

Schallabsorption einer gelochten Akustikdecke bei winkelabhängigem Schalleinfall

Klaudius Hengst¹, Yohko Aoki², Moritz Späh², Xiaoru Zhou²

¹ Knauf Gips KG, 97346 Iphofen, E-Mail: hengst.klaudius@knauf.de

² Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: moritz.spah@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Durch umfangreiche Untersuchungen in einem Musterklassenraum wurde bereits auf der DAGA 2018 gezeigt, dass durch das Einbringen von Mobiliar, Wandabsorbern und/oder Personen nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden kann, dass die äquivalente Absorptionsfläche im Raum näherungsweise gleichverteilt bzw. das Schallfeld im Raum ausreichend diffus ist, um Prognosen, wie sie im ideal diffusen Schallfeld zutreffen, zu rechtfertigen [1/2].

Weiterhin wurde durch Messungen mit Akustikdecken der Absorberklassen A und C (bewerteter Absorptionsgrad $\alpha_w = 1,00$ und $0,70$ gemäß [3]) verdeutlicht, dass der im Hallraum ermittelte Unterschied der Absorberklassen in einem Standard-Klassenzimmer nicht zwangsläufig in einer unterschiedlichen Nachhallzeit resultiert. Im Gegenteil ergab die Ausstattung mit einem periodisch perforierten Absorber ($\alpha_w = 0,70$) tendenziell gleiche oder kürzere gemessene Nachhallzeiten als bei der Ausstattung des Raumes mit einem homogenen Mineralfaserabsorber ($\alpha_w = 1,00$) als abgehängte Unterdecke [1].

Um die Ergebnisse zu verifizieren wurden die wichtigsten Untersuchungen aus dem Klassenraum-Projekt in einem zweiten, anders dimensionierten Raum (Testraum II) wiederholt, und zudem weitere Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Testraum II nicht nur bestätigt, die Ausstattung mit dem perforierten C-Absorber führte speziell im tieffrequenten Bereich zu nochmals deutlich niedrigeren Nachhallzeiten verglichen mit dem homogenen A-Absorber.

Dieses weiterführende Projekt wurde, wie schon das vorangegangene, von Knauf in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP Stuttgart durchgeführt. Um die Eigenschaften der eingesetzten Absorber näher zu untersuchen und mögliche Erklärungen für die resultierenden Nachhallzeiten zu liefern, wurden durch das IBP Berechnungen mittels Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt [4]. Einige dieser Ergebnisse werden hier vorgestellt.

Rückblick Musterklassenraum

Das Diagramm in Abbildung 1 zeigt den direkten Vergleich zwischen gemessenen und nach Sabine [5] berechneten Nachhallzeiten einer homogenen A- und gelochten C-Akustikdecke im ca. 50 % besetzten Klassenzimmer mit zusätzlichen Wandabsorbern an drei Seiten des Raumes. Abbildung 2 zeigt den Musterklassenraum im besetzten Zustand mit 15 Personen, C-Absorberdecke und Wandabsorbern. Weitere Zwischenergebnisse finden sich in [1]. Die Messergebnisse zeigen ab ca. 250 Hz ähnliche Nachhallzeiten. Unterhalb 250 Hz werden mit dem perforierten C-Absorber erkennbar niedrigere Nachhallzeiten gemessen. Auffällig ist zudem der teilweise deutliche

Unterschied zwischen Messung und Berechnung nach Sabine. Die Toleranzbereiche der Nachhallzeit für den Musterklassenraum A3 und A4 (Inklusion) gemäß DIN 18041 [6] sind in Abb. 1 als graue Linien dargestellt. Berechnungsmethoden und Toleranzbereiche gemäß [6] werden ausführlich in [1/2] diskutiert.

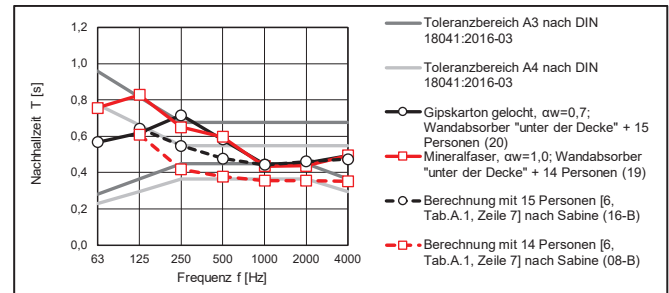


Abbildung 01: Gemessene und berechnete Nachhallzeiten mit Akustikdecke, Wandabsorbern und Personen im Musterklassenraum. Die unterschiedlichen Personenzahlen im Besetzungszustand ergaben sich aus logistischen Gründen.



Abbildung 02: Ca. 50 % Belegungsdichte (15 Personen im Musterklassenraum).

Testraum II

Testraum II hatte die Abmessungen 5,17 m x 4,17 m x 3,17 m (vgl. Abb. 3). Mit Ausnahme der doppelflügeligen Stahl-Eingangstür, waren alle Begrenzungswände aus Stahlbeton. Die Raster-Akustikdecken wurden auch in diesem Raum 250 mm von der Rohdecke abgehängt, so dass sich eine lichte Raumhöhe von 2,92 m und ein Raumvolumen von ca. 63 m³ ergaben. Zur raumakustischen Konditionierung wurden dieselben Materialien wie im Musterklassenraum verwendet. Hierbei handelt es sich zum einen um ein Produkt aus 40 mm Mineralfaser (MF, $\alpha_w = 1,0$), zum anderen um eine gelochte Gipskartonkassette (GK, LFA 10,5 %) mit 50 mm Mineralwollehinterlegung ($\alpha_w = 0,7$). Die Wandabsorber (Länge 0,45 m x Breite 2,4 m x Höhe 55 mm) bestehen ebenfalls aus gelochtem Gipskarton, hinterlegt mit 30 mm Mineralwolle. Die im Hallraum gemäß [7] gemessenen frequenzabhängigen Absorptionsgrade finden sich in [1]. Die

Wandabsorber wurden jeweils an der Rückwand (2 Stück) und an der Seitenwand (4 Stück) angebracht. Der Raum wurde in einigen Messsituationen zur Erhöhung der Diffusität des Schallfeldes mit 4 Tischen und 8 Stühlen ausgestattet (vgl. Abb. 04).

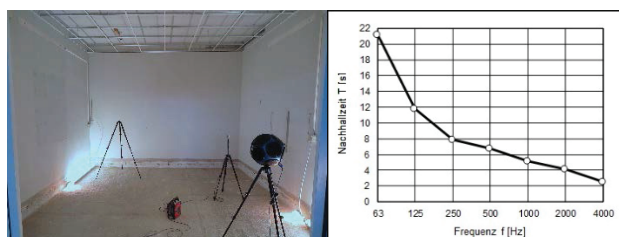


Abbildung 03: Links: leerer Testraum II mit Unterkonstruktion einer Rasterdecke, Blick auf die Rückwand; Rechts: gemessene Nachhallzeit im leeren Raum wie links abgebildet.

Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgte nach [8]. Es wurden Messungen aus jeweils 12 Lautsprecher-Mikrofonkombinationen gemittelt und die Nachhallzeiten T30 ausgewertet. Die Mikrofonhöhen waren an die Hörerpositionen angepasst und betragen 1,2 m bzw. 1,6 m.

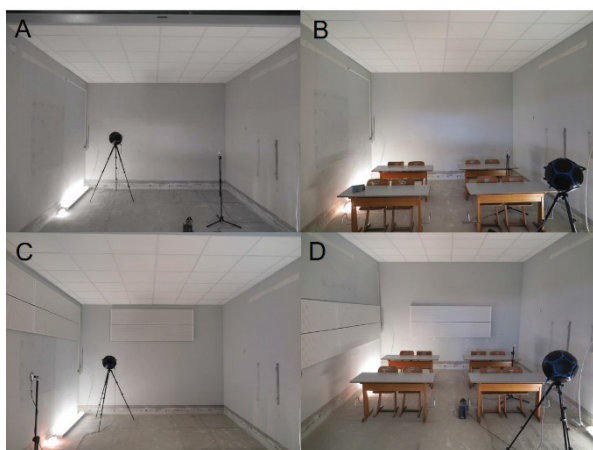
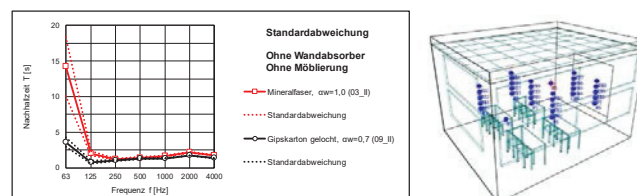


Abbildung 04: Beispielhafte Raumsituationen: **A:** Raum mit Akustikdecke ohne Möblierung, ohne Wandabsorber, **B:** Raum mit Akustikdecke mit Möblierung, ohne Wandabsorber, **C:** Raum mit Akustikdecke ohne Möblierung, mit Wandabsorbern „unter der Decke“, **D:** Raum mit Akustikdecke mit Möblierung, mit Wandabsorbern auf „Ohrhöhe“ (entspricht Mikrofonhöhen innerhalb der Ober- und Unterkante der Wandabsorber).

Die Werte der gemessenen Nachhallzeit im tiefen Frequenzbereich können abhängig von der Messposition stark voneinander abweichen. Um diesen Einfluss bestimmen zu können, wurden Messungen mit Akustikdecke, ohne Wandabsorber und ohne Möblierung (vgl. Abb. 4-A) mit 60 Messpositionen durchgeführt. Es wurden 5 Mikrofonpositionen in jeweils 6 Höhen (1,0/1,2/1,4/1,6/1,8/2,0 m) in Kombination mit 2 Lautsprecherpositionen bestimmt (vgl. Abb. 05 rechts).

Wie in Abbildung 5 links dargestellt, zeigen sich besonders im 63 Hz-Band vergleichsweise hohe Standardabweichungen, die sich jedoch bereits im 125 Hz-Band signifikant verringern (vgl. Abb. 05 Tabelle unten).



Standardabweichung der Nachhallzeit (T30) [s] Messung							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Mineralfaser, $\alpha_w=1,0$ (03_II)	4,12	0,32	0,09	0,12	0,07	0,11	0,04
Gipskarton gelocht, $\alpha_w=0,7$ (09_II)	0,68	0,23	0,08	0,08	0,05	0,03	0,04

Abbildung 05: Links oben: Standardabweichung der gemessenen Nachhallzeiten mit A- (rot) und C- (schwarz) Absorber-Akustikdecke; Rechts oben: schematische Darstellung von Testraum II mit eingezeichneten Mikrofonpositionen auf unterschiedlichen Höhen; Unten: Standardabweichung tabellarisch.

Messergebnisse und Diskussion

Räume mit besonders schallharten Wänden (z.B. aus Beton) führen vor allem im tieffrequenten Bereich zu deutlich höheren Nachhallzeiten als Räume mit Wänden in Leichtbauweise, die durch ihr Masse-Feder-System als Tieftonabsorber wirken (z.B. Trockenbauwände). Die gemessene NHZ des Musterklassenraums bestätigt dies [1]. Testraum II weist dementsprechend tieffrequent deutlich längere Nachhallzeiten auf als der Musterklassenraum, der vorwiegend in Trockenbauweise errichtet wurde und zudem mehr als dreimal so groß ist als Testraum II [1]. Mit sehr geringer Grundabsorption ist die resultierende Nachhallzeit eines Raumes nahezu vollständig von zusätzlich eingebrachten Absorbern wie Akustikdecke, Wandabsorbern, Mobiliar und ähnlichem abhängig.

In den nachfolgenden Diagrammen (vgl. Abb. 6-9) sind die gemessenen (durchgezogene Linien) und die nach Sabine berechneten Nachhallzeiten (gestrichelte Linien) von 125 Hz bis 4000 Hz angegeben. In allen Diagrammen sind die gemessenen, sowie die berechneten Nachhallzeiten mit abgehängter Mineralfaserdecke als rote und mit perforierter Gipskartondecke als schwarze Linien dargestellt.

Die Diagramme in den Abbildungen 6-9 zeigen die Veränderung der Nachhallzeiten bei Ausstattung des Testraums II mit zusätzlichem Mobiliar, sowie Wandabsorbern an einer kurzen und einer langen Wand.

Gemäß Abb. 6 war die äquivalente Absorptionsfläche nur an der Decke und damit besonders ungleichmäßig im Raum verteilt. Auch das Schallfeld wurde nicht durch zusätzlich schallstreuende Elemente beeinflusst. In dieser Situation unterscheiden sich die nach Sabine berechneten Nachhallzeiten stark von den gemessenen Werten. Eindeutig zeigt sich bei allen Messungen, jedoch am deutlichsten in Abb. 6, dass die gemessenen Nachhallzeiten mit perforierter Gipskartondecke in den meisten Fällen kürzer sind, als mit der homogenen Mineralfaserdecke.

Während sich bei der Situation mit homogenem A-Absorber die Nachhallzeiten bei 125 Hz von ca. 2,0 s auf ca. 1,2 s verringern, verändert sich die Nachhallzeit mit perforierter Decke im 125 Hz-Band praktisch nicht und bleibt in diesem Frequenzbereich auf gleichem Niveau, bei ca. 0,8 s.

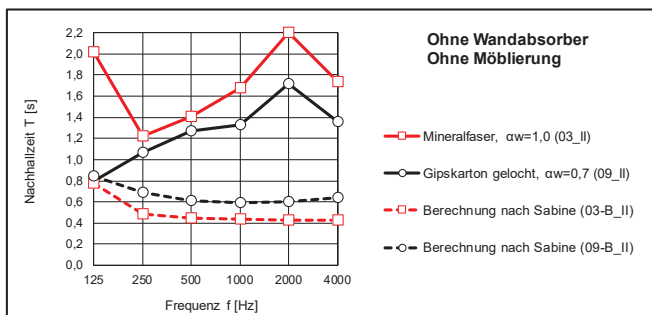


Abbildung 06: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, ohne Wandabsorber, ohne Möblierung (Abb. 04-A).

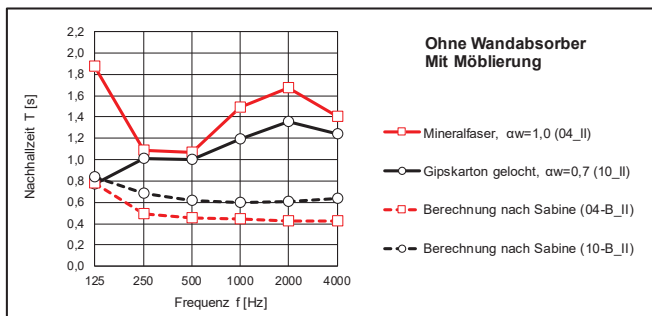


Abbildung 07: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, ohne Wandabsorber, mit Möblierung (Abb. 04-B).

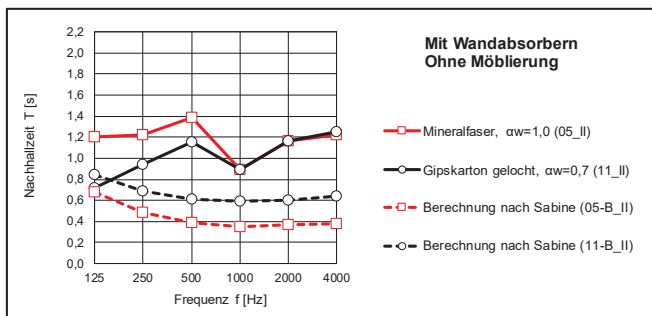


Abbildung 08: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, ohne Möblierung (Abb. 04-C).

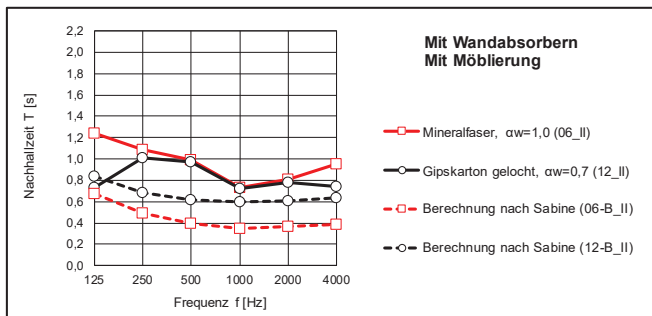


Abbildung 09: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, mit Möblierung.

Die Wirkung der Positionierung von Wandabsorbern wurde in [1] diskutiert. Durch die Versetzung von Wandabsorbern auf Ohrhöhe (bzw. Mikrofonhöhe) ließ sich die Nachhallzeit im Musterklassenraum am Empfängerort deutlich reduzieren [1]. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch im Testraum II.

Die durchgezogenen und die gepunkteten Linien in Abb. 10 zeigen gemessene, die gestrichelte die nach Sabine berechneten Nachhallzeiten. Der Unterschied zwischen durchgezogener und gepunkteter Linie ergibt sich einzig durch die unterschiedliche Höhe der Montage der Wandabsorber (vgl. Abb. 04-D).

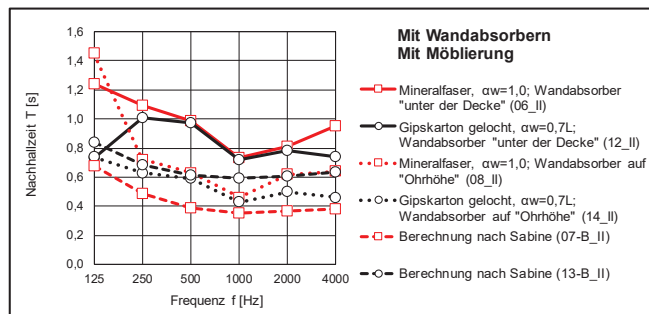


Abbildung 10: Einfluss der Wandabsorberpositionierung auf die Nachhallzeit.

Im Fall des C-Absorbers nähern sich die gemessenen Nachhallzeiten denen nach Sabine berechneten an. Im Falle des homogenen A-Absorbers bleibt die Differenz zwischen Messung und Berechnung größer. Am deutlichsten ist der Unterschied jedoch im 125 Hz Oktavband sichtbar. Hier verlängert sich die Nachhallzeit beim A-Absorber sogar (vgl. Abb. 10).

Winkelabhängiger Schalleinfall

Auf Grundlage der vorhandenen Daten aus dem Musterklassenraum und dem Testraum II stellt sich die Frage, ob ein periodisch perforierter Absorber im nicht diffusen Schallfeld bzw. bei ungleichmäßig verteilter äquivalenter Absorptionsfläche aus raumakustischer Sicht Vorteile generiert. Daher wurden Simulationen der eingesetzten Akustikdecken durch das IBP durchgeführt. Eine Methode der theoretischen Untersuchung von Schallfeldern ist z.B. die FEM. Grundlagen und Projektdesign werden in [4] erläutert.

Die Diagramme in Abb. 11 zeigen die Absorptionsgrade des homogenen Mineralfaserabsorbers und des Lochplattenabsorbers in Oktavbändern einer 2-D-FEM-Simulation bei unterschiedlichen Schalleinfallswinkeln ($\theta = 0^\circ/45^\circ/78^\circ$) bzw. im Diffusfall. Abbildung 12 zeigt die Absorptionsgrade des MF-Absorbers und des perforierten GK-Absorbers bei diffusstem Schalleinfall (Abb. 12 links) bzw. schrägem Schalleinfall $\theta = 78^\circ$ (Abb. 12 rechts) im direkten Vergleich. Die Konstruktionstiefen betragen dabei einmal 65 mm (Abb. 12 oben) bzw. 200 mm (Abb. 12 unten).

Abbildung 11 links zeigt, dass sich bei flachem Schalleinfallswinkel die Absorptionseigenschaften beim homogenen Mineralfaserabsorber deutlich reduzieren, während der periodisch perforierte Absorber über alle betrachteten Schalleinfallswinkel ähnliche Eigenschaften aufweist. Im direkten Vergleich zeigen die Grafiken in Abb. 12 bei flachem Schalleinfallswinkel bei 200 mm Konstruktionstiefe ähnliche, bei 65 mm Konstruktionstiefe über nahezu alle Oktavbänder höhere Absorptionskoeffizienten bei der gelochten GK-Platte.

Bei nicht ideal diffusem Schallfeld kann die resultierende Nachhallzeit von akustischen Abklingvorgängen dominiert werden, wie sie zwischen parallelen, wenig absorbierenden Wänden stattfinden [2]. Da der Absorptionsgrad einer periodisch perforierten GK-Decke in der FEM-Simulation nur geringe Winkelabhängigkeit gegenüber auftreffenden Schallwellen zeigt, kann vermutet werden, dass im realen Schallfeld nicht nur direkt auf diesen Absorber treffender Schall, sondern zugleich parallel dazu laufende Schallwellen absorbiert werden. Die untersuchten Räume lassen die These zu das, zumindest in Räumen mit ähnlicher Geometrie, solch ein „All-Winkel-Absorber“, nur an einer Raumboberfläche angebracht, vergleichbar ist mit einer gewissen Verteilung der äquivalenten Absorptionsfläche im gesamten Raum. Ein Indiz dafür ist, dass die Nachhallzeitmessungen mit perforierter Akustikdecke näher an der Berechnung nach Sabine liegen, als das bei dem homogenen Mineralfaserabsorber der Fall ist.

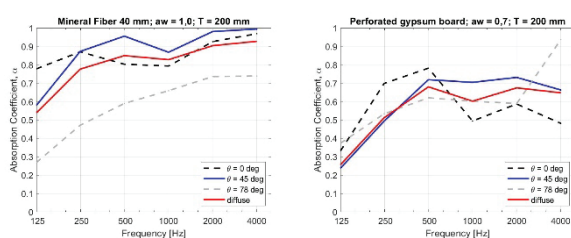


Abbildung 11: Simulationsergebnisse mit FEM bei unterschiedlichen Schalleinfallswinkeln und im Diffusfeld, Konstruktionstiefe 200 mm, **Links:** homogener Mineralfaserabsorber, **Rechts:** gelochter GK-Platte mit 40 mm Mineralwollehinterlegung.

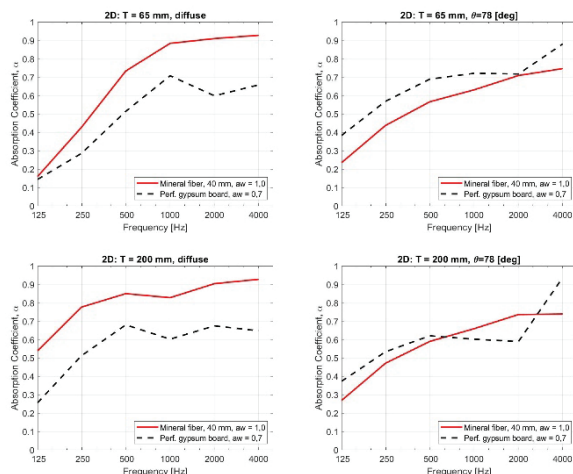


Abbildung 12: Simulationsergebnisse mit FEM, Vergleich zwischen homogenem Mineralfaserabsorber und gelochter GK-Platte; **Links oben:** Diffuser Schalleinfall, Konstruktionstiefe 65 mm; **Rechts oben:** Schalleinfallswinkel = 78°, Konstruktionstiefe 65 mm; **Links unten:** Diffuser Schalleinfall, Konstruktionstiefe 200 mm; **Rechts unten:** Schalleinfallswinkel = 78°, Konstruktionstiefe 200 mm.

Zusammenfassung/Fazit

Im untersuchten kleineren Raum war die äquivalente Absorptionsfläche nicht gleichmäßig im Raum verteilt, damit ergab sich ein wenig diffuses Schallfeld. In diesem Raum und einem etwas größeren vermessenen Testraum [1] führte ein

im Hallraum gemessener homogener Mineralfaserabsorber (A-Absorber) ab 250 Hz aufwärts zu ähnlichen Nachhallzeiten, verglichen mit einem periodisch perforierten Lochplattenabsorber (C-Absorber). In den Oktavbändern 63 Hz und 125 Hz wurden in Testraum II niedrigere Nachhallzeiten mit dem periodisch gelochten Absorber aus Gipskarton gemessen.

Eine Erklärung dafür könnte sein, dass der Schall im nicht diffusen Schallfeld verstärkt schräg auf den Absorber trifft. Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn Schallwellen zwischen zwei parallelen Wänden mehrfach reflektieren und so unter flachem Winkel auf die Akustikdecke treffen. Für diesen schrägen Schalleinfall zeigen die Simulationsergebnisse bei tiefen Frequenzen ähnliche, oder etwas höhere Absorptionsgrade für den Lochplattenabsorber als für den Mineralfaserabsorber. Unter der Annahme, dass in vielen ähnlichen Räumen mit Akustik-Unterdecke, selbst bei Bestuhlung und Besetzung, kein vollständig diffuses Schallfeld herrscht, scheint die durch die Absorberklassen [3] suggerierten Unterschiede in realen Räumen unbedeutend zu sein.

Die vorliegenden Untersuchungen legen nahe, dass der Einsatz von periodisch perforierten Absorbieren wie z.B. Lochdecken mit Mineralwollehinterlegung bei tiefen Frequenzen Vorteile aufweisen können, wie eine erhöhte Schallabsorption bei schrägem Schalleinfall. Um diese Effekte für verschiedene Absorberarten verifizieren zu können, bedarf es weiterführender Untersuchungen. Hierbei sind praktische Untersuchungen von Absorptionseigenschaften z.B. im Schalldämpferprüfstand oder im Freifeldraum, hinsichtlich des winkelabhängigen Schallabsorptionsgrades denkbar.

Literatur

- [1] Hengst, K.; Späh, M.; Xiaoru, Z.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen, DAGA 2018, München
- [2] Späh, M.; Hengst, K.; Xiaoru, Z.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen und Berechnungen, DAGA 2018, München
- [3] DIN EN ISO 11654:1997-07 Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden, Bewertung der Schallabsorption, Beuth Verlag
- [4] Aoki, Y.; Hengst, K.: Acoustic scattering from the suspended ceiling with the perforated facing, DAGA 2020, Hannover
- [5] Sabine, W. C.: Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press, 1922
- [6] DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Beuth Verlag
- [7] DIN EN ISO 354:2003-12 Messung der Schallabsorption in Hallräumen, Beuth Verlag
- [8] DIN EN ISO 3382-2:2008-09, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik-Teil 2, Beuth Verlag