz

Zunächst wurde Schaumstoff aus Melaminharz der Stärke 100 mm mit dem In-situ-Verfahren bei senkrechtem Schalleinfall vermessen. Die Fläche der Probe betrug 1,2 m^2. Für dieses Material lagen Vergleichsdaten aus zwei Impedanzrohrmessungen vor.

Die Referenzmessung 1 [3] wurde nach DIN EN ISO 10534-2 [4] und die Referenzmessung 2 [5] entsprechend DIN 52215 [6] durchgeführt. Abbildung 3 trägt die Messergebnisse gegeneinander auf. Es ist zu erkennen, dass die Verläufe der drei Kurven oberhalb der 1600 Hz-Terz nahezu deckungsgleich sind. Zwischen der 400 Hz- und der 1600 Hz-Terz weichen die Kurven nicht mehr als 0,15 voneinander ab. Unterhalb der 400 Hz-Terz weisen die Verläufe der Arraymessung und der Referenzmessung 2 eine hohe Ähnlichkeit auf, während die Kurve der Referenzmessung 1 davon abweicht. Insgesamt zeigen alle drei Messungen eine hohe Übereinstimmung.

Absorbermaterial aus Mineralwolle

Für einen Vergleich der Ergebnisse des In-situ-Verfahrens mit denen einer Messung nach DIN 1793-5, wurden Schallabsorptionsgrade einer Mineralwollplatte der Stärke 50 mm ermittelt. Die gemäß DIN 1793-5 vermessene Absorberfläche betrug 9 m^2 und war während der Messung auf einem Steinboden platziert. Aufgrund der Flächengröße sind die Vergleichsdaten erst oberhalb der Terz der Mittenfrequenz 400 Hz valide. Die während der In-situ-Messung verwendete Absorberfläche betrug 1,44 m^2.

Die Ergebnisse beider Messungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Kurven der Schallabsorptionsgrade weisen oberhalb der 400 Hz-Terz einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Die absoluten Abweichungen des Absorptionskoeffizienten liegen dort stets unterhalb von 0,08. Für den Bereich unterhalb 400 Hz sind keine Aussagen möglich.

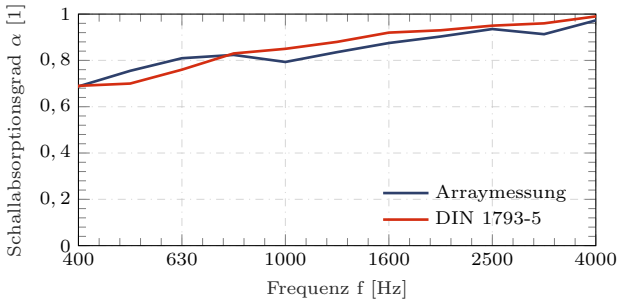


Abbildung 4: Schallabsorptionsgrade pro Terzband für Mineralwolle

Validierung anhand akustischer Grenzfälle

Dieser Abschnitt validiert die Messergebnisse des In-situ-Verfahrens anhand der akustischen Grenzfälle Freifeld und harte Wand. Die Freifeldmessung wurde in einem 600 m langen Tunnel mit einer Deckenhöhe von 4 m und einer Breite von 8 m durchgeführt. Die zweite Messung fand vor einer Betonwand statt. Aufgrund der Mikrofonabstände und der endlichen Sensitivität der Mikrofone, liefern die Untersuchungen oberhalb einer Grenzfrequenz von 400 Hz belastbare Ergebnisse. Diese Grenzfrequenz kann durch größere Mikrofonabstände oder zusätzliche Messebenen nach unten verschoben werden.

Für die Bewertung der Untersuchungsergebnisse bietet sich die Betrachtung des frequenzabhängigen Reflexionsindexes RI an, der idealerweise den Wert 1 für schallharte Oberflächen und 0 für das Freifeld beträgt. Die Frequenzverläufe der gemessenen Reflexionsindizes sind

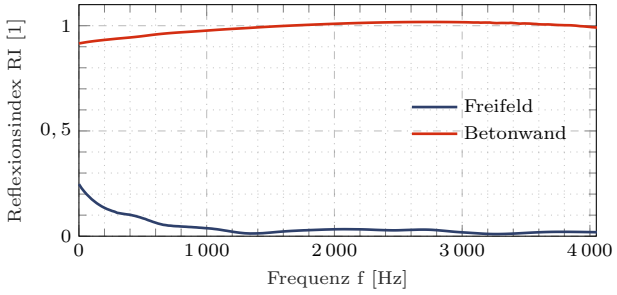


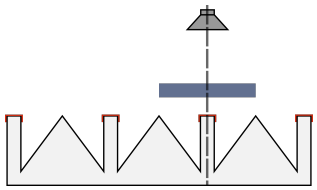
Abbildung 5: Reflexionsindizes nach der Vermessung akustischer Grenzfälle

in Abbildung 5 aufgeführt. Für die Betonwand liefert das In-situ-Verfahren breitbandig einen über 0,9 liegenden Index. Oberhalb von 400 Hz nimmt der Reflexionsindex des Freifeldes stets Werte unterhalb von 0,1, was einem Schallabsorptionsgrad im Bereich von 0,99 bis 1 entspricht. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Arraymessung eine gute Abschätzung dieser beiden Grenzfälle liefert.

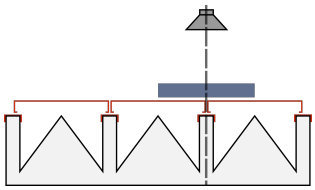
Vermessung einer Keil-Steg-Struktur

Das Messsystem wurde mit dem Ziel entwickelt, die Absorptionseigenschaften komplexer Geometrien ortsabhängig in verbautem Zustand bestimmen zu können.

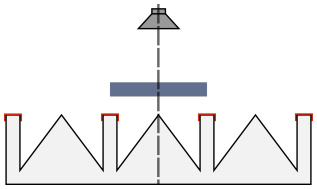
Die untersuchte Struktur besteht aus einer 75 cm-periodischen Abfolge von Keilen und Stegen, welche aus Melaminharz-Schaumstoff gefertigt sind.



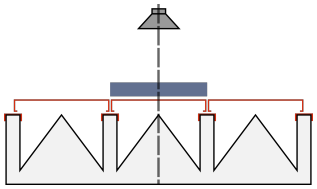
(a) Messung vor dem Steg ohne Lochblechkassetten



(b) Messung vor dem Steg mit Lochblechkassetten



(c) Messung vor dem Keil ohne Lochblechkassetten

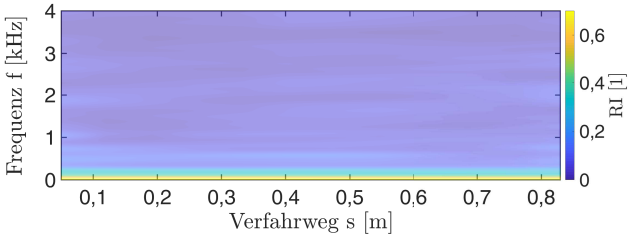


(d) Messung vor dem Keil mit Lochblechkassetten

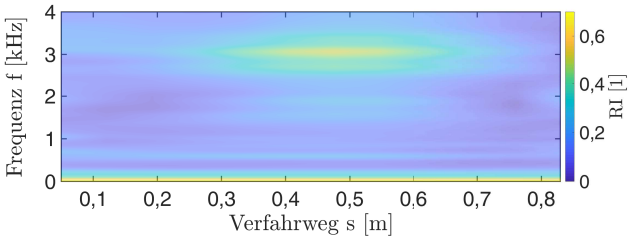
Abbildung 6: Vermessung der Keil-Steg-Struktur in der Draufsicht – Lochbleche in Rot und Verfahrweg in Blau

Die Höhe des gesamten Aufbaus beträgt 4 m und die Breite 6 m. Die Stege sind jeweils 10 cm breit und 65 cm tief. Die Keile weisen eine Breite von 65 cm und eine maximale Tiefe von 50 cm auf. Die Vorderseiten der Stege sind jeweils mit 0,7 mm dickem Lochblech eingefasst. Vor dieser Keil-Steg-Struktur kann eine Verkleidung aus Lochblechkassetten mit einer Kaschierung aus Molton angebracht werden. Diese Lochblechkassetten erstrecken sich über die komplette Fläche des Aufbaus, sind jeweils 75 cm breit, 4 m hoch und an ihren Enden abgekantet. Die abgekanteten Enden zweier Lochbleche treffen entsprechend Abbildung 6 immer vor den Stegen der dahinter liegenden Struktur aufeinander.

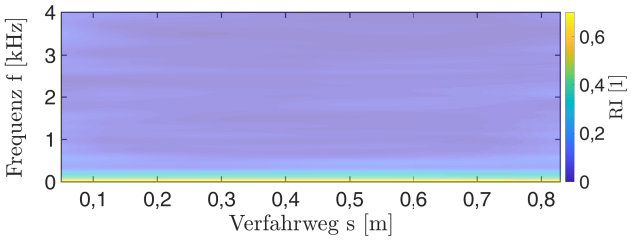
Die Reflexionseigenschaften der Keil-Steg-Struktur und der Einfluss der Verkleidung – Lochblech und Molton – wurden mit dem In-situ-Messverfahren ortsabhängig untersucht. Die Ergebnisse gelten auf einer 15 cm vor den Lochblechkassetten befindlichen Ebene, auf der die Messpositionen lagen.



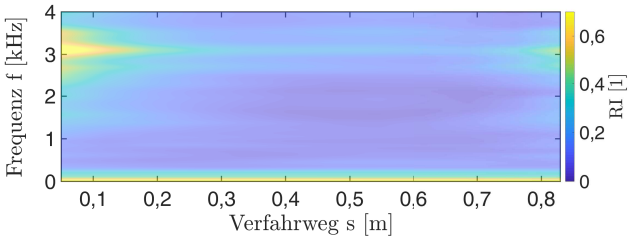
(a) Ergebnis vor dem Steg ohne Lochblechkassetten



(b) Ergebnis vor dem Steg mit Lochblechkassetten



(c) Ergebnis vor dem Keil ohne Lochblechkassetten



(d) Ergebnis vor dem Keil mit Lochblechkassetten

Abbildung 7: Reflexionsindizes vor Steg und Keil

Die Ergebnisse der Untersuchungen vor der Keil-Steg-Struktur mit und ohne Lochblechkassetten sowie Molton werden anhand der Abbildung 7 diskutiert. Auf der Abszisse ist die Position vor der Struktur aufgetragen und entspricht jeweils den blauen Balken in Abbildung 6. Die Ordinate gibt die Frequenz wieder und der Betrag des Reflexionsindexes ist farblich dargestellt. Abbildung 7 gibt die geringen Reflexionsanteile der Keil-Steg-Struktur

deutlich wieder. Auch die Verkleidung führt lediglich zu einem geringfügigen Erhöhung der Reflexionsindezes. An der Position vor dem Steg stoßen die abgekanteten Lochblechkassetten aufeinander. Dort ist der Anstieg der Reflexionsindezes im Frequenzbereich zwischen 1,5 und 3,5 kHz am höchsten.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein In-situ-Messverfahren für das orts- und frequenzabhängige Reflexionsverhalten von Oberflächen vorgestellt, das Phaseninformationen liefert und eine richtungsabhängige Beurteilung ermöglicht. Das Verfahren basiert auf Messungen mit Mikrofonarrays und nutzt Nahfeldholografie zur Separation einzelner Feldanteile. Anhand von Vergleichen mit Messergebnissen aus Untersuchungen mit genormten Verfahren konnte gezeigt werden, dass die Resultate des vorgestellten Messverfahrens sehr gut mit den Referenzmessungen übereinstimmen. In-situ-Messungen der akustischen Grenzfälle Betonwand und Freifeld zeigten ebenfalls plausible Resultate und unterstreichen die Güte des vorgestellten Verfahrens.

Weitere Optimierungen sehen unter anderem die Verkleinerung der Mikrofonarray-Komponenten bis hin zum Handbetrieb vor. Im Zuge dessen ist der Einsatz des Verfahrens zur Lokalisation von Schallquellen in kleinen Räumen wie Pkw-Fahrgastzellen als weiteres Anwendungsfeld zu prüfen. Die Weiterentwicklung des Systems für die Verwendung im Freien zur Überprüfung großer Strukturen, wie zum Beispiel von Lärmschutzwänden oder ähnlichem, ist ebenfalls sinnvoll. Auch die Vergleiche mit weiteren etablierten und normierten Messverfahren zur akustischen Bewertung von Oberflächenbeschaffenheiten werden fortgeführt.

Literatur

[1] E. Fernandez Grande, „Near-field acoustic holography with sound pressure and particle velocity measurements“, Diss., Technical University of Denmark, 2012.

[2] L. K. Natarajan und S. F. Wu, „Reconstructing the vibro-acoustic quantities on a highly non-spherical surface using the Helmholtz equation least squares method“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 131, Nr. 6, S. 4570–4583, 2012.

[3] BASF, *Akustik Basotect G+, TI G-PMF/SM Januar 2016*, Technische Information, BASF, 2016. Adresse: `https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/basotect.html`.

[4] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 10534-2: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion*, Norm, 2001.

[5] easytec GmbH, *Technisches Merkblatt Basotect*. Adresse: `https://profilfueller.eu/pdf_docs/Basotect1easy.pdf`.

[6] Deutsches Institut für Normung, *DIN 52215: Bauakustische Prüfungen - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz im Rohr*, Norm, 1963.