

BBSR-
Online-Publikation
41/2023

Akustik abgehängter Unterdecken

Schalllängsdämmung und Schallabsorption

von

David Goecke
Roman Wack
Mark Koehler

Akustik abgehängter Unterdecken

Schalllängsdämmung und Schallabsorption

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.20

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 12.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autoren

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart
David Goecke, M. Ac., M. Sc. (Projektleitung)
david.goecke@ibp.fraunhofer.de

Roman Wack, Dipl.-Ing. (FH)
roman.wack@ibp.fraunhofer.de

Mark Koehler, M. BP., Dipl.-Ing. (FH)
mark.koehler@ibp.fraunhofer.de

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart
David Goecke, M. Ac., M. Sc.

Stand

Juni 2023

Gestaltung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart
David Goecke, M. Ac., M. Sc.

Bildnachweis

Titelbild, Abbildungen und Grafiken: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Goecke, David; Wack, Roman; Koehler, Mark: Akustik abgehängter Unterdecken: Schalllängsdämmung und Schallabsorption.
BBSR-Online-Publikation 41/2023, Bonn.

ISSN 1868-0097

Bonn 2023

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung und Problemstellung	8
Abgehängte Deckensysteme	8
Grundlagen der Akustik	8
Schallfeld	9
Schallabsorption	9
Schalltransmission	11
Norm-Flankenschallpegeldifferenz	13
Strömungswiderstand	14
Untersuchungsgegenstand	16
Stand der Forschung/Baupraxis	19
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	19
Zielstellung	21
Konkrete Projektziele	21
Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	21
Forschungsdesign	22
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	22
Forschungsfragen und methodischer Ansatz	22
Ziel- und Erfolgskriterien	23
Messtechnische Untersuchung	25
Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke	25
Exkurs: Kanteneffekt	27
Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz einer abgehängten Unterdecke	29
Messung der Schalltransmission einer abgehängten Unterdecke	31
Ergebnisse	34
Zusammenführung der Messergebnisse	34
Mineralfaserplatte	34
Metallkassette	38
Gipskarton und Holzwole	41
Berechnungsmodelle	44
Simulation der Schallausbreitung	45
Prognosemodell	49
Validierung	52
Leitfaden für die Akustik abgehängter Unterdecken	63
Geltungsbereich	63
Hoher spezifischer Strömungswiderstand	63
Optimaler spezifischer Strömungswiderstand	63
Tutorial Excel-Werkzeug	64
Allgemeine Hinweise	64

Schritt 1: Eingabe der Messdaten	64
Schritt 2: Festlegung der Abhängehöhe	64
Schritt 3: Auswahl der Prognose und Ergebnisausgabe	64
Bewertung der Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext	66
Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit	67
Danksagung	68
Mitwirkende	69
Literatur	70
Abbildungs- und Bildverzeichnis	71
Tabellenverzeichnis	75
Anlagen	76
Korrekturwerte für Norm-Flankenschallpegeldifferenz	76
Koeffizienten für Korrektur der Norm-Flankenschallpegeldifferenz	76

Kurzfassung

Abgehängte Unterdecken beeinflussen die Schalldämmung zwischen Räumen sowie die Raumakustik. Der Deckenhohlraum zwischen Unter- und Rohbaudecke, welcher durch die sogenannte Abhängehöhe definiert wird, stellt dabei einen maßgebenden Parameter für die beiden akustischen Effekte dar.

Nach DIN EN ISO 10848 soll die Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Labor bei einer Abhängehöhe von 700 mm bis 800 mm ermittelt werden. Die Schallabsorption von Unterdecken wird nach DIN EN ISO 354 standardmäßig mit 200 bzw. 400 mm Abhängehöhe im Hallraum mit umlaufendem Holzrahmen gemessen. In der Praxis findet man bei Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze (z. B. Schulen, Büros und viele Hotelgebäude) meist geringere Geschosshöhen mit Abhängehöhen von 150 mm bis 300 mm vor.

Die Laborwerte werden von Planern notgedrungen für Prognosen verwendet, ungeachtet der Unsicherheiten dieser Werte bezüglich der tatsächlichen Abhängehöhe. Diese Tatsache birgt ein großes Potential von Schallschutzmängeln. Aus diesem Grund sollen im Projekt Werte für beide Messverfahren mit vergleichbaren Abhängehöhen von ca. 150 mm bis 800 mm, sowie Entwicklungshinweise für Hersteller ermittelt und mit deren Hilfe Prognosemodelle für die nachträgliche Umrechnung älterer Messungen erstellt werden.

Abstract

Suspended ceilings have an impact on sound insulations as well as on room acoustics. The suspension height, meaning the space between room ceiling and suspended ceiling, is an imported parameter which influence both acoustical effects.

According to DIN EN ISO 10848 normalized flanking level difference is proved in laboratories at suspension heights between 700 mm and 800 mm. The degree of absorption of a suspended ceilings surrounded by a wooden frame are proved according to DIN EN ISO 354 at 200 mm or 400 mm in a reverberation chamber. In buildings like schools, offices, and many hotels lower suspension heights of 150 mm to 300 mm are usual.

Under these circumstances laboratory values are necessarily used by planners or architects regardless actual suspension heights in buildings. Therefore, there is a potential of soundproof deficiencies. In this research project values from both measuring methods with comparable suspension heights of approx. 150 mm to 800 mm will lead to instructions for manufacturers, planners, and architects. In addition, a computational model is going to convert older results for other suspension heights.

Einführung und Problemstellung

Der Markt für Büroflächen (Stand 2017) stellt mit einem Investitionsvolumen von rund 23 Milliarden Euro einen wichtigen Bereich auf dem Immobilienmarkt dar. Während die Anzahl der Bauanträge bei Nichtwohngebäuden bei 30.000 pro Jahr, sowie die geplante Nutzfläche mit 30 Millionen Quadratmetern in den letzten 10 Jahren ungefähr konstant war, sind die veranschlagten Kosten um ca. 30 % gestiegen (Statistisches Bundesamt 2016; Eine Übersicht, welche Auswirkungen die COVID-Pandemie und der Krieg in der Ukraine (2022) auf diese Zahlen hat, wurde in nicht recherchiert). Die Gründe für die Kostensteigerungen sind vielfältig. Im Fall abgehängter Unterdecken stellt sich die Frage, ob die Schalllängsdämmung bei vollflächiger Verlegung über ein ganzes Geschoss ausreichend ist. Ist dies nicht der Fall oder kann dies nicht mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden, sind die Trennwände in der Regel durchgehend ausgeführt und die Decken segmentiert. Dies führt zu erhöhten Kosten und zu einer reduzierten Flexibilität.

Abgehängte Deckensysteme

Abgehängte Unterdecken sind ein wertvolles Gestaltungsmittel im Objektbau und erfüllen eine Vielzahl bauphysikalischer Anforderungen (u. a. Schall-, Wärme-, Brandschutz). Unterdecken bestehen typischerweise aus (gelochtem) Gipskarton oder Metall sowie gepresster Mineral- oder Holzwolle. Die Kombination der Werkstoffe ermöglicht eine zielgerichtete Gestaltung der benötigten Anforderungen. Die Abhängehöhe beschreibt die Höhe des Hohlraumes zwischen der Unterdecke und der Unterseite der Rohdecke. Dadurch besteht kein unmittelbarer Kontakt zur Rohdecke als tragendes Bauteil.

Abgehängte Unterdecken ermöglichen

- das Aus- bzw. Angleichen von Unebenheiten der Rohdecke,
- die Regulierung der (einheitlichen) Raumhöhe und
- versteckten Installationsraum für Gebäude-, Wärme- und Elektrotechnik sowie zusätzlichen Schallschutz.

Unterdecken werden in der Regel elementweise oder im Verbund verbaut. Eine zum Einlegen der einzelnen Deckenplatten (ggf. inkl. Gebäude- bzw. Wärmetechnik) genutzte Unterkonstruktion lässt dabei häufig die typische Struktur eines Rasters erkennen. Das verwendete Rastersystem unterscheidet sich dabei hauptsächlich durch die verwendeten Profile sowie durch die sichtbare Ausprägung des Rasters. Die zur Aufhängung verbaute Unterkonstruktion sowie die raumabschließenden Unterdecke als Decklage beeinflusst dadurch die Raumgestaltung wesentlich.

Grundlagen der Akustik

Nach DIN EN ISO 10848-2:2018-02 [1] soll die Norm-Flankenpegeldifferenz im Prüfstand bei einer Abhängehöhe von 700 mm bis 800 mm ermittelt werden. Die Schallabsorption von Unterdecken wird nach DIN EN ISO 354:2003 [2] allerdings mit 200 bzw. 400 mm Abhängehöhe nach dem Hallraumverfahren gemessen. In der Praxis werden wiederum in Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze (z. B. Schulen, Büros und Hotelgebäude) auch abweichende Abhängehöhen bis 300 mm realisiert. Daran wird die Diskrepanz zwischen den standardisierten Messverfahren und der Praxis deutlich. Diese Tatsache birgt ein Risiko für Schallschutzmängel und wird in dem hier vorgestellten Vorhaben untersucht. Dabei ist ein maßgebendes Ziel die Umrechnung des akustischen Verhaltens von abgehängten Unterdecken für Abhängehöhen in der Praxis basierend auf Messungen im Labor. Dies gelingt über ein vorgestelltes digitales Werkzeug, welches schließlich in einem Leitfaden beschrieben steht.

Für das grundlegende Verständnis der Schallausbreitung an bzw. durch Unterdecken werden im Folgenden die wesentlichen Begriffe und Größen erläutert. Hierzu zählen das Schallfeld, die Schallabsorption, die Schalltransmission, die Norm-Flankenschallpegeldifferenz und der Strömungswiderstand der verwendeten Materialkombination einer abgehängten Unterdecke.

Schallfeld

An einem schallharten Hindernis wird eine auftreffende Schallwelle vollständig reflektiert. In einem geschlossenen Raum bilden sich stehende Wellen zwischen den schallharten Begrenzungsflächen (z. B. Wände) aus. An einem schallharten Abschluss ist die Schallschnelle der einzelnen Luftmoleküle an der Wand minimal und der Druck maximal. Im Abstand einer Viertel-Wellenlänge vor der Wand ist die Schnelle maximal und der Druck minimal. Für einen quaderförmigen Raum tritt die erste Resonanz einer stehenden Welle (Mode) bei der Frequenz auf, deren halbe Wellenlänge der größten Raumabmessung entspricht.

Für jede Frequenz, deren Vielfaches ihrer halben Wellenlänge einer Raumabmessung entspricht, entsteht eine Resonanz. Da die Wellenlänge zu höheren Frequenzen kürzer wird, rücken die Moden enger zusammen. Bei zunehmender Modendichte wird der Raumeinfluss geringer. Bei einer ausreichenden Modendichte bzw. einer Grenzfrequenz („Schröder“-Frequenz) wird ein Schallfeld als diffus bezeichnet. Der Schalldruckpegel ist ortsunabhängig messbar und der Schalleinfall ist aus allen Richtungen gleich [3]. Ein Hallraum bietet die Laborbedingungen zur Messung der Schallabsorption im diffusen Schallfeld nach DIN EN ISO 354.

Schallabsorption

Die Akustik eines Raumes mit abgehängte Unterecke kann durch diese beeinflusst werden. Dabei ist der Schallabsorptionsgrad (α bzw. α_w (bewerteter Einzahlwert), [-]) der Unterdecke maßgebend. Ist die Schallabsorption in Räumen der Raumnutzung nicht oder nicht ausreichend angepasst, wird die Akustik im Raum als „schlecht“ wahrgenommen. Dies wird z. B. durch eine geringe Sprachverständlichkeit oder durch eine erhöhte Hintergrundgeräuschbelastung deutlich. Wesentliche und messbare Größe zur Beurteilung der Schallabsorption ist die Nachhallzeit. Abhängig von schallabsorbierenden Materialien in einem Raum ist diese kürzer (z. B. im Tonstudio) oder länger (z. B. in einer Kirche) ausgeprägt.

DIN 18041 enthält Anforderungen bezüglich der Raumakustik, Empfehlungen, Planungsrichtlinien und notwendige Maßnahmen, um primär die Hörsamkeit der sprachlichen Kommunikation sicherzustellen. Die Komponenten Größe, Geometrie und Ausstattung des Raums müssen akustisch aufeinander abgestimmt sein, um eine gute Hörsamkeit über mittlere und größere Entfernungen zu erzielen. Der Gesamtstörschalldruckpegel muss dabei ebenfalls berücksichtigt werden. Die Nachhallzeitanforderungen, die für eine optimale Hörsamkeit entscheidend sind, werden durch das Volumen des Raums sowie durch die Art der Nutzung bestimmt. Für die Gewährleistung einer hohen Verständlichkeit sind in Vorlesungssälen oder Vortragsräumen beispielsweise deutlich geringere Nachhallzeiten erforderlich als in Konzertsälen. Die ideale Nachhallzeit für einen Vorlesungssaal liegt bei einer Frequenz zwischen 500 Hz und 1000 Hz bei 0,5 s, während in Räumen für Orgelmusik bei gleicher Frequenz eine Nachhallzeit von 2 s bis 5 s als optimal angesehen wird. Zur Verbesserung der Verständlichkeit können aktive Maßnahmen eingesetzt werden, die sich direkt auf die Nachhallzeit auswirken [4].

Unter der Nachhallzeit T wird das Zeitintervall verstanden, innerhalb dem sich, nach Beendigung der Schallfeldanregung, im Raum ein Schalldruckpegelabfall um 60 dB ergibt. Die frequenzabhängige Größe T wird in Sekunden angegeben. Der Vorgang, der die mit der Zeit exponentiell abklingende Schallenergiedichte beschreibt, wird in der Raumakustik als Nachhall definiert. Nach Sabine wird dieser Vorgang durch die Nachhallzeit T in Formel 1 beschrieben:

$$T = \frac{55,3}{c_0} \cdot \frac{V}{A_{\text{eq}}} \approx 0,163 \cdot \frac{V}{A_{\text{eq}}} \quad [\text{s}] \quad \text{Formel 1}$$

mit

c_0 = Schallgeschwindigkeit in Luft [m/s]

T = Nachhallzeit eines Raumes [s]

V = Raumvolumen [m³]

A_{eq} = äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche wird nach Formel 2 durch Umstellen von Formel 1 aus der Differenz der Quotienten des Hallraumvolumens V und der Nachhallzeit mit (T_1) bzw. ohne (T_0) Prüfobjekt bestimmt. Die Nachhallzeit T_1 wird nach dem Hallraumverfahren gemäß DIN EN ISO 354 mit einer Prüffläche ($S = 10 \text{ m}^2$ oder $S = 12 \text{ m}^2$) des Prüfobjektes bestimmt.

$$A_{\text{eq}} = \frac{55,3}{c_0} \cdot \left(\frac{V}{T_1} - \frac{V}{T_0} \right) \quad [\text{m}^2] \quad \text{Formel 2}$$

mit

T_1 = Nachhallzeit mit Prüfobjekt [s]

T_0 = Nachhallzeit ohne Prüfobjekt [s]

Nach Formel 3 wird schließlich der Schallabsorptionsgrad α_s ermittelt:

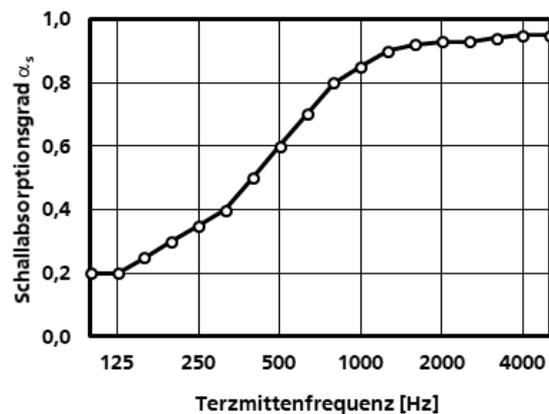
$$\alpha_s = \frac{A_{\text{eq}}}{S} \quad [-] \quad \text{Formel 3}$$

mit

α_s = Schallabsorptionsgrad (gemessen) [-]

S = absorbierende Einzelfläche [m²]

Abgehängte Unterdecken bestehen häufig mindestens anteilig aus Materialien, die als poröse Schallabsorber wirken. Diese sind wiederum aus Fasern oder Zellen zusammengesetzt. Sie stellen einen Widerstand für eine hindurchfließende Luftströmung (siehe Strömungswiderstand) dar, der bei gleichbleibendem Material mit der Materialdicke proportional ansteigt. Im Material selbst kommt es durch Reibung zur Umwandlung der mechanischen Energie in Wärme. Da die Reibung mit höheren Frequenzen zunimmt, steigt die Schallabsorption poröser Absorber mit hohen Frequenzen an (siehe Abbildung 1). Basierend auf dem frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad α_s (Index „s“: basierend auf Messungen) wird schließlich nach DIN EN ISO 717-1 [5] ein bewerteter Schallabsorptionsgrad α_w als Einzahlwert zur Quantifizierung der Schallabsorption ermittelt. Dieser wird zur Einordnung des Schallabsorbers in eine Schallabsorberklasse verwendet.



Quelle: IBP

Abbildung 1

Beispielhaftes Verhalten der Schallabsorption α_s eines porösen Schallabsorbers aufgetragen über Terzmittenfrequenzen in Hz. Ausgehend von 20 % bei 100 Hz ansteigend bis zu einem Maximum von ca. 90 % ab 1.250 Hz.

Schalltransmission

Trifft Schall auf eine poröse Materialfläche, wird ein Anteil der Schallenergie an der Oberfläche direkt reflektiert. Der verbleibende Anteil dringt in die Poren des Materials ein. Das Potenzial eines Materials Schall zu absorbieren, wird durch den frequenzabhängigen (bereits vorgestellten) Schallabsorptionsgrad α des Materials beschrieben. Der Zusammenhang zwischen dem Reflexionsfaktor r und Absorptionsgrad α , ist in Formel 4 gegeben.

$$1 = \alpha + |r^2| \quad [-] \quad \text{Formel 4}$$

mit

 α = Schallabsorptionsgrad [-] r = Reflexionsfaktor [-]

Der absorbierte Schall kann entweder das Material durchdringen (transmittieren) oder durch Reibung in den Poren in Wärme umgewandelt werden. Letzteres wird als Dissipation bezeichnet. Somit ist, wie in Formel 5 aufgeführt, der Schallabsorptionsgrad α aus einem dissipativen Anteil, dem Dissipationsgrad φ , und einem transmittierten Anteil, dem Transmissionsgrad τ , zusammengesetzt.

$$\alpha = \varphi + \tau \quad [-] \quad \text{Formel 5}$$

mit

 α = Schallabsorptionsgrad [-] φ = Dissipationsgrad [-] τ = Transmissionsgrad [-]

Der Transmissionsgrad kann über Messverfahren zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes R eines Bauteils ermittelt werden. Das Schalldämm-Maß basiert auf der Schallpegeldifferenz vor und hinter einem trennenden Bauteil. Für die Messung wird in einem Raum mit reflektierenden Seitenwänden ein diffuses Schallfeld erzeugt. In diesem Schallfeld kann daher ein örtlich konstanter Schalldruckpegel angenommen werden. Ist der Schalldruckpegel bekannt als

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2}\right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Formel 6}$$

mit

L_p = Schalldruckpegel [dB]

\tilde{p} = Schalldruck [N/m²]

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Bezugsschalldruck [N/m²]

mit den Schalldruck-Effektivwerten \tilde{p} und dem Bezugsschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m², dann kann durch das Umstellen der Formel 4 das Schalldruckquadrat \tilde{p}^2 zu

$$\tilde{p}^2 = p_0^2 \cdot 10^{L/10} \quad [\text{N/m}^2] \quad \text{Formel 7}$$

berechnet werden. Mit dem nun bekannten Schalldruck des Raumes wird es möglich, die Schallenergiedichte E im Raum zu berechnen. Unter der Annahme eines gleichmäßigen Schalleinfalls aus allen Raumrichtungen im diffusen Schallfeld wird die Schallschnelle im örtlichen und zeitlichen Mittel zu Null. Daraus folgt für die Schallenergiedichte E :

$$E = \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 \cdot c_0^2} \quad [\text{J/m}^3] \quad \text{Formel 8}$$

mit

E = Schallenergiedichte [J/m³]

ρ_0 = Dichte von Luft [kg/m³]

c_0 = Schallgeschwindigkeit in Luft [m/s]

Die notwendigen Konstanten in Formel 8 sind die Dichte ρ_0 und die Schallgeschwindigkeit c_0 der Luft. Ist eine stationäre Schallanregung im Raum durch ein diffuses Schallfeld gegeben, kann über die Energiedichte die auf ein Bauteil der Fläche S auftreffende Schallleistung P_S (Index „S“: Senderraum, Index „E“: Empfangsraum) bestimmt werden. Dies erfolgt durch die Integration der einzelnen Schallleistungen über die Fläche S des Bauteils. Es gilt

$$P_S = \frac{\tilde{p}_S^2 \cdot S_S}{4\rho_0 c_0} = \frac{E \cdot c_0 \cdot S_S}{4} \quad [\text{W}] \quad \text{Formel 9}$$

mit

P_S = auftreffende Schallleistung im Senderraum [W]

\tilde{p}_S = Schalldruck Senderraum [N/m²]

S_S = Bauteilfläche Senderraum [m²]

Der zweite Teil der Formel 9 ergibt sich durch das Einsetzen von Formel 8 nach Umstellen nach \tilde{p}^2 . Die auf der Rückseite des Bauteils abstrahlende Schallleistung P_E kann berechnet werden als

$$P_E = \frac{\tilde{p}_E^2 \cdot A_{eq}}{4\rho_0 c_0} \quad [W] \quad \text{Formel 10}$$

mit

P_E = abgegebene Schalleistung im Empfangsraum [W]

\tilde{p}_E = Schalldruck Empfangsraum [N/m²]

A_{eq} = äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

A_{eq} beschreibt in Formel 10 die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes, der an die Rückseite des Bauteils angrenzt.

Aus dem Verhältnis der auf der Rückseite einer Fläche S_E abstrahlenden Leistung P_E zu der auf einer Fläche S_S auftreffenden Leistung P_S wird der Transmissionsgrad τ mit Formel 11 berechnet. Voraussetzung dabei ist, dass sowohl in dem Raum vor als auch hinter dem Trennbauteil ein diffuses Schallfeld herrscht. Mit dem Kehrwert des Transmissionsgrades des Bauteils wird dann das Schalldämm-Maß R der Konstruktion in Formel 12 definiert.

$$\tau = \frac{P_E}{P_S} \quad [-] \quad \text{Formel 11}$$

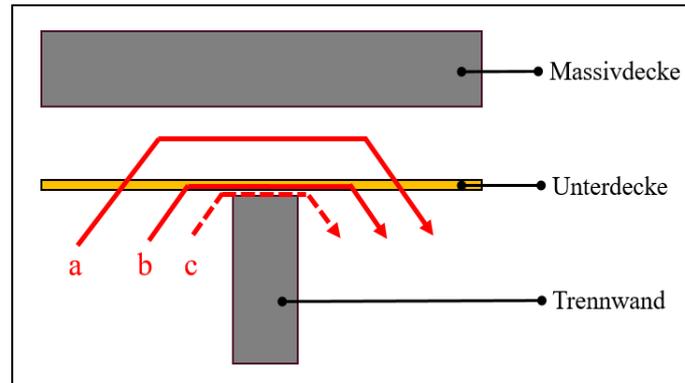
$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad [dB] \quad \text{Formel 12}$$

mit

R = Schalldämm-Maß [dB]

Norm-Flankenschallpegeldifferenz

Unterdecken beeinflussen die Schalllängsleitung zwischen Räumen. Bei einer über ein gesamtes Geschoss ausgedehnten Unterdecke bildet diese das Maß für die Schallübertragung von Raum zu Raum. Die akustische Größe für diese Schallübertragung über flankierende Elemente, wie eine abgehängte Unterdecke, ist die Norm-Flankenschallpegeldifferenz ($D_{n,f}$ bzw. $D_{n,f,w}$ (bewerteter Einzahlwert), [dB]). Je nach Ausprägung und Anforderung an die Raumnutzung kann sie die Privatsphäre, den Arbeitsschutz oder die Aufenthaltsqualität im Allgemeinen empfindlich beeinflussen. Bild 1 zeigt mögliche Wege der Schallübertragung über die abgehängte Unterdecke mit den Flanken a, b und c. An abgehängten Unterdecken, die mehrere Räume über eine Trennwand hinweg verbinden, gelangt der Schall maßgeblich über den Deckenhohlraum in die angrenzenden Einheiten (a). Durch die Schwingungsanregung der abgehängten Unterdecke durch auftreffende Schallwellen gelangt der Schall über das schwingende Bauteil in den benachbarten Raum (b). Bei nicht abgedichtetem Zwischenraum zwischen Unterdecke und Trennwand besteht mit c ebenfalls ein Weg der Schallübertragung.



Quelle: IBP

Bild 1

Skizze des Aufbaus einer abgehängten Unterdecke oberhalb einer nicht bis zur Massiv- / Rohdecke durchgehenden Raumtrennwand. (a) zeigt den Weg des Luftschalls nach seiner Transmission durch die Decke in den Hohlraum (und zurück), (b) die durch Körperschallschwingungen übertragene Schallenergie durch die Unterdecke selbst und (c) die Übertragung durch Undichtigkeiten oberhalb der Trennwand.

Bei der flankierenden Übertragung von Schall zwischen angrenzenden Räumen mit einer Trennwand, die nur bis zur Unterdecke reicht, wird Schall also über den Deckenhohlraum sowie über das Bauteil selbst übertragen. Besonders hervorzuheben ist der Bereich im Deckenhohlraum über der Trennwand, da durch diese Querschnittsebene der gesamte im Deckenhohlraum übertragene Luftschall in den Bereich des Empfangsraums eindringt.

Um das gesamte Übertragungsverhalten zu quantifizieren, wird die frequenzabhängige Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f}$ im Labor in Anlehnung an DIN EN ISO 10848-2 messtechnisch erfasst. Sie ist als Differenz der Schalldruckpegel in Sende- und Empfangsraum definiert. Das Ergebnis wird mit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A_{eq} im Empfangsraum bezogen auf äquivalente Bezugsschallabsorptionsfläche A_0 normiert (siehe Formel 13).

$$D_{n,f} = L_1 - L_2 - 10 \cdot \log\left(\frac{A_{eq}}{A_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Formel 13}$$

mit

L_1 = Schalldruckpegel im Senderraum [dB]

L_2 = Schalldruckpegel im Empfangsraum [dB]

A_{eq} = äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum [m^2]

$A_0 = 10 \text{ m}^2$ = äquivalente Bezugsschallabsorptionsfläche

Auch die Messgröße der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f}$ wird nach DIN EN ISO 717-1 zu einem Einzahlwert $D_{n,f,w}$ zusammengefasst.

Strömungswiderstand

Die Schallabsorption poröser Absorber und die Norm-Flankenschallpegeldifferenz stehen im Zusammenhang mit dem Strömungswiderstand des Materials. Der spezifische Strömungswiderstand R_s ist durch das Verhältnis der Luft-Druckdifferenz vor und hinter dem Material bezogen auf die Geschwindigkeit der durchströmenden Luft definiert (siehe Formel 14).

$$R_s = \frac{\Delta p}{u} \quad [\text{Pa s/m}] \quad \text{Formel 14}$$

mit

Δp = Druckdifferenz vor und hinter dem Material

u = Geschwindigkeit der durchströmenden Luft [m/s]

R_s = spezifischer Strömungswiderstand [Pa s/m]

Bei einem porösen Schallabsorber vor einer schallharten Oberfläche (z. B. Decke oder Wand) lässt sich die Schallabsorption über den Abstand (Abhängehöhe) beeinflussen. Abhängig vom Abstand des porösen Absorbers zu einer schallharten Oberfläche ändert sich die Frequenzlage des Scheitelwertes der Schallabsorption. Je größer die Abhängehöhe gewählt wird, desto höher ist die Absorptionseigenschaft der Unterdecke bei tieferen Frequenzen.

Mit der Multiplikation des längenbezogenen Strömungswiderstandes Ξ mit der Materialdicke d kann der spezifische Strömungswiderstand berechnet werden. Dabei ist das optimale Verhältnis zwischen längenbezogenem Strömungswiderstand und Materialdicke d in Formel 15 [6] für poröse Schallabsorber mit Wandabstand beschrieben.

$$0,8 < R_s = \Xi \cdot d < 2,4 \quad [\text{kPa s/m}] \quad \text{Formel 15}$$

mit

Ξ = längenbezogener Strömungswiderstand [Pa s/m²]

Aus Formel 15 wird ersichtlich, dass die Schichtdicke einen wesentlichen Einfluss auf das Absorptionsverhalten hat. Mit größerer Materialdicke wird die Reibung für große Wellenlängen (tiefe Frequenzen) vergrößert. Die Schallabsorption kann damit also ebenfalls bei tiefen Frequenzen erhöht werden. Um allerdings das optimale Verhältnis zwischen längenbezogenem Strömungswiderstand und Materialdicke (siehe Formel 15) zu wahren, muss für große Schichtdicken der Strömungswiderstand deutlich verringert werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz von porösen Materialien zur Schallabsorption erst ab einer unteren, der optimierten Materialauslegung genügenden, Grenzfrequenz praktisch sinnvoll.

Vor der Einführung des spezifischen Strömungswiderstandes als maßgebende Größe für Schallabsorption poröser Absorber und die Norm-Flankenschallpegeldifferenz ist anzumerken, dass die flächenbezogene Masse m' grundsätzlich das schalldämmende Verhalten eines Bauteils, wie einer Wand, einem Fenster oder einer abgehängten Unterdecke beeinflusst. Allerdings ist die Masse einer abgehängten Unterdecke und die damit erreichbare schalldämmende Wirkung konstruktionsbedingt begrenzt, da das Abhängen bei zu großem Gewicht technisch und praktisch nicht mehr möglich ist. Eine Abstufung anhand des spezifischen Strömungswiderstandes schafft eine Differenzierbarkeit für die Abschätzung beider akustischen Eigenschaften (siehe Abschnitte Schallabsorption und Norm-Flankenschallpegeldifferenz) über die flächenbezogene Masse hinaus. Dies kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Ein optimaler spezifischer Strömungswiderstand (vgl. Formel 15) führt zu einer erhöhten Schallabsorption und einer vergleichsweise geringen Norm-Flankenschallpegeldifferenz (z. B. nicht gepresste Mineralfaser).
- Eine Unterdecke mit einer geringen flächenbezogenen Masse und einem hohen, nicht optimalen spezifischen Strömungswiderstand (vgl. Formel 15) kann zu einer vergleichsweise hohen Norm-Flankenpegeldifferenz führen (z. B. gepresste Mineralfaser).

- Bei einem (nicht messbar) hohen spezifischen Strömungswiderstand einer abgehängten Unterdecke liegt häufig auch eine hohe flächenbezogene Masse vor (z. B. Metallkassetten mit rückseitigem Gipskartonabschluss).

Eine abgehängte Unterdecke mit einem hohen spezifischen Strömungswiderstand zeigt keine Abhängigkeit des Schallabsorptionsgrades zur Abhängehöhe, da kein (kaum) Schall hindurch in den Deckenhohlraum gelangt. Demnach ist eine Abstimmung der Schallabsorption anhand der Abhängehöhe nur dann möglich, wenn der spezifische Strömungswiderstand optimal ausgelegt ist. Dabei entsteht ein Zielkonflikt: die Norm-Flankenschallpegeldifferenz wird reduziert, wenn das Material für Schall durchlässiger ist. Für den praktischen Einsatz ist also eine Kategorisierung basierend auf dem spezifischen Strömungswiderstand eine pragmatische Wahl, die beide akustischen Wirkungsweisen berücksichtigt.

Untersuchungsgegenstand

Im Fokus des Forschungsvorhabens steht ein Messprogramm an verschiedenen Unterdecken und Systemen im Labor, die nach dem Einbau eine Abhängehöhe von mindestens 150 mm aufweisen. Aufgrund der großen Vielfalt auf dem Markt kommt der Auswahl der Prüfobjekte eine zentrale Bedeutung zu. Um eine möglichst praxisorientierte und repräsentative Auswahl treffen zu können, wurden verschiedene Hersteller von Unterdecken bereits in der Vorbereitung hinzugezogen.

Die **Odenwald Faserplattenwerk GmbH** vertreibt seit über 70 Jahren absorbierende abgehängte Decken aus Mineralfaserplatten inklusive Unterkonstruktion aus Eigenproduktion. Die Produkte reichen von geschlossenen Rasterdecken über offene Baffeldecken bis hin zu absorbierenden Einzelelementen.

Die **Fural Systeme in Metall GmbH** stellt seit über 70 Jahren abgehängte Decken aus Metallblech und -kassetten sowie akustisch wirksame abgehängte Unterdecken her. Sie bietet verschiedenste akustisch und raumklimatechnisch optimierte Systeme (Heiz- und Kühldecken).

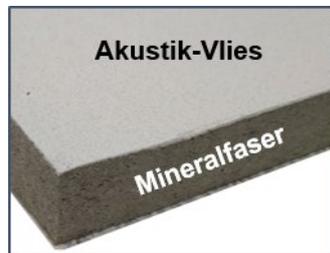
Zusammen decken die Partner einen Großteil der am Markt eingesetzten Deckensysteme ab. Die multifunktionalen Decken vereinen Akustik, Brandschutz, Kühl- und Heiztechnik, Licht, Hygiene und Revisionierbarkeit mit Designvielfalt.

Unterdeckensysteme bestehen nicht selten aus kombinierten, zum Teil porösen Materialien (z. B. gepresste Mineral- oder Holzfasern). Die (kombinierten) Materialien stellen für die auftretenden Schallwellen einen (gesamtheitlichen) Strömungswiderstand dar und beeinflussen so den Schallabsorptionsgrad. Entsprechend der Annahme, dass eine Unterdecke als ein Schallabsorber mit Wand- bzw. Deckenabstand angesehen wird, kann die Schallabsorption im Raum unterhalb der Decke durch die Materialeigenschaften und Abhängehöhe eingestellt werden. Zusätzlich reduziert eine rückseitig schallabsorbierende Unterdecke die Schallübertragung zwischen zwei oder mehreren Räumen bei durchgehender abgehängter Unterdecke.

Für die Untersuchungen wird eine Auswahl an Rasterdecken aus gepresster Faser festgelegt. Sie repräsentieren abgehängte Unterdecken sowohl aus gepresster Mineralfaser als auch Holzfasern. Aus akustischer Sicht sind beide Materialien vergleichbar. Zwei unterschiedliche Ausprägungen des Materials in Bezug auf die Untersuchungsgrößen Schallabsorption und Norm-Flankenschallpegeldifferenz (nach Norm geprüft) geben schließlich Hinweise auf den Einfluss der Abhängehöhe auf die Messergebnisse. Der Einsatz von Mineralfaserdecken ist (zur Zeit der Projektbearbeitung) durch effiziente Produktionsmöglichkeiten wirtschaftlich und weit verbreitet. Vor allem sind sie in Trockenbereichen, Büro- und Geschäftsräumen sowie Schulen verbaut. Dank ihres vergleichbar geringen Gewichts ist nach dem Einbau ein Tausch sowie der Zugang zum Deckenhohlraum leicht möglich. Durch umfassendes Zubehör können die nicht brennbaren Deckenelemente zusätzlich mit visuell ansprechenden Elementen wie Leuchtmittel gestaltet werden.

Die zur Verfügung gestellten (gepressten) Mineralfaserplatten sind unterseitig mit einem Vlies kaschiert. Aus akustischer Sicht handelt es sich hier um poröse Absorber, deren Eigenschaften insbesondere durch die Dicke und den Strömungswiderstand des Materials bestimmt wird. Die insgesamt vier zu untersuchenden Unterdeckentypen aus gepressten Mineralfasern stehen mit 15 mm bzw. 20 mm in zwei Dicken zur Verfügung.

Darüber hinaus werden die Decken nach deren normativ ermittelten akustischen Kenngrößen ausgewählt. Zwei der Unterdecken ermöglichen eine vergleichsweise hohe Schallabsorption, zwei wiederum eine vergleichsweise hohe Norm-Flankenschallpegeldifferenz. Einen beispielhaften Aufbau einer Mineralfaserplatte zeigt Bild 2.



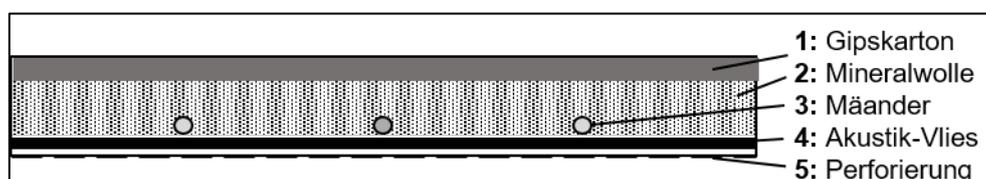
Quelle: IBP

Bild 2

Beispielhafter Aufbau eines Elements einer abgehängten Unterdecke aus zu einer Platte gepresster Mineralfaser mit einem zu Gunsten der Schallabsorption beklebten Akustik-Vlies (Unterseite der Decke).

Unterdecken aus Metallkassetten bilden eine robuste Alternative. Sie bieten gegenüber Mineralfaserdecken den Vorteil, dass eine Reinigung leichter möglich und daher der Einsatz auch in Bereichen mit größeren Anforderungen an die Hygiene, z. B. in Krankenhäusern, verbreitet ist. Durch eine zusätzliche große Auswahl von Formen und Farben sind Metalldecken vielseitig und damit weit verbreitet einsetzbar. Metallkassetten können einen porösen Absorber (z. B. nicht gepresste Mineralwolle) optisch ansprechend verdecken. Um eine absorbierende Wirkung grundsätzlich zu ermöglichen, aber gleichzeitig das schallabsorbierende Material vor schädlichen Einflüssen zu schützen, wird das Metall mit Löchern (oder Schlitzen) versehen. Je nach Dimensionierung der Öffnungen selbst und deren Abstand untereinander ist ein Einfluss auf die schallabsorbierende Wirkung des Deckensystems zu erwarten.

Bei der Untersuchung von Metallkassetten-Systemen wird der Einfluss der Abhängehöhe auf ein aus verschiedenen Materialien kombiniertes Deckensystem herausgestellt. Durch die Perforierung mit Lochmustern, einer dahinterliegenden Mineralwolle und einem speziellen Akustik-Vlies wirkt das Deckensystem schallabsorbierend. Eine Gipskartonplatte bildet den rückseitigen Abschluss, der eine im Vergleich hohe Norm-Flankenschallpegeldifferenz bewirkt. Hervorzuheben ist der Einsatz als Kühl- bzw. Heizdecke (thermische Aktivierung), wobei spezielle Rohrmäander, gefüllt mit Kältemittel, in die Kassetten eingearbeitet werden. Bild 3 skizziert den Aufbau einer Metallkassette im Querschnitt.



Quelle: IBP

Bild 3

Skizze eines typischen Aufbaus einer Metallkassette als Element einer abgehängten Unterdecke. Beginnend auf der Rückseite jeder Kassette folgt eine Einlage aus Mineralwolle einer Gipskartonplatte. Darunter befinden sich ggf. Rohrmäander für eine thermische Aktivierung sowie ein Akustik-Vlies, welches auf die gelochte Unterseite der Metallkassette geklebt ist.

Für das Forschungsprojekt stehen zwei unterschiedlich perforierte Metallkassetten jeweils mit und ohne Rohrmäander zur thermischen Aktivierung zwischen Akustikvlies und Mineralwolle zur Verfügung. Bei der Untersuchung der Kassetten wird der Einfluss der integrierten Rohrmäander als thermische Aktivierung dokumentiert. Bild 4 zeigt die auf dem Akustik-Vlies verklebten Rohrmäander zur thermischen Aktivierung innerhalb eines Kassettenelements.



Quelle: IBP

Bild 4

Unterseite einer Metallkassette mit auf das Akustik-Vlies geklebten Rohrmäander von innen abgebildet.

Insgesamt wird darauf geachtet, dass die Deckensysteme eine hohe Praxisrelevanz darstellen und entsprechend häufig verbaut werden. Tabelle 1 zeigt die bereitgestellten Deckensysteme mit relevanten Materialeigenschaften in einer Übersicht.

Tabelle 1

Übersicht über die untersuchten Unterdecken, ihre Maße und Eigenschaften. Insgesamt sind alle acht untersuchten Unterdecken aufgeführt. Hervorgehoben werden je zwei aus Mineralfaserplatten und Metallkassetten.

#	Bezeichnung	Maße l x b x d [mm]	Perforiert Durchmesser Lochanteil	R_s gemessen [kPa s/m]	α_w lt. Hersteller bei 200 mm	$D_{n,f,w}$ lt. Hersteller bei 700 mm	Anm.
1	Mineralfaserplatte A	1.244 x 619 x 20	Keine (Akustik-Vlies)	> 12,0	0,70	40 dB	/
2	Mineralfaserplatte B	1.244 x 619 x 15	Keine (Akustik-Vlies)	≈ 1,2	0,85	24 dB	Rückseite schallabsorbierend
3	Mineralfaserplatte C	1.244 x 619 x 20	Keine (Akustik-Vlies)	≈ 2,8	0,90	28 dB	/
4	Mineralfaserplatte D	1.244 x 619 x 15	Keine (Akustik-Vlies)	≈ 1,5	0,90	24 dB	Rückseite schallabsorbierend
5	Metallkassette A	1.449 x 569 x 50	0,7 mm 4 %	>> 12,0	0,75	56 dB	/
6	Metallkassette B	1.449 x 569 x 50	0,7 mm 4 %	>> 12,0	0,75	56 dB	Thermisch aktiviert
7	Metallkassette C	1.449 x 569 x 50	2,5 mm 16 %	≈ 12,0	0,80	56 dB	/

		Maße	Perforiert	R_s	α_w	$D_{n,f,w}$	Anm.
8	Metall-kassette D	1.449 x 569 x 50	2,5 mm 16 %	$\approx 12,0$	0,80	56 dB	Thermisch aktiviert

Anzumerken ist, dass während der Projektbearbeitung ein Industriepartner die Bereitstellung von gelochten Gipsplatten nicht wie geplant ermöglichen konnte. Hier wird bei der Zusammenführung der Messergebnisse auf Archivmessungen der bauakustischen Prüfstelle am IBP zurückgegriffen. Damit stehen für einen Vergleich sowie für die Validierung von Berechnungsergebnissen Messergebnisse von Unterdecken aus gepresster Holzwole und gelochter Gipskartonelementen zur Verfügung. So wird insgesamt eine repräsentative Ausprägung von abgehängten Unterdecken-Systemen untersucht.

Stand der Forschung/Baupraxis

Die Norm-Flankenschallpegeldifferenz und die Schallabsorption wird in speziellen Akustiklaboren nach vorgegebenen Mess-Normen bestimmt. Allerdings ist die dabei jeweils anzusetzende Abhängöhe unterschiedlich: nach DIN EN ISO 10848-2 beträgt die Abhängöhe für die Ermittlung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz 700 mm bis 800 mm, aber die Schallabsorption von Unterdecken wird nach DIN EN ISO 354 bei 200 mm bzw. 400 mm gemessen. Bisher gibt es keine systematischen Untersuchungen darüber, wie sich die Abhängöhe der beiden Labormessverfahren auf die akustischen Eigenschaften der Decke auswirkt, und ob bzw. wie diese sich auf die tatsächlich realisierte Abhänghöhen am Bau umrechnen lassen. Die aktuellen Norm-Prüfwerte für die Akustik abgehängter Unterdecken erlauben also zu diesem Zeitpunkt lediglich eine relative Vergleichbarkeit der Produkte untereinander.

Aus Prüfungsergebnissen und früheren Forschungsvorhaben [7–9] ist bekannt, dass der Einfluss der Abhänghöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz je nach Deckenkonstruktion bei Variation um nur 50 mm bis 100 mm bis ca. 5 dB betragen kann. Allerdings beschränken sich alle vorhandenen Messdaten auf Abhänghöhen der Norm-Vorgabe für die Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz (400 mm bis 1.000 mm). Bislang ebenfalls unbekannt ist die Eigenschaft des Schallfeldes im Deckenhohlraum und der Einfluss des Messaufbaus auf die Messungen des Schallabsorptionsgrades im Hallraum. Aus diesem Grund ist mit gegenwärtigen Kenntnissen eine Abschätzung der schallschutztechnischen Wirksamkeit einer Unterdecke in der Praxis nur mit Einschränkung möglich.

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Nach DIN EN ISO 10848-2 soll die Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Labor bei einer Abhänghöhe von 700 mm bis 800 mm ermittelt werden. Die Schallabsorption von Unterdecken wird nach DIN EN ISO 354 standardmäßig mit 200 mm bzw. 400 mm Abhänghöhe im Hallraum mit umlaufendem Holzrahmen gemessen. In der Praxis liegen bei Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze jedoch meist geringere Geschosshöhen mit Abhänghöhen von 150 mm bis 300 mm vor. Die Laborwerte werden von Planern auch für Prognosen abweichender Abhänghöhen verwendet, wodurch sich am Bau ein erhöhtes Risiko für Schallschutzmängel ergibt.

Es wird vermutet, dass das Schallfeld im Hohlraum sich bei Verringerung der Deckenhöhe zunehmend von einem diffusen zu einem Schallfeld mit Kanalcharakteristik ändert, was einen zusätzlichen Einfluss auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz zur Folge hätte. Ein Überblick über die bislang vorgeschlagenen Ansätze zur rechnerischen Behandlung ist in [10] gegeben. Demnach liegt laut der Theorie von MARINER [11] das Problem der Ausbreitungsrechnung bei der Bestimmung des Schalltransmissionsgrades einer Unterdecke. Trotz der Eleganz der Theorie ist eine Anwendung noch nicht gelungen. Die stark vereinfachten Zusammenhänge zu den deutlich unterschiedlichen sende- und empfangsseitigen Transmissionsgraden bei

GÖSELE [12] führen zu beträchtlichen Abweichungen. Beide Modelle können den Einfluss der Abhängöhe nicht voraussagen. MECHEL schlägt in [10] eine deutlich weitergehende Modellierung vor, die das Stehwellenfeld sendeseitig sowie die Ausbreitung mit Methoden der Kanalakustik und die Transmission bei überwiegend streifendem Einfall berücksichtigt.

Da durch die Unsicherheiten Schallschutzmängel entstehen können, werden zunehmend weniger durchgehende Unterdecken realisiert. Dies geschieht, obwohl sie von vielen Bau-Auftraggebern und Architekten bevorzugt werden, da sie die flexibelste und günstigste Lösung im Objektbereich sind. So kann z. B. bei einer durchgehenden abgehängten Unterdecke die Aufteilung der Räume in einem Geschoss nachträglich ohne größeren Aufwand geändert werden. Der durch die Forschungslücke entstehende negative Einfluss auf die Nutzbarkeit der Gebäude wirkt sich ungünstig auf die Nachhaltigkeit, die Bauqualität und die Aufenthaltsqualität aus. Besonders in Büro- und Schulgebäuden werden abgehängte Unterdecken eingesetzt und beeinflussen in starkem Maße die Raumakustik sowie die Schalldämmung zwischen Räumen.

Zielstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist eine verbesserte Prognose für die standardmäßigen Einbaufälle zu ermöglichen und damit Herstellern und Bauherren sicheres Einhalten der gestellten Anforderungen an die Norm-Flankenschallpegeldifferenz und die Schallabsorption im Rahmen der Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Aufbauend auf einer Messreihe an häufig eingesetzten Typen von Unterdecken wird ein Rechenmodell und ein Leitfaden entwickelt, mit denen die Prüfstandswerte für die üblichen Verhältnisse am Bau eingeordnet werden können. Davon profitieren die Planer durch erhöhte Planungssicherheit sowie die Hersteller bei der zielgerichteten Entwicklung akustisch optimierter Produkte.

Konkrete Projektziele

Die konkreten Ziele können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Messergebnisse zum Einfluss der Abhängehöhe auf die Schalllängsleitung abgehängter Unterdecken liegen vor und der Einfluss der Abhängehöhe auf die Schalllängsleitung abgehängter Unterdecken ist bekannt – insbesondere auch bei Abhängehöhen von 150 mm bis 400 mm.
2. Messergebnisse zum Einfluss der Abhängehöhe auf den Schallabsorptionsgrad abgehängter Unterdecken liegen vor und der Einfluss der Abhängehöhe auf den Schallabsorptionsgrad abgehängter Unterdecken ist bekannt – insbesondere auch bei Abhängehöhen von 700 mm bis 800 mm.
3. Die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Abhängehöhe, der Schalllängsleitung und dem Schallabsorptionsgrad werden aus den Messergebnissen herausgearbeitet und ein rechnerisches Prognosemodell wird erstellt.
4. Das Prognoseprogramm wird validiert und ein Benutzerleitfaden erstellt.
5. Die Ergebnisse werden in einem Bericht dokumentiert und u. a. auf den Bauforschungstagen vorgestellt.

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Abgehängte Unterdecken werden in vielen öffentlichen Bürogebäuden wie Bürgerbüros und Landratsämtern, aber auch in Schulgebäuden und Klassenzimmern eingesetzt. Sie beeinflussen in starkem Maße die Raumakustik sowie die Schalldämmung zwischen einzelnen Arbeitsbereichen. Defizite in der Raumakustik reduzieren die Sprachverständlichkeit und Defizite in der Schalldämmung verstärken Störgeräusche. Letzteres kann zu einer verstärkten Sprachübertragung zwischen Räumen führen, was wiederum die Privatsphäre reduziert. Vor allem Personen mit sprachlichen Nachteilen z. B. durch Migrationshintergründe, aber auch Lernende mit Hörproblemen profitieren besonders von einer guten Akustik im Klassenraum. Mit den Forschungsergebnissen können nicht nur Baukosten reduziert werden. Es kann darüber hinaus mit der gewonnenen Flexibilität auch der Wert und die Nachhaltigkeit von Büroimmobilien gesteigert werden. Eine durchgehende abgehängte Unterdecke begünstigt eine flexiblere Raumnutzung nachhaltig (z. B. für verschiedene Raumnutzungen und (Miet-)Parteien). So kann bei einer durchgehenden abgehängten Unterdecke die Aufteilung der Räume in einem Geschoss nachträglich ohne größeren Aufwand geändert werden.

Forschungsdesign

Für das Forschungsvorhaben wird der Einfluss der Abhängehöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz sowie die Schallabsorption bei unterschiedlichen Abhängehöhen gemessen. Anschließend wird auf Basis dieser Messumfänge ein Prognosemodell entwickelt und mit den Messergebnissen validiert.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Sowohl für die Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz als auch für die Messung der Schallabsorption sind spezielle Labor-Prüfräume notwendig. Das Fraunhofer IBP verfügt am Standort Stuttgart über beide Labor-Prüfräume sowie geeignetes Personal und Messequipment. Es betreibt darüber hinaus ein akkreditiertes Prüflabor, in dem entsprechende Prüfungen für Hersteller (u. a.) von Deckensystemen durchgeführt werden. Der Unterdeckenprüfstand des IBP eignet sich hierfür besonders, da durch eine bewegliche Betondecke verschiedene Abhängehöhen eingestellt und gemessen werden können, ohne dass die abgehängte Unterdecke (Prüfobjekt) dafür umgebaut werden muss. Dadurch können sämtliche Toleranzen, die durch Material und Montage entstehen, bei einem Vergleich zweier Abhängehöhen ausgeschlossen werden.

Die Gesamtorganisation der Projektbearbeitung wird vom Fraunhofer IBP übernommen. Die Projektbeteiligten werden vom IBP in das Projekt eingebunden und neben den Meilensteinbesprechungen auch während der Bearbeitung des Projekts bei Fragen hinzugezogen und zur Leistung ihrer Unterstützung angefragt. Die Aufgaben der Industriepartner sind vor allem die Auswahl, Lieferung und Montage der Deckensysteme. Das Fraunhofer IBP wird darüber hinaus maßgebend an der Durchführung der Messungen, deren Auswertung, der Erstellung des Prognosemodells und der Berichtslegung beteiligt sein.

Forschungsfragen und methodischer Ansatz

Aus dem aktuellen Stand der Forschung sowie dem Stand der Prüftechnik können folgende drei konkrete Forschungsfragen abgeleitet werden:

1. Welchen Einfluss hat die Abhängehöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz (Schalllängsleitung) abgehängter Unterdecken, insbesondere bei Abhängehöhen von 150 mm bis 400 mm – wie sie beim Normverfahren zur Ermittlung der Schallabsorption üblich sind?
2. Welchen Einfluss hat die Abhängehöhe auf die Schallabsorption abgehängter Unterdecken, insbesondere bei Abhängehöhen von 700 mm bis 800 mm – wie sie beim Normverfahren zur Ermittlung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz üblich sind?
3. Lassen sich aus den Messungen physikalische Zusammenhänge ableiten, mit deren Hilfe Prognosemodelle erstellt werden können?

Die Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz werden nach DIN EN ISO 10848-2 im Unterdeckenprüfstand und die Messungen der Schallabsorption nach DIN EN ISO 354 im Hallraum des Fraunhofer IBP durchgeführt, wobei die Abhängehöhen systematisch über die Norm-Angaben hinaus von 150 mm bis 800 mm variiert werden. Bereitstellung und Montage der Prüfobjekte erfolgen durch die Industriepartner.

Parallel zu den Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz wird das Schallfeld im Deckenhohlraum abgetastet, um die Mechanismen der Schallübertragung zu analysieren. Dieser Schritt ist für die Ableitung von Prognoseansätzen essenziell. Angestrebt wird eine Modellierung, welche die Einflüsse der Abhängehöhe, Hohlraumbedämpfung und Schallabsorption der Deckenplatte abbildet. Dadurch wird das abschließende empirische Ableiten einfacher Formeln von einer validen physikalischen Basis aus ermöglicht.

Das Forschungsvorhaben gliedert sich im Wesentlichen in folgende Arbeitspakete (AP) und Meilensteine (ML):

AP 1:

Literaturrecherche, Voruntersuchung, Versuchsplanung und Auswahl der Prüfaufbauten mit Hilfe der Industriepartner. Untersucht werden sollen dabei jeweils zwei bis drei Rasterdecken mit Mineralfaserplatten und rasterlose Decken aus gelochten oder homogenen Gipsplatten sowie Kühldecken aus Metallkassetten.

AP 2:

Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz und des Schallabsorptionsgrades der Unterdecken im Labor. In Summe ca. jeweils 50 Messungen im Unterdeckenprüfstand sowie im Hallraum. Zusätzlich wird das Schallfeld im Deckenhohlraum abgetastet, um die Mechanismen der Schallübertragung zu analysieren (Unterdeckenprüfstand), und der Einfluss des Kanteneffekts durch den Rahmen untersucht (Hallraum).

ML 1:

Auswertung und Besprechung der Messergebnisse bzw. der Datenqualität in Form eines Arbeitstreffens.

AP 3:

Ausgehend von dem Vorschlag in [10] wird eine rechnerische Modellierung der Schallübertragung erarbeitet, implementiert und anhand der Messungen aus AP2 validiert. Neben der deutlich unterschiedlichen sende- und empfangsseitigen Transmission wird die Übertragung im Deckenhohlraum im dreidimensionalen Fall beschrieben. Der Einfluss des Kanteneffekts bei der Messung des Schallabsorptionsgrads bei großen Abhängehöhen im Hallraum wird mit einem Rechenverfahren für ebene Impedanzsprünge über die Strahlungsimpedanz der Prüffläche [13] abgeglichen. Abschließend werden für die relevanten Abhängehöhen und Bedämpfungen einfache Formeln zur Übertragung der Prüfstandswerte auf reale Bauten empirisch abgeleitet und als Rechentool (Excel) zur Verfügung gestellt.

ML 2:

Auswertung und Besprechung der Berechnungsergebnisse und Ergebnisqualität in Form eines Arbeitstreffens.

AP 4:

Neben der geforderten Berichtslegung wird ein verständlicher Leitfaden für Hersteller und Anbieter erarbeitet. Darüber hinaus werden für das Rechentool eine Dokumentation und ein Tutorial zur schnellen Einarbeitung erstellt.

Ziel- und Erfolgskriterien

Für das Vorhaben werden messbare Ziel- bzw. Erfolgskriterien festgelegt und im Folgenden diskutiert. Mit Hilfe einer Voruntersuchung wird der Einfluss der Abhängehöhe auf die akustischen Eigenschaften einer Decke festgestellt. Der Schwerpunkt der Voruntersuchungen liegt zunächst auf der Erarbeitung von Messaufbauten im Unterdeckenprüfstand und im Hallraum am Fraunhofer IBP. Dazu werden Konzepte entwickelt, mit denen der Einfluss der Abhängehöhe über die Angaben der Norm hinaus realisiert werden können. Zusätzlich werden Messkonzepte erarbeitet, die den Schalleintrag in den Deckenhohlraum messen. Darauf aufbauend wird eine Auswahl von Deckensystemen festgelegt.

Die getroffene Auswahl der abgehängten Unterdecken wird in Abschnitt Untersuchungsgegenstand beschrieben. Auf Grund ihrer Kombination und Zusammensetzung wird von einer repräsentativen Auswahl ausgegangen. Nach dem Ausfall eines weiteren Industriepartners, der Deckensysteme aus Gipskartonplatten (u. a. mit rückseitiger Schallabsorption) zunächst zugesagt hatte, bestand die Herausforderung mit den bestehenden Projektpartnern geeignete Kompromisse zu finden. Die Metallkassetten mit einer Gipskartonplatte als rückseitiger Abschluss stellt dabei eine für die untersuchten akustischen Größen vergleichbare Materialauswahl dar. Die **Odenwald Faserplattenwerk GmbH** konnte zusätzliche Unterdecken mit rückseitiger Schallabsorption zur Verfügung stellen. Außerdem wurde auf Messergebnisse der Bauakustischen Prüfstelle am IBP zurückgegriffen. Die Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse ist nach

Ansicht der Forschenden mit diesem Kompromiss nicht beeinträchtigt, sodass die Forschungsziele weiterhin erreicht werden.

Nach der Konzeption und Realisierung der Messaufbauten sowie der Auswahl der Deckensysteme kann schließlich der Einfluss auf die akustischen Eigenschaften grundsätzlich ermittelt werden. Die Lieferung und Montage der zugesagten Deckensysteme selbst (mit der beschriebenen Ausnahme) konnte ohne Beeinträchtigung durchgeführt werden. Die Voruntersuchungen zeigen allerdings, dass die Messung des Schalleintrages in den Deckenhohlraum eingeschränkt werden muss. Auf Grund der umfangreich verbauten Mikrofontechnik im Zusammenhang mit den im Unterdeckenprüfstand zum Abhängen der Unterdecke notwendigen Metalltraversen können die Messungen bei Abhängehöhen im Unterdeckenprüfstand erst ab 300 mm und im Hallraum ab 200 mm bis 800 mm realisiert werden. Für beide Labore stellt dies jedoch eine erhebliche Erweiterung der jeweils zur Prüfung vorgesehenen Abhängehöhen dar. Der Mehrwert der Vergleichbarkeit der Messergebnisse durch die vereinheitlichten Abhängehöhen aller untersuchten Unterdecken ist ausschlaggebend, weshalb die Forschungsziele weiterhin erreicht werden.

Wie im Abschnitt Forschungslücke/Entwicklungsbedarf bereits diskutiert, besteht ein wesentlicher Teil des vorgestellten Vorhabens in der Entwicklung und Validierung von Rechenmodellen (AP 3). Deren Aufgabe ist es, die nach Norm erhobenen Prüfstandswerte auf die üblichen Abhängehöhen am Bau umrechnen zu können. Während der Projektlaufzeit konnten die Eingangsdaten für die zunächst angesetzten Berechnungstheorien (nach MARINER und MECHEL) nicht in der notwendigen und ausreichenden Qualität ermittelt werden. Dies betrifft insbesondere den Transmissionsgrad. Daher haben die Forschenden ein empirisches Prognosemodell entwickelt. Eine Validierung bestätigt schließlich die Prognosen und damit das Ziel dieses Rechenmodells, Planer durch eine erhöhte Planungssicherheit und Hersteller bei der Entwicklung akustisch optimierter Produkte zu unterstützen. Letzteres gelingt durch die Vorhersage der akustischen Wirkung bei nicht Norm-konformen Abhängehöhen bereits während der Entwicklung. Der vorliegende Abschlussbericht beinhaltet schließlich einen Leitfaden sowie eine Anleitung für ein Excel-basiertes, digitales Prognosewerkzeug. Damit werden aus Sicht der Forschenden alle messbaren Ziel- und Erfolgskriterien erreicht bzw. eingehalten.

Messtechnische Untersuchung

Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke

Die Messungen der Schallabsorption wird in Anlehnung an DIN EN ISO 354 [2] im Hallraum (diffuses Schallfeld) des Fraunhofer IBP durchgeführt. Bild 5 zeigt den Hallraum. Er verfügt über eine Grundfläche von $S_H = 60 \text{ m}^2$ und ein Volumen von $V = 392 \text{ m}^3$. Zu sehen sind die für diese Labore charakteristischen Diffusoren (in Gelb), die von der Decke hängen. Damit wird über zahlreiche Mehrfachreflexionen ein diffuses Schallfeld mit (näherungsweise) gleicher Schalldruckpegelverteilung im Raum erzeugt.



Quelle: IBP

Bild 5

Hallraum am Fraunhofer IBP ($S_H = 60 \text{ m}^2$, $V = 392 \text{ m}^3$) mit charakteristischen Diffusoren in Gelb.

Im Hallraum wird die Schallabsorption der Deckensysteme bei unterschiedlichen Abhängehöhen gemessen. Dazu werden die Unterdecken nicht von der Decke des Labors abgehängt. Sie werden stattdessen umgekehrt mit einem Abstand, der der jeweils vorgesehenen Abhängehöhe entspricht, auf dem Boden des Hallraums aufgebaut. Dazu wird eine normgerechte Prüffläche von $S = 12 \text{ m}^2$ festgelegt. Für die Einstellung der Abhängehöhe als Aufbauhöhe über dem Boden werden Kanthölzer mit quadratischem Querschnitt bei einer Kantenlänge von $l = 10 \text{ cm}$ verwendet. Damit werden acht umlaufende Holzrahmen mit jeweils 10 cm Höhe zusammengestellt, in denen jede Unterdecke für die Messung eingelegt wird. So kann schrittweise eine Aufbauhöhe von 800 mm erreicht werden. In den obersten Rahmen wird das Prüfobjekt, die Unterdecke, in ein Schienensystem eingelegt. Sie bildet eine Ebene mit der Oberkante des Holzrahmens. Bild 6 zeigt den Aufbau mit 800 mm Höhe.



Quelle: IBP

Bild 6

Beispielhafter Messaufbau im Hallraum zur Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke bei einer Abhängehöhe von 800 mm. Aufgestellt werden dazu 8 Holzrahmen mit einer Kantenlänge von 10 cm und einer begrenzenden Probenfläche von 12 m² (3 m x 4 m). In den obersten Rahmen wird das Prüfobjekt, die Unterdecke, in ein Schienensystem eingelegt. Sie bildet eine Ebene mit dem obersten Holzrahmen.

Da die Deckensysteme aus einzelnen Elementen mit einheitlichen Maßen (siehe Tabelle 1) bestehen, ist ein Zuschnitt für die Prüffläche (3 m · 4 m = S = 12 m²) notwendig. Außerdem wird durch Holzstützen unter den Elementen eine plane Fläche sichergestellt. Bild 7 zeigt diese Konstruktion beispielhaft.



Quelle: IBP

Bild 7

Unterkonstruktion des Messaufbaus im Hallraum zur Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke. Für eine vollflächige Abstützung der einzelnen Deckenelemente werden Holzstützen positioniert. Zusätzlich ist der Aufbau für die Schalldruckpegelmessung durch an Führungsleinen (Weiß) befestigten Mikrofonen im Deckenhohlraum abgebildet.

Auf Bild 6 und Bild 7 sind Abweichungen zu den Vorgaben an den Messaufbau nach DIN EN ISO 354 zu erkennen. Dazu gehören konkret mögliche schalldurchlässige Öffnungen (durch die gestapelten Kanthölzer des Holzrahmens), die Dicke der Rahmenelemente sowie die Abhängehöhen selbst. Letztere sind mit 200 mm und 400 mm in der Praxis (und zur Prüfung am IBP) üblich. Entsprechend der Projektziele werden mit dem Aufbau weitere Aufbauhöhen ermöglicht.

Mit dem vorgestellten Messaufbau ist zu erwarten, dass auch der Aufbau selbst einen Einfluss auf die Messergebnisse haben wird – gerade bei Aufbauhöhen größer als 400 mm. Folgende mögliche Einflüsse des Messaufbaus auf die Messergebnisse werden aus diesem Grund untersucht:

- Die innere Aufteilung des Messaufbaus (Rahmenfugen) ist abhängig von der Aufbauhöhe, da sich die Anzahl der beim Stapeln der Rahmen entstehenden Fugen verändert.
- Das Hallraumvolumen wird durch den Messaufbau in Abhängigkeit der Aufbauhöhe verringert.

- Der Schallabsorptionsgrad des Holzes hat einen Einfluss auf die Messergebnisse und ist durch die jeweils unterschiedliche schallabsorbierende Fläche abhängig von der Aufbauhöhe.
- Beugungs- und Kanteneffekte des Holzrahmens haben abhängig von der Aufbauhöhe einen Einfluss auf die Messergebnisse.

Zusätzlich wird der Einfluss der Rahmendicke (10 cm) mit einem Vergleich zu dünneren Rahmen mit einer Dicke von ca. 2,5 cm untersucht. Tabelle 2 zeigt in einer Übersicht die Ergebnisse, aus denen sich weitere Modifikationen für die Untersuchungen bzw. Auswertungen im Forschungsprojekt ableiten:

Tabelle 2

Übersicht möglicher sowie belegter Einflussfaktoren des Messaufbaus auf die Messergebnisse sowie abgeleitete Modifikationen.

Möglicher Einfluss	Abhängig von Aufbauhöhe	Untersucht durch	Ergebnis	Abgeleitete Modifikation
Innere Aufteilung des Messaufbaus (Rahmenfugen)	Ja	Abkleben der Fugen mit Klebeband	Unterschied mit und ohne Abkleben nicht nachgewiesen	Um den Einfluss größerer Fugenbildung zu vermeiden, wird abgeklebt.
Verringertes Hallraumvolumen	Ja	Berücksichtigung in Auswertung	Einfluss nachgewiesen, aber vernachlässigbar.	Für die Auswertung wird das netto Hallraumvolumen von 293 m ³ angesetzt.
Schallabsorption / Kanteneffekt des Messaufbaus	Ja	Messaufbau ohne Unterdecke	Einfluss nachgewiesen, Vorschlag für Korrektur erarbeitet.	Vorschlag für Korrektur wird berücksichtigt.
Dicke des Messaufbaus (Rahmendicke)	Nein (nur 200 mm Höhe untersucht)	Vergleich mit Standardaufbau	Einfluss nicht nachgewiesen	/

Exkurs: Kanteneffekt

Als ein Teilergebnis kann der Einfluss des Holzrahmens auf die Schallabsorption bewertet werden. Zwei Einflussfaktoren dabei sind der Kanteneffekt und die zusätzliche Schallabsorption des Holzrahmens. Beim Kanteneffekt beeinflusst eine sprunghafte Änderung der Strahlungsimpedanz (akustischer Strahlungswiderstand) der Medien, auf die der Schall auftrifft, den Schallabsorptionsgrad. Diese Änderung des Mediums entsteht bei der Messung der Schallabsorption im Hallraum an den Kanten der Prüffläche (Unterdecke mit Holzrahmen). Dort grenzt das (hoch) schallabsorbierende Material an das Medium Luft direkt an.

Dieser Effekt führt zusammen mit der zusätzlichen Schallabsorption des Holzrahmens zu einer Überschätzung des Gesamtergebnisses. Die Effekte des Holzrahmens können für den vorliegenden Messaufbau abgeschätzt werden, wenn die Schallabsorption des Holzes bei auf dem Boden ausgelegter Fläche im Hallraum gemessen wird (siehe Bild 8).



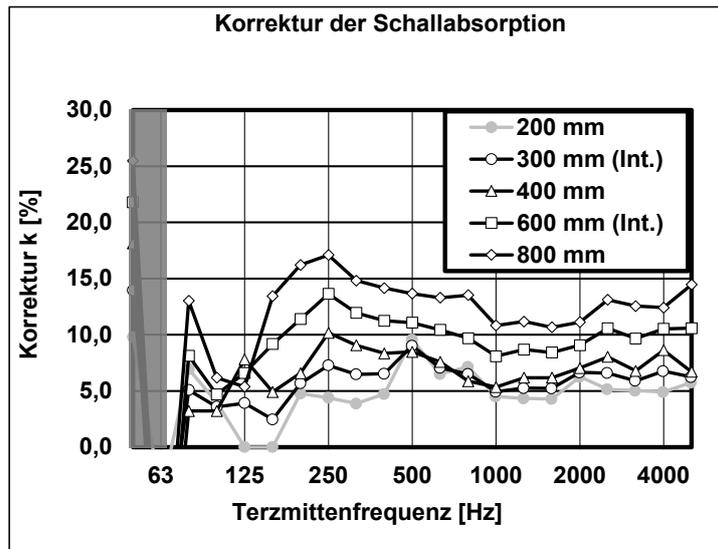
Quelle: IBP

Bild 8

Fläche aus Holz (Rahmenfugen mit Klebeband versiegelt) mit den für den Messaufbau verwendeten Holzrahmen. Die Fläche entspricht der beim Messaufbau von außen sichtbaren Fläche der gestapelten Holzrahmen bei einer Aufbau- bzw. Abhängehöhe von 800 mm. Alle Fugen sind mit Klebeband abgedichtet.

Die Fugen zwischen den einzelnen Kanthölzern werden dazu, wie auch im aufgestellten Messaufbau, mit Klebeband versiegelt, um zusätzliche Schallabsorption durch die Öffnungen zu vermeiden. Bei dieser Untersuchung wird vereinfacht angenommen, dass neben dem Kanteneffekt nur die von außen sichtbare Fläche des Messaufbaus, also die gestapelten Holzrahmen, einen Einfluss auf den gemessenen Schallabsorptionsgrad (mit Unterdecke) hat. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Schall bei seiner Transmission durch das Unterdeckenmaterial bzw. dessen hohen Strömungswiderstand (stark) beeinträchtigt wird. Das akustische Verhalten von Unterdecken mit einem vergleichsweise geringen Strömungswiderstand setzt in diesem Zusammenhang eine Untersuchung mit einer größeren Prüffläche bestehend aus den verwendeten und flächig ausgelegten Kanthölzern voraus. Diese würde auch den inneren Teil des Messaufbaus berücksichtigen, konnte jedoch aus Platzgründen im Hallraum am Fraunhofer IBP nicht realisiert werden. Eine weitere These, die für diesen vereinfachten Messaufbau spricht, ist, dass der Einfluss der zusätzlichen Schallabsorption des Holzes im Deckenhohlraum vernachlässigt werden kann. Diese fällt mit $\alpha_w = 0,1$ eher gering aus. Damit ist Schallabsorptionsgrad des Holzes im Vergleich zum Absorptionsgrad der Unterdecke(n) mit $\alpha_w = 0,1$ deutlich geringer. So ist die Änderung der Impedanz im Vergleich zum gesamten Messaufbau (mit Unterdecke) ebenfalls geringer.

Über das Verhältnis zwischen der äquivalenten Schallabsorptionsfläche des gesamten Messaufbaus und der äquivalenten Schallabsorptionsfläche des flächenmäßig ausgelegten Holzrahmens kann die prozentuale Abweichung durch den Kanteneffekt und die zusätzliche Schallabsorption des Holzes abgeleitet werden. In Abbildung 2 sind diese Abweichungen für ausgewählte Aufbauhöhen zu sehen.



Quelle: IBP

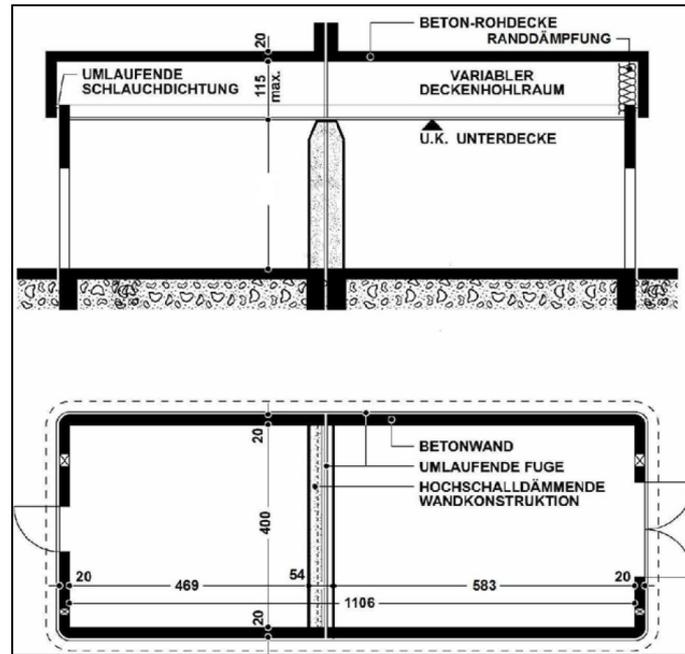
Abbildung 2

Gemessene (und interpolierte) Abweichung des Schallabsorptionsgrades durch die Holzrahmen in % zur Korrektur der Messergebnisse für 200 mm, 300 mm (interpoliert), 400 mm, 600 mm (interpoliert) und 800 mm Aufbau- bzw. Abhängehöhe.

Die Abweichung zeigt den Einfluss des Holzrahmens auf die gemessene Schallabsorption bzw. den Kanteneffekt der Unterdecke an und wird als Korrektur für die Messergebnisse der Schallabsorption genutzt. Eine Allgemeingültigkeit dieser Korrektur kann zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Die Korrektur für die Aufbauhöhen 300 mm und 600 mm wird aus den Messwerten interpoliert. Es fällt auf, dass die Abweichungen mit ansteigender Höhe des Messaufbaus größer werden (bei 800 mm bis zu 17 % bei 250 Hz). Besonders ab einer Aufbauhöhe von 400 mm, die also nicht mehr zu den empfohlenen Aufbauhöhen nach DIN EN ISO 354 zählen, liegen diese im Durchschnitt bei über 7,5 %. Dies kann bei hohen Schallabsorptionsgraden ($\alpha_s > \text{ca. } 0,8$) der Unterdecke eine höhere und überschätzte Einordnung in eine der Schallschutzklassen darstellen. Um auch bei Aufbauhöhen von > 400 mm eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen, werden die Messergebnisse korrigiert. Die Ergebnisdarstellung folgt entsprechend frequenzspezifischer Angabe in $\alpha_{s,k}$. Auf eine Angabe des Korrekturindex „k“ wird im Einzahlwert α_w verzichtet.

Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz einer abgehängten Unterdecke

Die Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz wird im Unterdeckenprüfstand des Fraunhofer IBP durchgeführt. Bild 9 zeigt den Querschnitt und den Grundriss dieses Labors. Es besteht aus zwei Räumen ($V_1 = 55,2 \text{ m}^2$, $V_2 = 72,7 \text{ m}^3$), die durch eine Trennwand getrennt sind. Über die Räume wird eine Unterdecke eingelegt wird (vgl. Bild 10). Damit sichergestellt wird, dass die Schallübertragung über die Trennwand keinen Einfluss auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Unterdecke hat, ist deren Schalldämm-Maß bezogen auf die Prüföffnung mit $R_{\text{max,w}} = 71 \text{ dB}$ besonders hoch.



Quelle: IBP

Bild 9

Grundriss und Ansicht des Unterdeckenprüfstands am IBP mit Maßen der Länge, Breite und Höhe des Prüfstands sowie der Trennwand, der umlaufenden Fuge und der Abhängehöhe.

Die Unterdecke wird von Stahltraversen unterhalb der Beton-Rohdecke des Labors abgehängt und in Metallprofile eingelegt. Bild 10 zeigt die Traversen (mit Dreieck-Struktur) und die Metallprofile in Weiß ohne Deckenelemente.



Quelle: IBP

Bild 10

Innenansicht des Unterdeckenprüfstands am Fraunhofer IBP mit Sicht auf die Trennwand und Traversen (Dreieck-Struktur) zum Abhängen der Unterdecke unterhalb der Rohdecke des Labors.

Die Höhe des Deckenhohlraums, also die Abhängehöhe der Unterdecke, lässt sich stufenlos mit einem Elektromotor von außen zwischen 400 mm und 1150 mm einstellen. Ein- und Ausbau der Untersuchungsobjekte zur Einstellung der zu untersuchenden Abhängehöhen ist daher nicht notwendig. Bild 11 zeigt die von außen einstellbare Höhe der Prüfstandsdecke.



Quelle: IBP

Bild 11

Von außen über einen Elektromotor verfahrbare Prüfstandsrohdecke zur stufenlosen Einstellung der Abhängehöhe.

Messung der Schalltransmission einer abgehängten Unterdecke

Bei den folgenden Untersuchungen zur Bestimmung der Schalltransmission der Unterdecken, werden für die Messung des Schalleintrags in den Deckenhohlraum Mikrofone positioniert. Deren Abstand bleibt jeweils zur Unterseite (im Unterdeckenprüfstand und Praxisaufbau) bzw. Oberseite der Unterdecke (im Hallraum) für alle Abhängehöhen konstant. Während der Messung des Schallabsorptionsgrades im Hallraum messen zwei ortsfest installierte Mikrofone den Schalldruckpegel. Da die Aufbauhöhe der Messtechnik berücksichtigt werden muss, kann eine minimale Aufbauhöhe von 300 mm im Hallraum realisiert werden. Eine normgerechte Aufbauhöhe wird ohne diese zusätzliche Messtechnik und zur Validierung der Herstellerangaben zur Schallabsorption bei 200 mm durchgeführt.

Für die zusätzliche Messung des Schalleintrags in den Deckenhohlraum wird für die Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz eine Reihe (Array) von 9 Mikrofonen in einem Abstand von einem Meter zueinander installiert. Der entwickelte Messaufbau sieht vor, dass die Mikrofone in Längsrichtung verschoben werden können. Damit wird der Schalleintrag im Deckenhohlraum an insgesamt 36 Mikrofonpositionen äquidistant in 25 cm Schritten über nahezu die gesamte Länge des Prüfstands von ca. 11 m hinweg gemessen. Eine Schallquelle beschallt währenddessen den Senderraum konstant mit einem Rosa-Rauschsignal. Bild 12 zeigt das Mikrofonarray im Unterdeckenprüfstand des IBP (ohne eingebaute Unterdecke).



Quelle: IBP

Bild 12

Mikrofonarray zur Messung des Schalldruckpegels im Deckenhohlraum transmittiert durch die Unterdecke. Der Schalleintrag im Deckenhohlraum wird damit an insgesamt 36 Mikrofonpositionen äquidistant über die gesamte Länge des Prüfstands von 11 m hinweg gemessen, während eine Schallquelle den Senderaum beschallt.

Abweichend zur Beschreibung des Forschungsvorhabens ist festzustellen, dass die minimale Aufbauhöhe von 150 mm mit dem entwickelten Messaufbau zur Abtastung des Schallfeldes im Deckenhohlraum in beiden Laboren nicht erreicht wird. Es wird in beiden Laboren eine Schnittmenge der Abhängenöhe von 300 mm bis 800 mm realisiert. Es ist davon auszugehen, dass bereits dieser, hinsichtlich der Abhängenöhe vergleichbare, Messumfang ausreichend aussagekräftige Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen liefert.

Aus den bisherigen Untersuchungen von MARINER und den Modifikationen durch MECHEL [7, 11, 14] ist bekannt, dass der Transmissionsgrad in einem Wandprüfstand ermittelt werden sollte. Hintergrund ist dabei die Vorgabe, die Messung in einem vor- und hinter dem Bauteil diffusen Schallfeld durchzuführen. In Anlehnung an diese Idee von MECHEL wird der Schalltransmissionsgrad zusätzlich in einem Fensterprüfstand am IBP mit einem Unterdeckenelement (Mineralfaserplatte) ermittelt. Bild 13 zeigt beispielhaft den Aufbau zur Messung des Schalldämm-Maßes im Fensterprüfstand, aus dem nach Umstellen der Formel 12 der Transmissionsgrad ermittelt wird.



Quelle: IBP

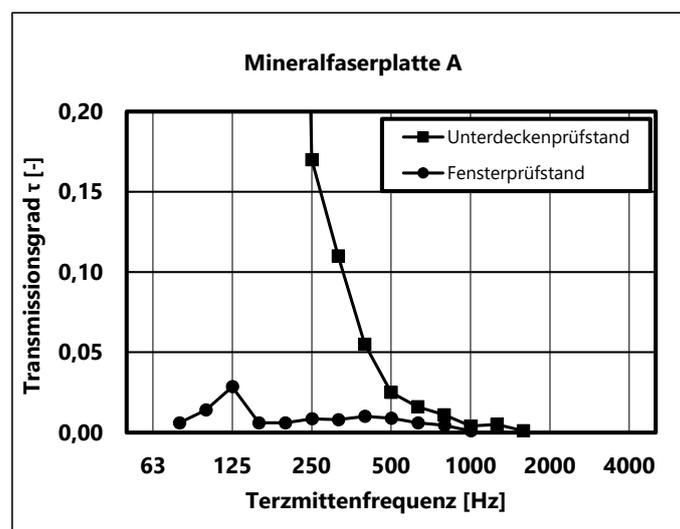
Bild 13

Bestimmung des Schalltransmissionsgrades einer Unterdecke (Mineralfaserplatte) über ihr Schalldämm-Maß gemessen im Fensterprüfstand in einer Maske (50 mm x 80 mm) fixiert aus Sicht des Sendes- (links) und Empfangsraum (rechts).

Es wird deutlich, dass das Bauteil in einer Maske senkrecht fixiert werden muss. Dies stellt eine andere Einbausituation im Vergleich zum praktischen Aufbau, dem Einlegen der Elemente in eine hängende

Unterkonstruktion, dar. Außerdem ist die hier angesetzte Prüffläche deutlich kleiner als die Fläche einer typischen Einbausituation einer abgehängten Unterdecken. Dies verändert das Schwingungs- und Übertragungsverhalten des Prüfobjektes und vermindert die Vergleichbarkeit beider Einbauzustände.

Es ist also in Frage zu stellen, wie der Transmissionsgrad von abgehängten Unterdecken „richtig“ bestimmt werden kann, um diesen als Eingangsgröße für ein Prognosemodell zu verwenden. Im Fensterprüfstand der ist sende- und empfangsseitig von einem diffusen Schallfeld auszugehen. Im Unterdeckenprüfstand tritt der Schall von einem diffusen Schallfeld im Senderraum in einen Flachraum, der womöglich auf Grund der geringen Höhe kein gleichwertiges diffuses Schallfeld ausbilden kann. Umgekehrt tritt der Schall aus einem unbekanntem Schallfeld des Hohlräume in das diffuse Schallfeld des Empfangsraums. Eine geeignete Messmethode für die Bestimmung des Transmissionsgrades in einen Flachraum steht nicht zur Verfügung. Bei der Messung über das Mikrofonarray im Deckenhohlraum des Unterdeckenprüfstands sind die Schallfelder korrekt aufgebaut, die Auswertung benötigt aber eine Annahme zum Schallfeld im Deckenhohlraum. Beide Verfahren sind zur Bestimmung des tatsächlichen Transmissionsgrad der Unterdecke im eingebauten Zustand nur eingeschränkt nutzbar. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Messergebnisse des Transmissionsgrades für Mineralfaserplatte A. Die Werte aus dem Unterdeckenprüfstand liegen unterhalb von 500 Hz im unplausiblen hohen Bereich ($\tau > 1$). Die Messergebnisse im tieffrequenten Bereich aus dem Fensterprüfstand sind hingegen auf einem unplausiblen niedrigen Niveau. Letzteres ist möglicherweise durch die zu geringe Prüffläche zu erklären.



Quelle: IBP

Abbildung 3
Darstellung des am Unterdecken- und Fensterprüfstand gemessenen Transmissionsgrades der Mineralfaserplatte A.

Die Qualität des gemessenen Transmissionsgrades sowie dessen Ermittlung mit einem vertretbaren Aufwand bei einer Prüfung ist für die Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz unzureichend. Da ausreichende und plausible Qualität der Eingangsgrößen (Transmissionsgrad) nicht erreicht werden kann, wird von der Implementierung des Berechnungsmodells nach MECHEL und MARINER schließlich abgesehen. Um die Ziele des Forschungsvorhabens gemäß der Ziel- und Erfolgskriterien trotzdem zu erfüllen, werden stattdessen die Messergebnisse für die Entwicklung eines empirischen Prognoseverfahrens herangezogen. Im folgenden Kapitel werden die Messergebnisse zusammengetragen und das entwickelte Berechnungsmodell erläutert.

Ergebnisse

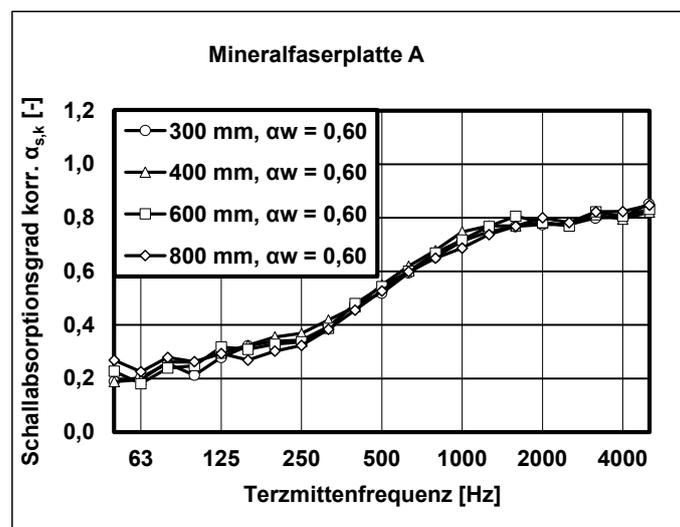
Zunächst werden im Folgenden die Messergebnisse zusammengetragen und analysiert. Diese dienen den im Anschluss präsentierten Berechnungsergebnissen als Vergleich und zur Validierung des Prognosemodells.

Zusammenführung der Messergebnisse

Tabelle 1 zeigt bereits in einer Übersicht die relevanten Eckdaten der acht untersuchten abgehängten Unterdecken. Für die Zusammenführung der Ergebnisse wird exemplarisch und zur besseren Übersicht der Fokus auf vier Unterdecken gelegt, die die Mess- und Analyseergebnisse repräsentieren (Alle Messergebnisse werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt). Dabei stehen zwei Mineralfaserplatten (A und B) im Fokus, deren längenbezogener Strömungswiderstand und rückseitige Schallabsorption unterschiedlich sind. Zusätzlich zeigt ein Vergleich zweier Metallkassetten (A und B) die Messergebnisse mit bzw. ohne eine thermische Aktivierung.

Mineralfaserplatte

Zunächst werden die Messergebnisse der Mineralfaserplatten A und B besprochen. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden für die Ergebnisdarstellung nicht alle gemessenen Abhängehöhen aufgeführt. In Abbildung 4 ist der im Hallraum des IBP gemessene (korrigierte) Schallabsorptionsgrad $\alpha_{s,k}$ terzfrequenzabhängig abgebildet.

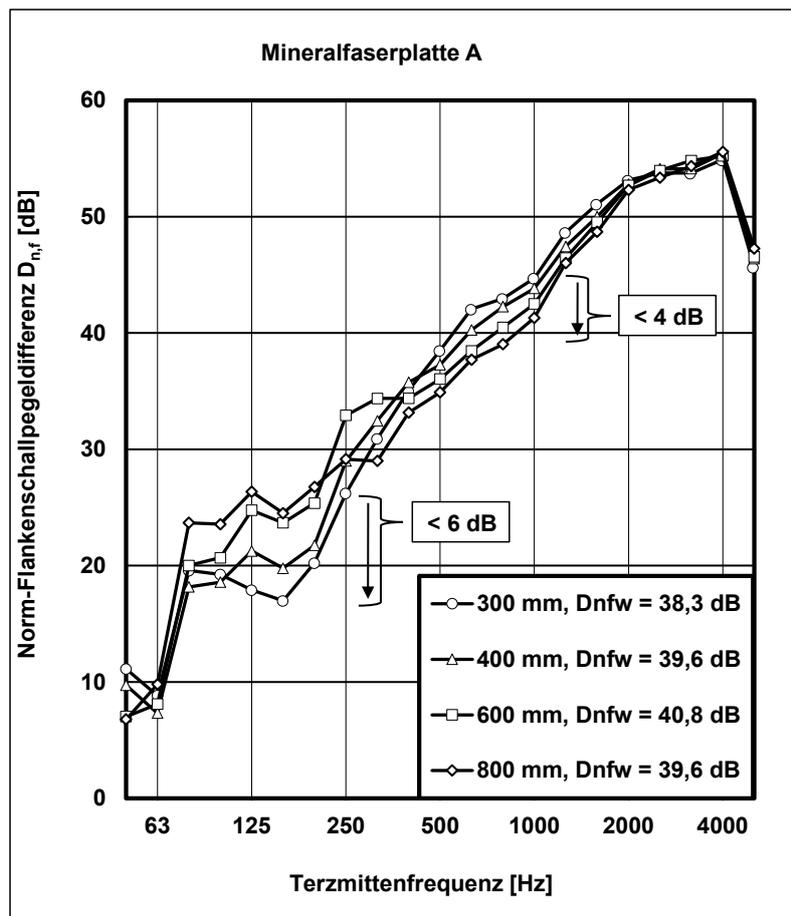


Quelle: IBP

Abbildung 4
Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Mineralfaserplatte A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,60$ bei nahezu deckungsgleichem Kurvenverlauf.

Ein Einfluss der Abhängehöhe ist auf Grund des hohen längenbezogenen bzw. spezifischen Strömungswiderstandes nicht festzustellen ($\alpha_w = 0,60$). Der spezifische Strömungswiderstand der Mineralfaserplatte A entspricht mit $R_s \approx 12 \text{ kPa s/m}$ nicht dem Optimum für poröse Schallabsorber mit Wandabstand (vgl. Formel 15). Damit ist eine Abhängigkeit zur Abhängehöhe nicht zu erwarten, da die Schalltransmission durch die Unterdecke und damit die Interaktion des Schalls mit dem Hallraumboden minimal ist. Dies bestätigt sich in den Messergebnissen durch nahezu identische Kurven der Schallabsorption bei Änderung der Abhängehöhe (bzw. des Wandabstandes).

Abbildung 5 zeigt die Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A bei verschiedenen Abhängehöhen. Für Mineralfaserplatte A ist eine Änderung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz in Abhängigkeit der Abhängehöhe zu erkennen: besonders im unteren Teil des für Sprache relevanten Frequenzbereiches von 100 Hz bis 1.000 Hz kann die Schallübertragung in einen benachbarten Raum je nach Abhängehöhe um bis zu 6 dB variieren. Gerade für den Einsatz in Räumen, in denen gesprochen wird (Büros, Schulen etc.) kann es also sinnvoll sein, den möglichen Einfluss der Abhängehöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz beim Einbau entsprechend zu berücksichtigen.



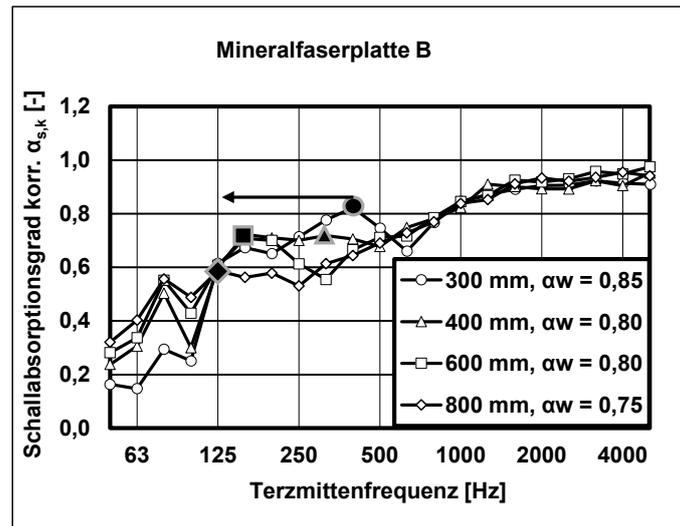
Quelle: IBP

Abbildung 5

Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $D_{n,f,w} = 2$ dB bei variierendem Kurvenverlauf hauptsächlich im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.000 Hz.

Bei der Betrachtung der Messergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz in Abbildung 5 fällt außerdem auf, dass der Einzahlwert $D_{n,f,w}$ um bis zu $\Delta D_{n,f,w} = 2$ dB variiert. Bei einer Abhängehöhe von 600 mm wird das Maximum der Norm-Flankenschallpegeldifferenz erreicht. Eine Abhängehöhe von 800 mm, wie sie nach DIN EN ISO 10848-2 für die Prüfung vorgesehen ist, ergibt einen um 1,2 dB geringeren Einzahlwert $D_{n,f,w} = 39,6$ dB. Bei der Prüfung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz einer abgehängten Unterdecke ist eine Messunsicherheit von $\pm 1,2$ dB anzusetzen. Es wird davon ausgegangen, dass eine Abweichung darüber hinaus (vgl. Messergebnis $D_{n,f,w} = 39,6$ dB bei 800 mm und $D_{n,f,w} = 38,3$ dB bei 300 mm) in diesem Fall auf den Einfluss der Abhängehöhe zurückzuführen ist. Dabei bleibt der bewertete Schallabsorptionsgrad konstant ($\alpha_w = 0,60$). Eine Abstimmung der Raumakustik bzw. Nachhallzeit im Senderaum über die Abhängehöhe ist nicht möglich.

Mineralfaserplatte B weist mit $R_s \approx 1,2 \text{ kPa s/m}$ einen im Vergleich mit Mineralfaserplatte A geringeren und optimalen spezifischen Strömungswiderstand auf und stellt daher eine sinnvolle und praxisrelevante Ergänzung der Untersuchungsobjekte im Forschungsprojekt dar. Bei der Betrachtung des Schallabsorptionsgrades (Abbildung 6) ist eine Änderung des charakteristischen Kurvenverlaufs für poröse Schallabsorber zu beobachten. Mit steigender Abhängehöhe wird das lokale Schallabsorptionsmaximum zu tieferen Frequenzen verschoben.

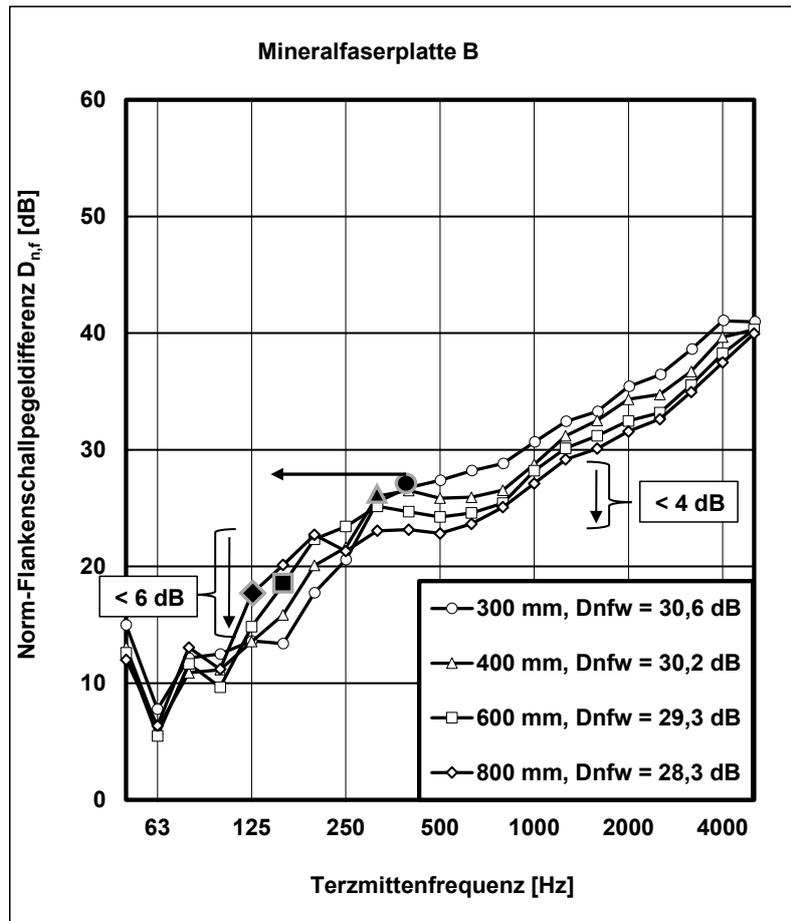


Quelle: IBP

Abbildung 6

Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Mineralfaserplatte B bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit variierendem Einzahlwert α_w jeweils in Abhängigkeit der Abhängehöhe. Entsprechend des Schallabsorptionsverhaltens verschiebt sich der Scheitelpunkt des Kurvenverlaufs mit steigender Abhängehöhe hin zu tieferen Frequenzen (durch schwarz ausgefüllte Markierungen dargestellt).

Diese Abhängigkeit ist für poröse Materialien vor einer schallharten Wand und einem entsprechenden spezifischen Strömungswiderstand zu erwarten: je größer der Wandabstand, desto größer ist die minimale Wellenlänge der Frequenz, bei der Schall absorbiert werden kann. Insgesamt ist festzustellen, dass der bewertete Einzahlwert des Schallabsorptionsgrades α_w von 300 mm bis 800 mm Abhängehöhe um bis zu 10 % geringer ausfällt. Diese Verschiebung in Abhängigkeit der Abhängehöhe ist auch bei der Betrachtung der Messergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz von Mineralfaserplatte B in Abbildung 7 zu erkennen.



Quelle: IBP

Abbildung 7

Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte B bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 2,3$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im gesamten abgebildeten bzw. relevanten Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 5000 Hz.

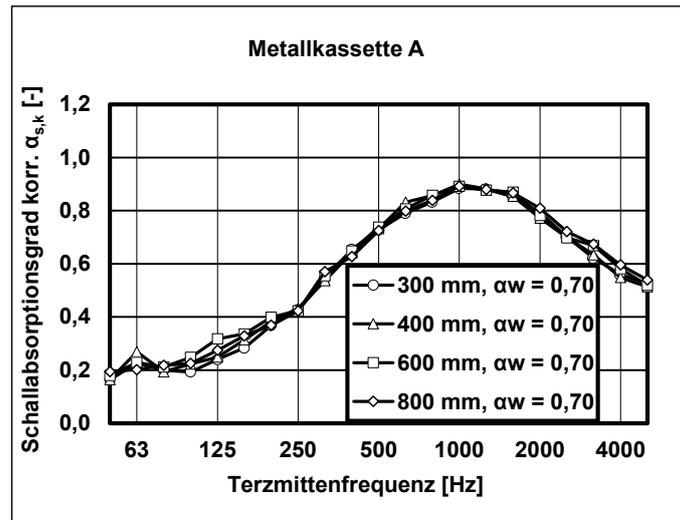
Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei geringer Abhängehöhe (300 mm) die Norm-Flankenschallpegeldifferenz oberhalb von 500 Hz größer ist, während sie mit zunehmender Abhängehöhe abnimmt ($\Delta D_{n,f,>250\text{Hz}} \leq 4$ dB). Dies kann jedoch nicht durch die Schallabsorption erklärt werden, da diese ab 250 Hz unabhängig von der Abhängehöhe ist. Unterhalb von 250 Hz kehrt sich das Verhältnis um, sodass eine niedrige Abhängehöhe (300 mm) zu einer im Vergleich geringen Norm-Flankenschallpegeldifferenz führt ($\Delta D_{n,f,<250\text{Hz}} \leq 6$ dB). Insgesamt nimmt die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ um 2 dB bei ansteigender Abhängehöhe ab. $\Delta D_{n,f,w}$ liegt damit oberhalb der bei der Prüfung anzugebenden Messunsicherheit von $\pm 1,2$ dB.

Mit einer Unterdecke aus Mineralfaserplatte B kann die Raumakustik und die Norm-Flankenschallpegeldifferenz in Abhängigkeit der jeweiligen Abhängehöhe im Rahmen der gezeigten Messergebnisse abgestimmt werden. Am Beispiel von Mineralfaserplatte B ist zu sehen, dass eine geringe Abhängehöhe (z. B. 300 mm) die Einzahlwerte im Vergleich maximal werden lässt ($\alpha_w = 0,85$ bzw. $D_{n,f,w} = 30,6$ dB). Dies gilt entsprechend umgekehrt für größere Abhängehöhen (800 mm). Im Vergleich mit den Ergebnissen von Mineralfaserplatte A wird aber auch deutlich, dass die Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ von Mineralfaserplatte B um ca. 10 dB geringer ausfällt. Dies kann ein Nachteil für Unterdecken mit einem (gemäß Formel 15) optimalen spezifischen Strömungswiderstand darstellen, wenn die Abstimmung beider akustischen Größen durch die Abhängehöhe angestrebt wird. Außerdem ist im Vergleich mit Mineralfaserplatte A festzustellen, dass sich der Einzahlwert mit steigender Abhängehöhe verringert, anstatt ansteigt.

Metallkassette

Als weitere Untersuchungsobjekte stehen Deckensysteme bestehend aus Metallkassetten zur Verfügung. Werden Rohrmäander eingesetzt, dienen diese als thermische Aktivierung, indem sie, durchflossen mit warmer oder kalter Flüssigkeit, die Temperatur im Raum beeinflussen. Für das Forschungsprojekt werden insgesamt 2 Metallkassetten-Deckensysteme mit, und zwei ohne Rohrmäander in den Laboren gemessen. Diese unterscheiden sich jeweils in der Ausprägung der Perforierung (siehe Tabelle 1). Im Folgenden werden beispielhaft die Messergebnisse für eine Perforierung mit einem Lochdurchmessers von $D = 0,7$ cm bei einem Lochanteil von 4 % diskutiert (Metallkassette A und B). Die Kernaussagen der Ergebnisse sind vergleichbar mit denen zu Metallkassetten C und D (siehe Tabelle 1). Metallkassette A und B (bzw. C und D) unterscheiden sich in ihrer thermischen Aktivierbarkeit, die in jeweils den Fällen B und D verbaut ist.

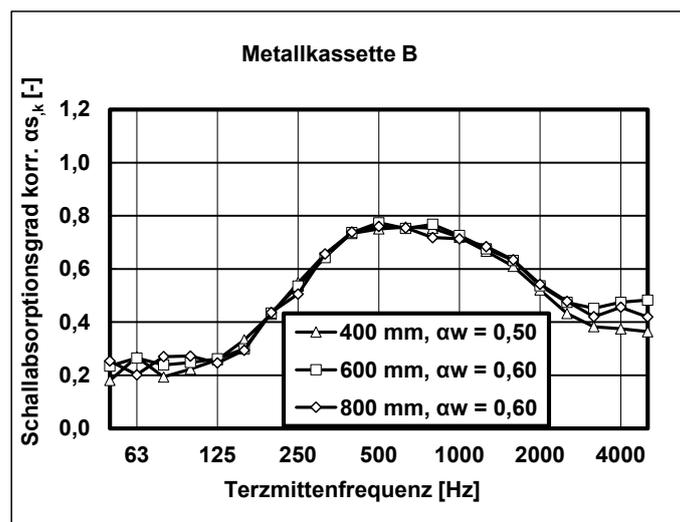
Zusätzlich eingebrachte Rohrmäander bewirken, dass die luft- bzw. schalldurchlässigen Löcher teilweise verschlossen sind. Das resultiert wiederum in einem unterschiedlichen Schallabsorptionsgrad, wie Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen. Die Frequenz, bei der Schall mit $\alpha_{s,k} = 0,90$ maximal absorbiert wird, liegt bei Metallkassette A (ohne Rohrmäander) bei 1000 Hz. Bei Metallkassette B liegt sie bei 500 Hz mit $\alpha_{s,k} = 0,80$. Der Einzahlwert, also der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w , reduziert sich um ca. 10 % (von $\alpha_w = 0,70$ auf $\alpha_w = 0,60$), wenn die Metallkassette thermisch aktiviert ist.



Quelle: IBP

Abbildung 8

Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Metallkassette A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,70$ bei nahezu deckungsgleichem Kurvenverlauf.



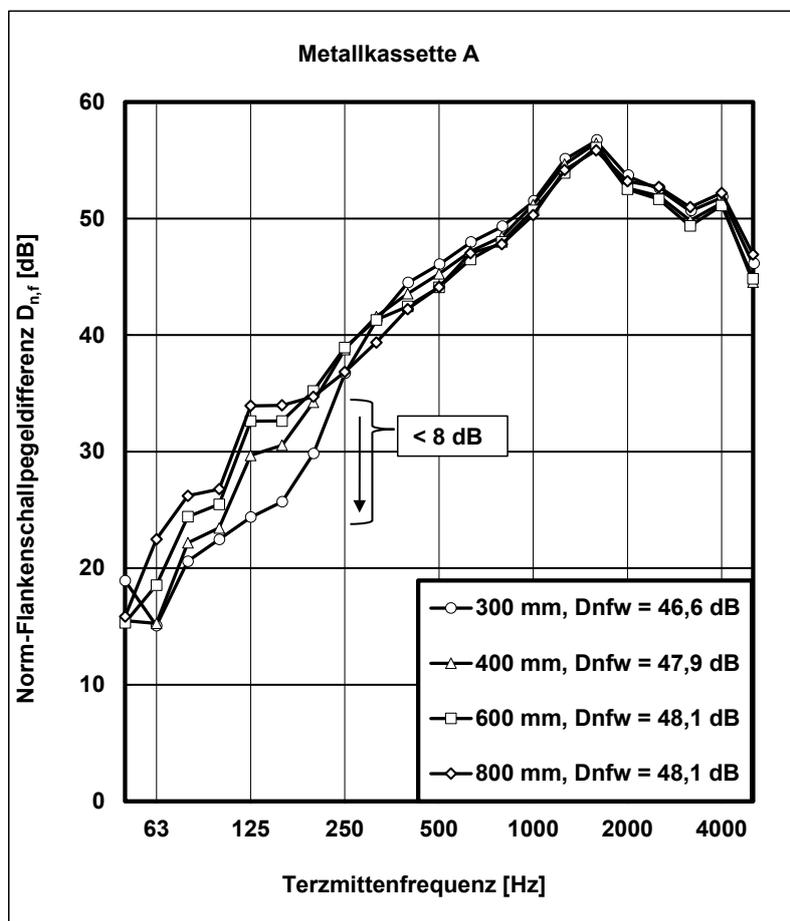
Quelle: IBP

Abbildung 9

Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Metallkassette B (mit Rohrmäandern) bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,50$ bzw. $0,60$ bei überwiegend deckungsgleichem Kurvenverlauf.

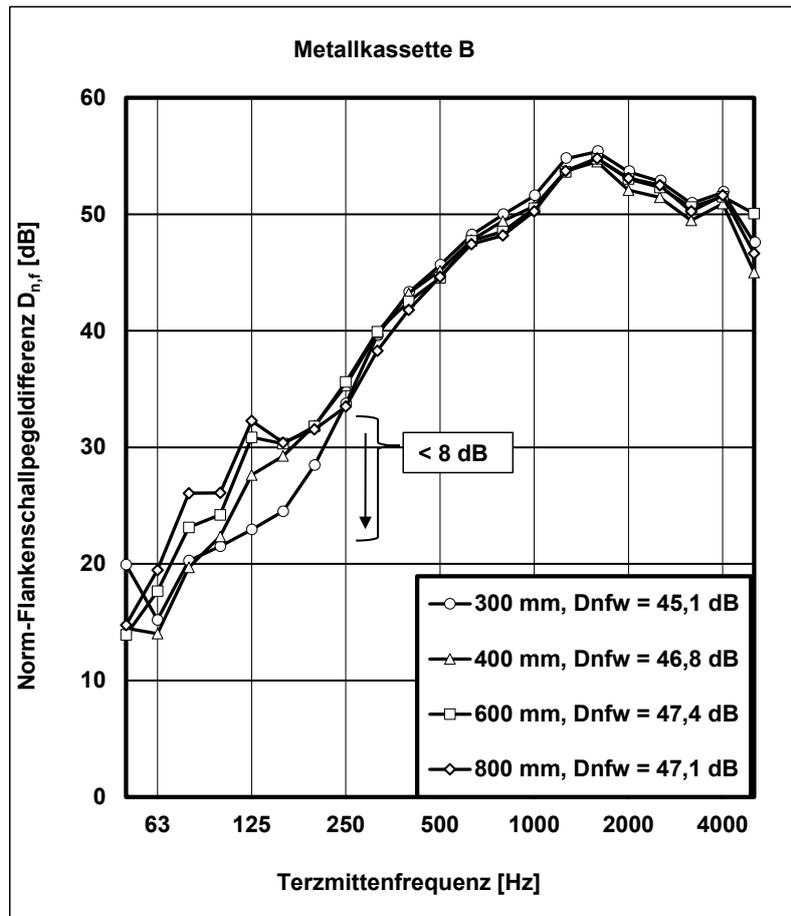
Die Schichten und insbesondere die Gipskartonplatte auf der Rückseite führen zu einem aus akustischer Sicht dichten System, also einem hohen spezifischen Strömungswiderstand. Sowohl dieser als auch (u. a.) die im Vergleich höhere flächenbezogene Masse dieses Deckensystems reduzieren die Schalltransmission durch die Decke auf ein Minimum. Im Kontext des Forschungsvorhabens kann, wie bereits für Mineralfaserplatte A, auf Grund des hohen spezifischen Strömungswiderstandes keine Abhängigkeit des Schallabsorptionsgrades zur Abhängehöhe festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz, zu sehen in Abbildung 10 und Abbildung 11, zeigen mit Mineralfaserplatte A (siehe Abbildung 5) vergleichbare Auffälligkeiten. Insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 250 Hz ist eine Abhängigkeit zur Abhängehöhe zu erkennen. Diese äußert sich bei beiden Metallkassetten (A und B) durch eine Erhöhung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei zunehmender Abhängehöhe um bis zu $\Delta D_{n,f} = 8$ dB unterhalb von 250 Hz. Dies resultiert in einem Einzahlwert $D_{n,f,w}$, der zu größeren Abhängehöhen (tendenziell) um bis zu $\Delta D_{n,f,w} = 1,5$ dB ansteigt.



Quelle: IBP

Abbildung 10
Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 1,5$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1000 Hz.



Quelle: IBP

Abbildung 11

Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette B (mit Rohrmäander) bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 2$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.000 Hz.

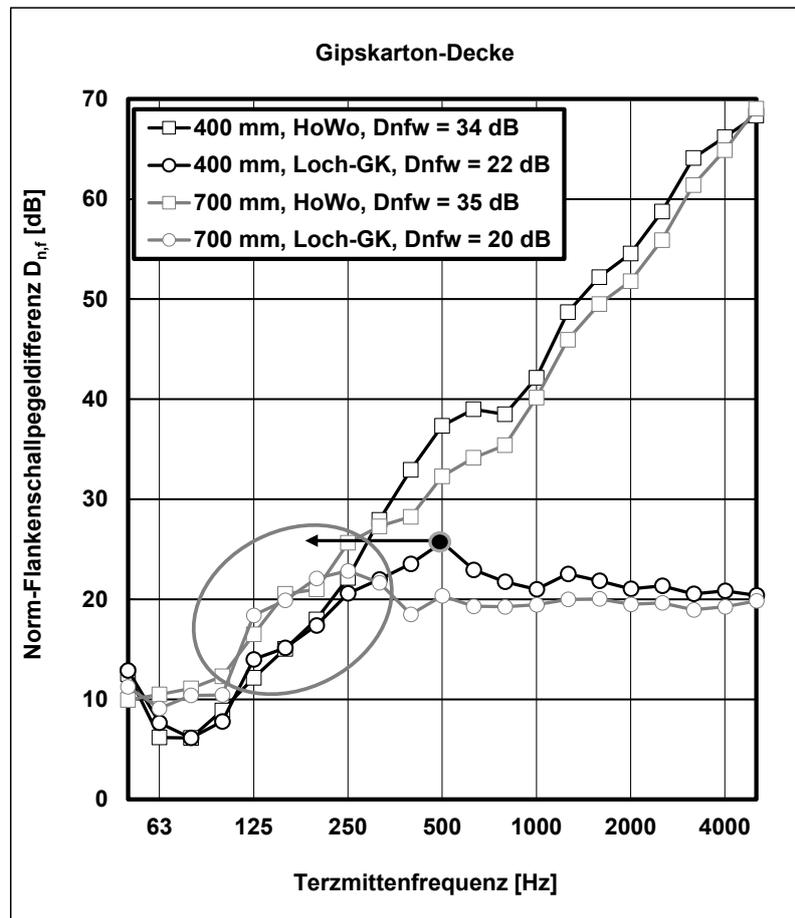
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Abhängigkeit der Norm-Flankenschallpegeldifferenz von der Abhängehöhe im Forschungsvorhaben grundsätzlich nachgewiesen werden kann. Alle Untersuchungsobjekte zeigen einen Einfluss der Abhängehöhe auf die Messergebnisse. Der Schallabsorptionsgrad wird dann von der Abhängehöhe beeinflusst, wenn der spezifische Strömungswiderstand in einem für poröse Schallabsorber mit Wandabstand optimalen Bereich liegt. Zwar reduziert dies die Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Unterdecke, ermöglicht aber eine (frequenzabhängige) Abstimmung beider akustischen Größen durch die Abhängehöhe.

Gipskarton und Holzwolle

Das Fraunhofer IBP verfügt durch die angesiedelte Prüfstelle für Akustik über zahlreiche weitere Messergebnisse von abgehängten Unterdecken. Ergänzend zu bisherigen Deckensystemen werden im Folgenden beispielhafte Ergebnisse von abgehängten Unterdecken aus Gipskartonelementen mit und ohne zusätzliche rückseitige Schallabsorption (Mineralwolle) dargestellt. Mit den Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei unterschiedlichen Abhängehöhen wird eine Einordnung in die Ergebnisse der beschriebenen Messreihe möglich.

Abbildung 12 zeigt die Messergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz für zwei abgehängte Unterdecken gemessen bei zwei Abhängehöhen (400 mm und 700 mm). Eine der Decken besteht aus gepresster Holzwolle sowie Bindemittel aus Zement und Kalk („HoWo“, Rechteck). Damit ist die gepresste

Holzwole aus akustischer Sicht mit der gepressten Mineralfaserplatte vergleichbar. Zusätzlich verfügt die gepresste Holzwole über einen spezifischen Strömungswiderstand deutlich oberhalb des optimalen Bereichs ($R_s > 2,4 \text{ kPa s/m}$). Außerdem zeigt Abbildung 12 die Messergebnisse einer gelochten Unterdecke („Loch-GK“, Kreis) bestehend aus Gipskartonelementen (Kreis) gemessen bei zwei Abhängehöhen (400 mm und 700 mm). Durch die Lochung ist diese Unterdecke für Schall vermehrt durchlässig. Diese Eigenschaft verringert die Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Vergleich in diesem Fall ab einer Frequenz von 250 Hz.



Quelle: IBP

Abbildung 12

Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für gepresste Holzwole (HoWo) und gelochte Gipskartonelemente (Loch-GK) bei den Abhängehöhen 400 mm und 700 mm mit jeweiligem Einzahlwert $D_{n,f,w}$ bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz als Indiz für ein nicht ausschließlich diffuses Schallfeld im Deckenhohlraum.

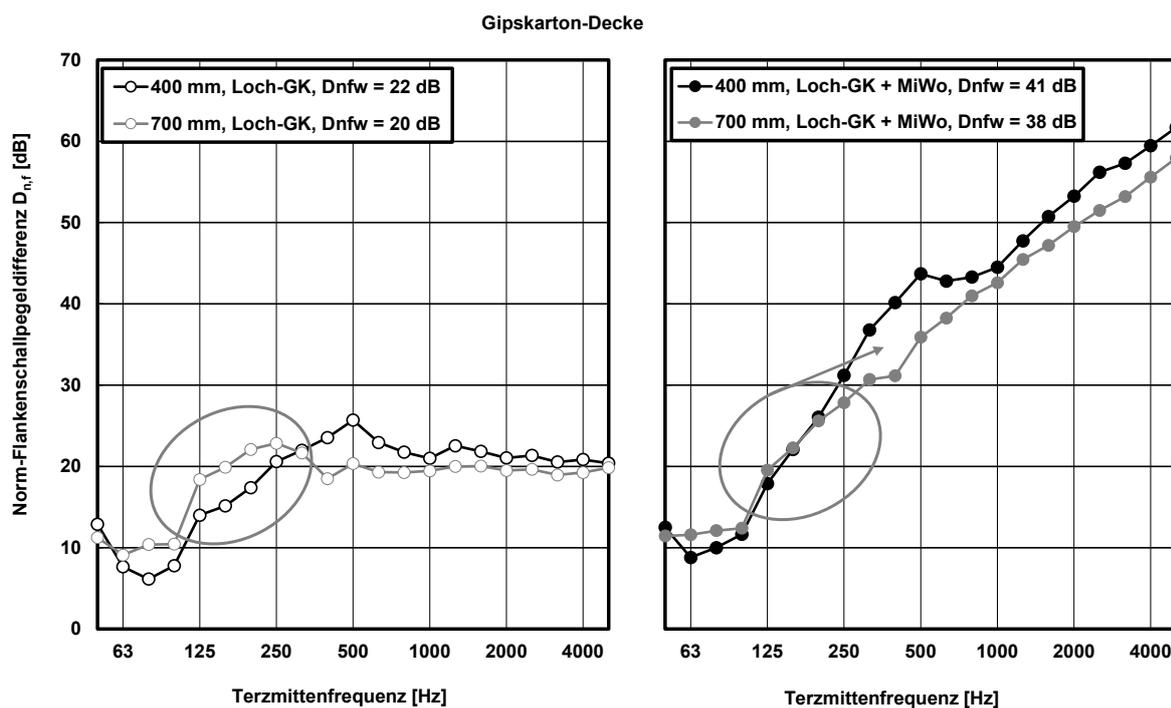
Die Messergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz zeigen ebenfalls die bereits bei der Betrachtung der Ergebnisse der Mineralfaserplatte und der Metallkassette diskutierten Auffälligkeiten. Die Norm-Flankenschallpegeldifferenz der gepressten Holzwole (Rechteck) steigt im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz mit der Erhöhung der Abhängehöhe an (graues Oval). Eine Abhängigkeit zum unterschiedlichen spezifischen Strömungswiderstand der Unterdecken ist in diesem Frequenzbereich nicht zu erkennen.

Die Unterdecke aus gelochten Gipskartonelementen zeigt entsprechend der Mineralfaserplatte B eine Verschiebung des Scheitelpunktes der Norm-Flankenschallpegeldifferenz hin zu tieferen Frequenzen. Der durch die Lochung geringere Strömungswiderstand ermöglicht im Vergleich zur gepressten Holzwole eine Einflussnahme durch die Abhängehöhe bzw. dem Deckenhohlraum auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz.

Die beispielhaften Messergebnisse aus der Prüfstelle für Akustik am IBP bestätigen die Ergebnisse des Forschungsprojektes und zeigen, dass die Beobachtungen wahrscheinlich auch für weitere Materialien (gepresste Holzwolle und Gipskarton) zutreffend sind. Der Strömungswiderstand des Materials, der sich auf die Schalltransmission und die Schallabsorption auswirkt, ist dabei ein wesentlicher Materialparameter.

Die beispielhaft aufgeführten Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz von gelochten Gipskartonplatten liegen zusätzlich mit einer Modifikation durch rückseitige Schallabsorption vor. Dafür wird auf die Rückseite (nicht gepresste) Mineralwolle aufgelegt, die zu einer signifikanten erhöhten rückseitigen Schallabsorption im Deckenhohlraum führt. Durch das Verschließen der Löcher erhöht sich der Strömungswiderstand der Unterdecke ebenfalls, was zu einem Anstieg der Norm-Flankenschallpegeldifferenz führt.

Die ergänzte Mineralwolle auf der Rückseite soll Hinweise auf den Einfluss zusätzlich in den Deckenhohlraum eingebrachter Schallabsorption auf das Schallfeld geben. Abbildung 13 zeigt die Norm-Flankenschallpegeldifferenz der gelochten Gipskartonplatte (links) mit rückseitig aufgelegter Mineralwolle (rechts) bei zwei Abhängehöhen (400 mm und 700 mm). Für dieses Beispiel kann eine Änderung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz nach der Erhöhung der Abhängehöhe nicht beobachtet werden (graues Oval). Auffällig ist jedoch eine vergleichsweise höhere Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Frequenzbereich ab 250 Hz bei 400 mm Abhängehöhe. Diese ist möglicherweise ein weiterer Effekt der zusätzlichen rückseitigen Schallabsorption, die bei geringen Abhängehöhen eine größere Wirkung erzielt.



Quelle: IBP

Abbildung 13

Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für gelochte Gipskartonelemente (Loch-GK, links) mit aufgelegter Mineralwolle (MiWo, rechts) zur Erhöhung der rückseitigen Schallabsorption bei den Abhängehöhen 400 mm und 700 mm mit jeweiligem Einzahlwert $D_{n,f,w}$ bei kaum variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz als Indiz für ein nicht ausschließlich diffuses Schallfeld im Deckenhohlraum.

Die zusätzlichen Messergebnisse der bauakustischen Prüfstelle am IBP stützen die Vermutung, dass die Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz über die Messunsicherheit von

$\pm 1,2$ dB hinaus von der Abhängehöhe abhängig ist. Abgehängte Unterdecken ohne erhöhte rückseitige Schallabsorption, deren Strömungswiderstand eine Schalltransmission deutlich reduzieren, zeigen mögliche Auswirkungen auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz (siehe Messergebnisse). Die Auswirkung von hochschallabsorbierendem rückseitig aufgebrachtem Material auf eine Unterdecke kann im Rahmen des Forschungsprojektes nicht abschließend mit der Abhängehöhe in einen Zusammenhang gebracht werden. Diese Modifikation einer abgehängten Unterdecke ist ausblickend Teil weiterer Forschungsumfänge.

Berechnungsmodelle

Die Messergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz zeigen im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz eine Abhängigkeit zur Abhängehöhe. Diese ist besonders bei Unterdecken mit einem hohen spezifischen Strömungswiderstand ($R_s > 2,4$ kPa s/m) auffällig. Für Unterdecken mit einem optimalen spezifischen Strömungswiderstand ist darüber hinaus ein Effekt auch im Frequenzbereich oberhalb von 250 Hz festzustellen. Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchung kann es bei Missachtung dieser Beobachtungen in der Praxis zu Schallschutzmängeln führen. Die literaturbasierten Berechnungsergebnisse nach MARINER können diese Effekte auf Grund der fehlenden Qualität der Eingangsdaten (Transmissionsgrad) nicht abbilden.

Bei der Ableitung möglicher Zusammenhänge zwischen Abhängehöhe und Norm-Flankenpegeldifferenz wird daher alternativ die Schallübertragung zwischen dem Senderraum und dem Deckenhohlraum oberhalb des Senderraums näher betrachtet. Es ist anzunehmen, dass dieser Übertragungsweg des Schalls in den (bzw. einen) Empfangsraum maßgeblich beeinflusst. Diese Betrachtung bietet einen vereinfachten Ansatz für erste Simulationen, da zunächst nur der Teil des Deckenhohlraums oberhalb des Senderraums berücksichtigt wird.

Mit einem vereinfachten Simulationsmodell, umgesetzt mit der Software COMSOL[®], wird ein Zusammenhang zwischen der Abhängehöhe, den Simulations- und den Messergebnissen hergestellt. Dieser ist unabhängig von der abgehängten Unterdecke. Im Anschluss daran wird ein empirisches Prognosemodell vorgestellt, welches die Erkenntnisse aus den Mess- und Simulationsergebnissen als Grundlage für die Berechnung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei geänderter Abhängehöhe ermöglicht. Schließlich werden zwei neu entwickelte Ansätze vorgestellt, die die Norm-Flankenschallpegeldifferenz abgehängter Unterdecken bei von der Messung abweichenden Abhängehöhen frequenzabhängig zu prognostizieren:

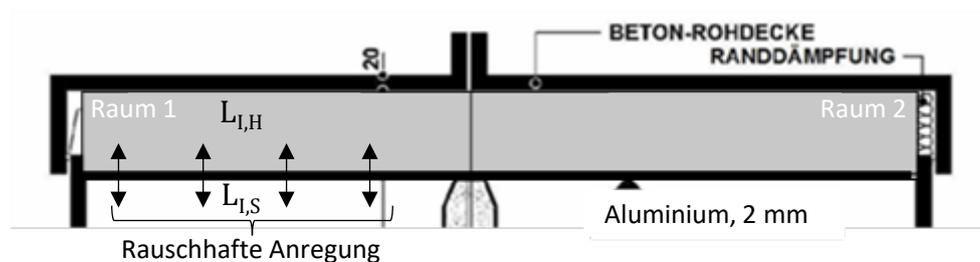
- **Ansatz A** ($R_s > 2,4$ kPa s/m):
 - Eingabe:
Frequenzabhängige Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f}$ (nach Norm) und Bewerteter Einzahlwert $D_{n,f,w}$
 - Berechnung:
Frequenzabhängige Prognose von $D_{n,f}$ zwischen 125 Hz und 250 Hz sowie Ermittlung des bewerteten Einzahlwertes ausgehend von der Prognose anhand der Bezugskurve nach DIN EN ISO 717-1
 - Ergebnis:
Frequenzabhängige Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f}$ (Prognose) und Bewerteter Einzahlwert $D_{n,f,w}$ (Prognose)
- **Ansatz B** ($0,8 < R_s < 2,4$ kPa s/m):
 - Eingabe:
Bewerteter Einzahlwert $D_{n,f,w}$
 - Berechnung:
Prognose des bewerteten Einzahlwertes $D_{n,f,w}$ basierend auf dem Zusammenhang zur Abhängehöhe aus Messergebnissen

- Ergebnis:
Bewerteter Einzahlwert Dnfw (Prognose)

Simulation der Schallausbreitung

Für das Simulationsmodell werden einige Vereinfachungen im Vergleich zum Messaufbau angenommen. Zunächst wird dazu ein 2D Modell aufgebaut, mit dem der Deckenhohlraum abgebildet wird. Die Abmessungen des Deckenhohlraums im Unterdeckenprüfstand mit seiner Länge von 11 m und den unterschiedlichen Abhängehöhen werden berücksichtigt. Der Einfluss der Prüfstandsweite als dritte Dimension wird vernachlässigt. Als „Unterdecke“ wird für die Simulation eine schallundurchlässige Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) angenommen. Das Ziel der zusätzlichen Simulationsumfänge ist es, grundsätzliche, physikalische Effekte, nicht jedoch jedes Detail des Messaufbaus mit unterschiedlichen Unterdecken abzubilden. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse möglicher Auswirkungen der Abhängehöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz zwischen 100 Hz und 500 Hz.

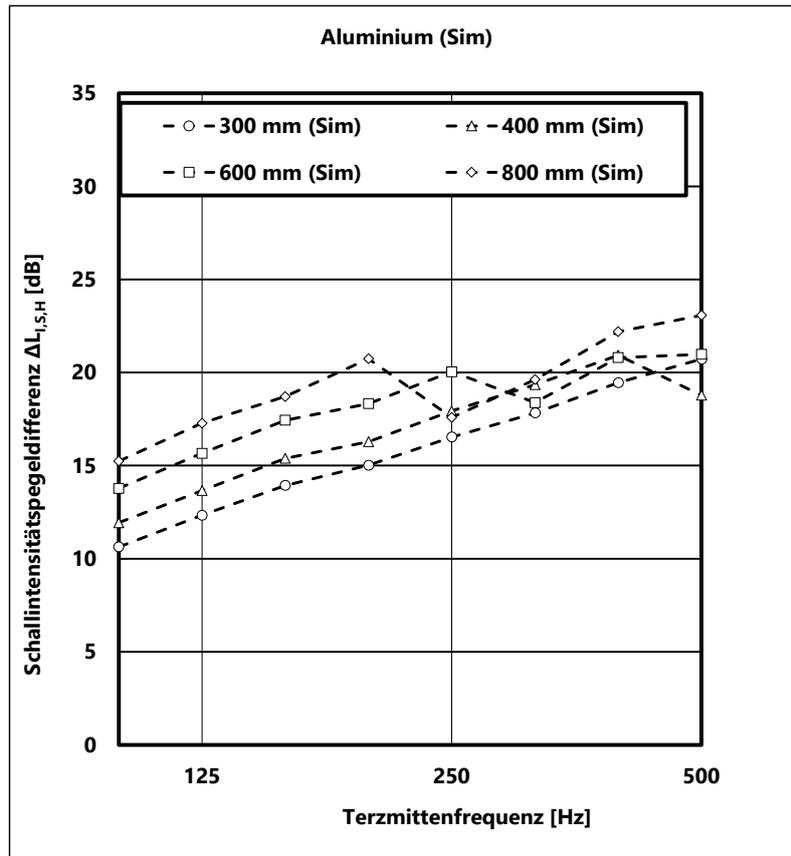
Die zu untersuchte Zielgröße der Simulation ist die Differenz des durch die Platte eingeleiteten und der im Deckenhohlraum oberhalb simulierten Schallintensitätspegels bei einer stochastischen Schwingungsanregung der Aluminiumplatte mit einer (blockierten) Kraftquelle. Abbildung 14 zeigt den Simulationsbereich im Kontext des Unterdeckenprüfstands am IBP.



Quelle: IBP

Abbildung 14
Simulationsbereich Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) eingezeichnet in die Skizze des Deckenhohlraums im Unterdeckenprüfstands am IBP.

Abbildung 15 zeigt die simulierte Schallintensitätspegeldifferenz $\Delta L_{I,S,H}$ in dB. Dabei fällt auf, dass die Differenz mit zunehmender Abhängehöhe zwischen 100 Hz und 200 Hz ansteigt. Ab 250 Hz ändert sich die Rangfolge der (jeweiligen) Differenz bei zunehmender Abhängehöhe. Die Änderung der Abhängehöhe, und damit des Volumens, beeinflusst demnach die Schallintensität im Deckenhohlraum. Dieser Effekt ist, wie vereinfachte 2D-Simulation anhand der Eigenschaften einer Aluminiumplatte zeigen, unabhängig von den akustischen Eigenschaften einer Unterdecke.

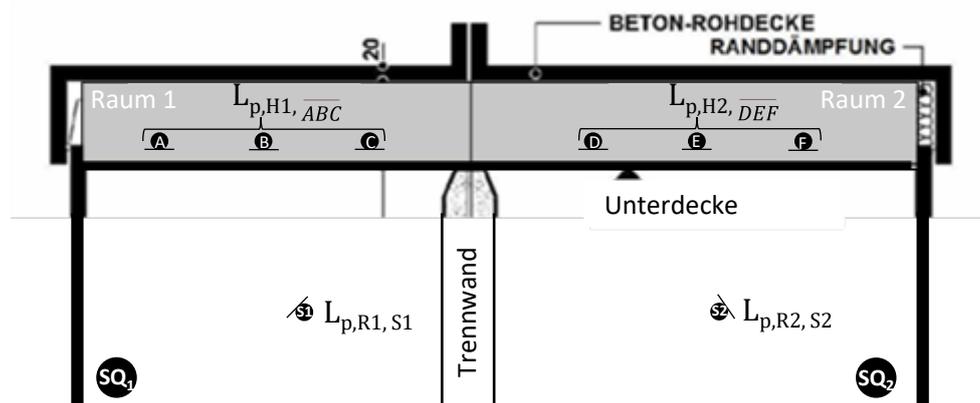


Quelle: IBP

Abbildung 15

Ergebnisdarstellung der mit COMSOL[®] berechneten frequenzabhängigen Schallintensitätspegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb einer Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) für die Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz.

Um zu zeigen, dass zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen ein Zusammenhang besteht, wird zunächst die über alle Deckensysteme gemittelte Schalldruckpegeldifferenz zwischen Senderraum und Deckenhohlraum $\Delta L_{p,R,H}(f, x)$ berechnet. Dazu werden die gemessenen Schalldruckpegel der in Abbildung 16 skizzierten Mikrofonpositionen gemäß (Formel 16, Formel 17 und Formel 18) entsprechend verrechnet. Die Mikrofonpositionen A, B und C bzw. D, E und F stehen dabei repräsentativ für die Mikrofonpositionen des Mikrofonarrays zwischen 1 m bis 4 m (in 0,25 m Abstände unterteilt) ausgehend jeweils von der Prüfstandswand (links bzw. rechtes) hin zur Trennwand.



Quelle: IBP

Abbildung 16

Skizze des Unterdeckenprüfstands am IBP mit eingezeichneten Mikrofon-Positionen im Senderraum (mit Schall angeregter Raum 1 bzw. 2) sowie im Deckenhohlraum.

$\Delta L_{p,R,H}(f, x)$ entspricht demnach der mittleren Schalldruckpegeldifferenz zwischen Senderraum und sendeseitigem Deckenhohlraum der jeweiligen Räume abhängig von der Terzfrequenz (f) und der Abhängehöhe (x).

$$\Delta L_{p,R,H,1}(f, x) = L_{p,R1,S1}(f, x) - L_{p,H1,\overline{ABC}}(f, x) \quad [\text{dB}] \quad \text{Formel 16}$$

$$\Delta L_{p,R,H,2}(f, x) = L_{p,R2,S2}(f, x) - L_{p,H2,\overline{DEF}}(f, x) \quad [\text{dB}] \quad \text{Formel 17}$$

$$\Delta L_{p,R,H}(f, x) = \frac{\Delta L_{p,R,H,1}(f, x) + \Delta L_{p,R,H,2}(f, x)}{2} \quad [\text{dB}] \quad \text{Formel 18}$$

mit

x = Abhängehöhe [mm]

f = Terzmittenfrequenz [Hz]

$L_{p,R,S}$ = Schalldruckpegel im Senderraum (Raum 1 bzw. Raum 2) [dB]

$L_{p,H1,\overline{ABC}}$ = Schalldruckpegel über Senderraum (Raum 1) im Deckenhohlraum [dB]

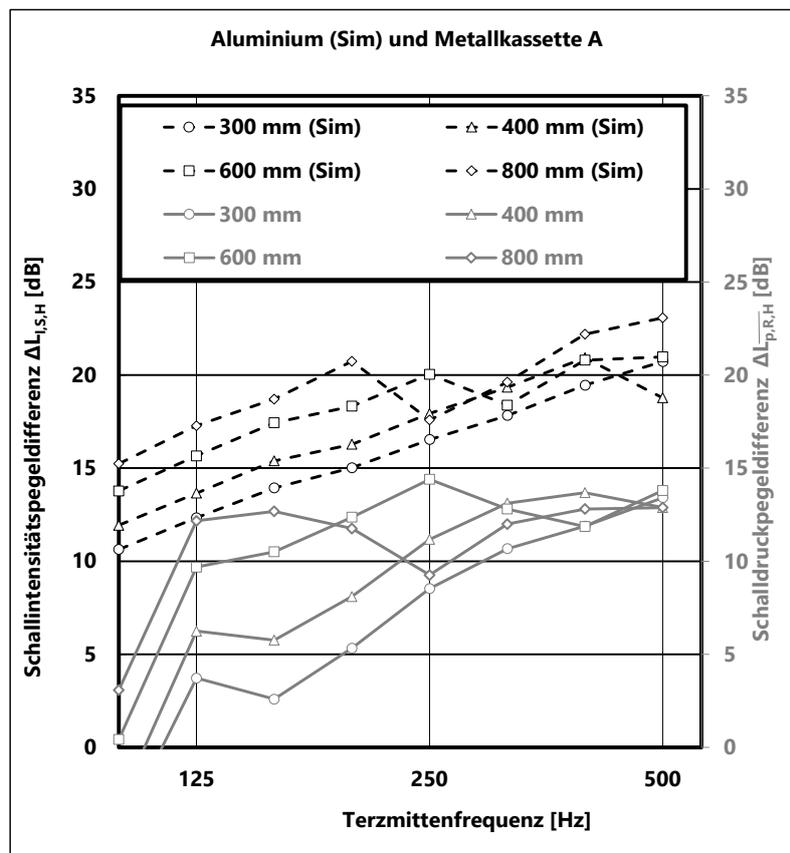
$L_{p,H2,\overline{DEF}}$ = Schalldruckpegel über Senderraum (Raum 2) im Deckenhohlraum [dB]

$\Delta L_{p,R,H,1}$ = Schalldruckpegeldifferenz Raum 1 (Schallquelle in Raum 1) [dB]

$\Delta L_{p,R,H,2}$ = Schalldruckpegeldifferenz Raum 2 (Schallquelle in Raum 2) [dB]

$\Delta L_{p,R,H}$ = Mittlere Schalldruckpegeldifferenz einer Unterdecke [dB]

Die Messergebnisse, die auf dem Schalldruckpegel beruhen, und die Simulationsergebnisse können miteinander verglichen werden, da sich Schalldruckpegel und Schallintensitätspegel proportional verhalten. Berücksichtigt wird der Mittelwert $\Delta L_{p,R,H}(f, x)$ aller untersuchten Unterdecken. Im Vergleich zeigt Abbildung 17, dass zwischen der vereinfachten Simulation (Linien in Schwarz (Sim)) mit einer Aluminiumplatte und der gemittelten Schallpegeldifferenz (Linien in Grau) der untersuchten Unterdecken ein Zusammenhang besteht. Dieser wird anhand des ähnlichen Verlaufs der Untersuchungsgrößen deutlich. Besonders ausgeprägt ist die Ähnlichkeit bei 250 Hz. Hier besteht für beide Größen ein lokales Maximum des Graphen, der das Ergebnis bei einer Abhängehöhe von 600 mm darstellt. Bei gleicher Frequenz (250 Hz) ist ein lokales Minimum für die Abhängehöhe von 800 mm für beide Größen zu erkennen.



Quelle: IBP

Abbildung 17

Ergebnisdarstellung (Schwarze gestrichelte Linie) der mit COMSOL® berechneten frequenzabhängigen Schallintensitätspegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb einer Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) für die Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz. Zusätzliche Darstellung der mittleren Schalldruckpegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb der untersuchten Unterdecken in Grau.

Der hier beschriebene Zusammenhang zeigt einen Effekt des Deckenhohlraums, der durch die Abhängehöhe beeinflusst wird und unabhängig von der verwendeten Unterdecke ist. Der Vergleich zeigt, dass die vereinfachte Simulation ein vergleichbares Phänomen anhand einer Aluminiumplatte und damit unabhängig von einer spezifischen Unterdecke nachweisen kann.

Aus physikalischer Sicht steht diese Beobachtung mutmaßlich im Zusammenhang mit dem gleichzeitig mit der Abhängehöhe geänderten Volumen. Die Anregung des Deckenhohlraums durch den Schalleintrag über die Unterdecke ist unabhängig von der eingestellten Abhängehöhe. Bei gleicher Anregung verteilt sich der Schall im Deckenhohlraum je nach eingestelltem Volumen unterschiedlich.

Einzuschränken ist, dass die für die Simulation angenommene Aluminiumplatte einen hohen spezifischen Strömungswiderstand besitzt (akustisch dicht). Die Auswirkungen des spezifischen Strömungswiderstandes auf den Schallabsorptionsgrad und damit auf die frequenzabhängige Pegeldifferenzen ist zwar messbar (siehe Zusammenführung der Messergebnisse), aber weniger ausgeprägt als der gezeigte volumenabhängige Effekt. Unberücksichtigt bleibt außerdem der Einfluss zusätzlicher hochschallabsorbierender Materialien auf der Rückseite der Unterdecke. Der Vergleich zeigt zunächst nur die Ergebnisse der für das Vorhaben beschriebenen Auswahl von abgehängten Unterdecken. Für die Aufklärung weiterer Zusammenhänge unter Aufhebung der genannten Einschränkungen sind zukünftig weitere (simulative) Untersuchungen notwendig.

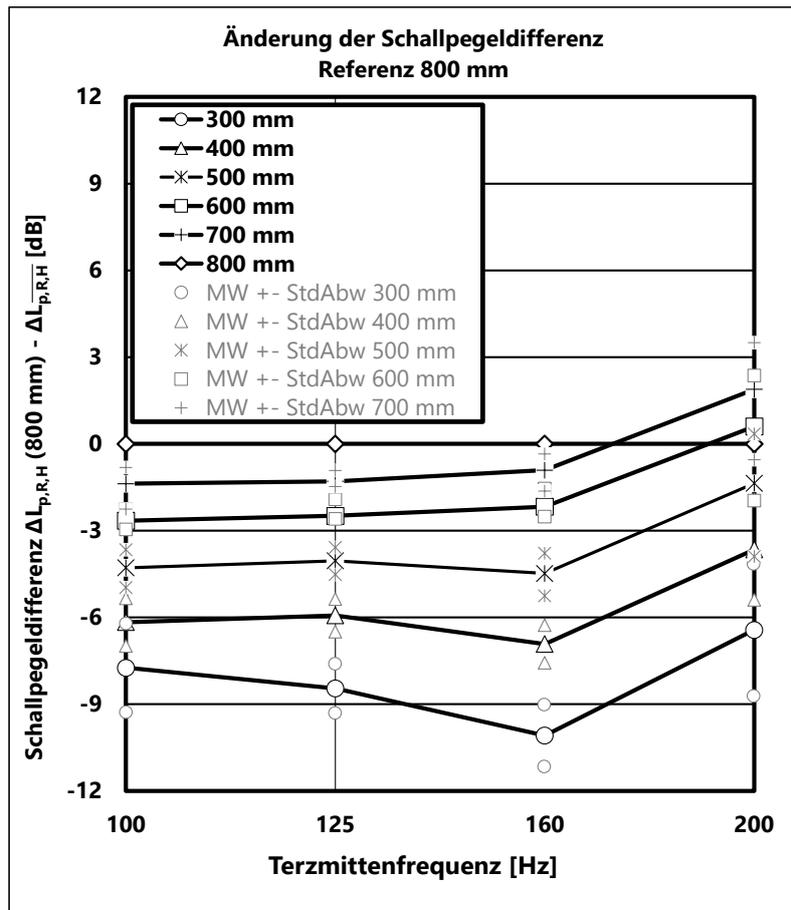
Prognosemodell

Der gezeigte Zusammenhang zwischen den Simulations- und Messergebnissen dient im Folgenden als Grundlage für ein Prognosemodell. Gemäß der Projektziele soll eine Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer von der Prüfung abweichenden Abhängehöhe (in der Praxis) ermöglicht werden. In einem ersten Schritt wird dazu zunächst eine Korrektur auf Basis der Messergebnisse und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen entwickelt.

Für die Korrektur einer nach Norm bei (z. B.) 800 mm Abhängehöhe gemessenen und frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz wird der Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz näher betrachtet. Hier hat die Abhängehöhe gemäß der Mess- und Simulationsergebnisse die größte Auswirkung auf das Messergebnis. Abbildung 17 zeigt in diesem Frequenzbereich eine nahezu parallele Verschiebung der Schalldruckpegeldifferenzen in Abhängigkeit der Abhängehöhe.

Abbildung 18 zeigt darüber hinaus die Abweichung der über alle Unterdecken¹ gemittelten Schalldruckpegeldifferenz $\Delta L_{\overline{p,R,H}}(f, x)$ zur Messung bei einer Abhängehöhe von 800 mm ($\Delta L_{p,R,H}(f, 800)$). Die tendenziell geringe Standardabweichung (graue Markierungen) der Messergebnisse gibt einen weiteren Hinweis auf die Allgemeingültigkeit der Messergebnisse für die Untersuchungsobjekte.

¹ Ausnahme: Metallkassette D, da kein kompletter Messumfang durchgeführt werden konnte



Quelle: IBP

Abbildung 18

Darstellung der Abweichung der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhängenhöhe bei einer Referenz-Abhängenhöhe von 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 200 Hz.

Auf Grund der horizontalen Parallelverschiebung wird aus dem jeweiligen Mittelwert ein Einzahlwert als Korrekturwert ermittelt. Dieser korrigiert das Messergebnis der Norm-Flankenpegeldifferenz im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz bei einer von 800 mm abweichende Abhängenhöhe (Ansatz A). Tabelle 3 zeigt zunächst die abgeleiteten Korrekturwerte $D_{n,f,korr(125-200)}$. Bei einer vorliegenden Messung der Norm-Flankenpegeldifferenz und einer Abhängenhöhe von 800 mm muss das Messergebnis zwischen 125 Hz und 200 Hz um 8,2 dB reduziert werden, um die Norm-Flankenpegeldifferenz bei 300 mm zu prognostizieren. Bei vorliegenden Messergebnissen mit einer Abhängenhöhe von 700 mm beträgt diese Korrektur -5,7 dB. Die Korrektur dieser Messung wird entsprechend über die Abhängenhöhe 700 mm als Referenz ermittelt (analog zu Abbildung 18). Mit diesem Vorgehen ist es ebenfalls möglich, auch für Messungen bei anderen Abhängenhöhen als 700 mm bzw. 800 mm Korrekturwerte zu bestimmen. Eine Übersicht über alle Korrekturwerte befindet sich in den Anlagen.

Tabelle 3

Tabellarische Übersicht der Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) aus der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhängöhe bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm bzw. 700 mm.

$D_{n,f,korr(125-200)}$ [dB]	x [mm]	800	700	600	500	400	300
	800	0	-0,4	-1,7	-3,5	-5,7	-8,2
	700	0,4	0	-1,3	-3,1	-5,2	-7,8

Für die rechnerische Ermittlung der Korrekturwerte werden Polynome 2ten Grades der prognostizierten Abhänghöhe x_{prog} ermittelt. Damit können auch Korrekturwerte stufenlos zwischen 300 mm und 800 mm interpoliert und, im begrenzten (nicht validiertem) Maße, darüber hinaus extrapoliert werden. Tabelle 4 zeigt die Koeffizienten (Bestimmtheitsmaß $R^2 > 99\%$) für die Ermittlung des Korrekturwertes für Messungen, die bei 700 mm bzw. 800 mm vorliegen. Die komplettierte Tabelle befindet sich ebenfalls in den Anlagen des Berichts.

Tabelle 4

Tabellarische Übersicht der Koeffizienten und Polynome (2ten Grades) zur Berechnung des Korrekturfaktors (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm und 700 mm.

x [mm]	$D_{n,f,korr(125-200)}$ [dB]	=	a_2	$\cdot x_{prog}^2$	+ a_1	$\cdot x_{prog}$	+ a_0
800	y_{800}	=	2,51786 10 ⁻⁵		-0,044467857		19,19502098
700	y_{700}	=	2,53571 10 ⁻⁵		-0,044578571		18,78002098

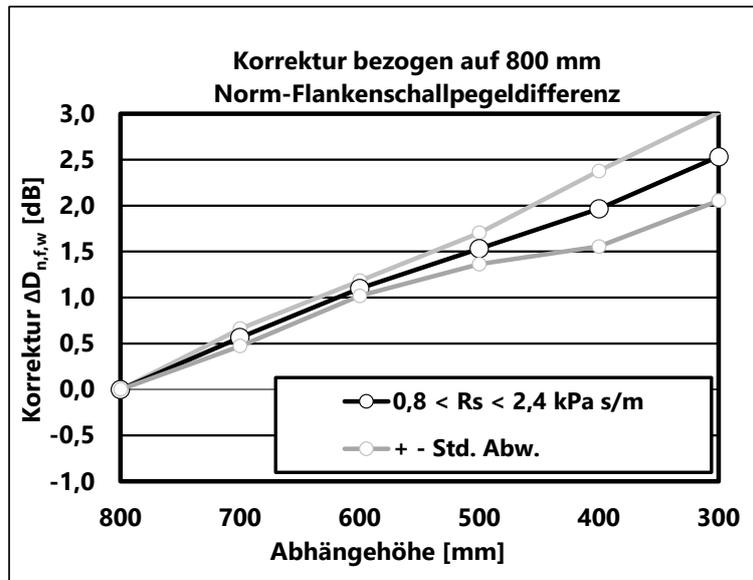
Tabelle 5 zeigt damit, dass die Korrekturwerte, die auf Basis der Messergebnisse entwickelt werden, im hohen Maße ($R^2 > 99\%$) mit den Prognosen der Korrekturwerte $D_{n,f,korr(125-200)}$ korrelieren.

Tabelle 5

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm.

$D_{n,f,korr(125-200)}$ [dB]	x_{prog} [mm]	800	700	600	500	400	300
Vergleich:							
Messungen	700	0,4	0	-1,3	-3,1	-5,2	-7,8
Prognose	700	1,0	0	-1,4	-3	-5	-7,3

Die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ bei Unterdecken mit einem höheren spezifischen Strömungswiderstand nimmt mit Verringerung der Abhänghöhe ab. Der Einzahlwert steigt jedoch bei Unterdecken mit optimalem spezifischem Strömungswiderstand (siehe Formel 15) an. Abbildung 19 zeigt die Änderung von $D_{n,f,w}$ ausgehend von einer Abhänghöhe von 800 mm. Dabei wird der Mittelwert der untersuchten Unterdecken mit optimalem spezifischem Strömungswiderstand (Mineralfaserplatten B bis D, vgl. Tabelle 1) in Schwarz, und die entsprechende Standardabweichung in Grau dargestellt. Trotz der geringen Datenbasis ist eine Tendenz zu erkennen.



Quelle: IBP

Abbildung 19

Abweichung der bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ in Abhängigkeit der Abhängehöhe bei einer Referenz-Abhängehöhe von 800 mm und optimalem Strömungswiderstand.

Dieser Zusammenhang kann mit dem Polynom ersten Grades in Formel 19 abgebildet werden. Die Ermittlung der Korrektur $D_{n,f,w,korr}$ gelingt durch das Einsetzen der abweichenden Abhängehöhe x_{prog} (Ansatz B). Bei einer Prognose ausgehend von einer Messung bei einer Abhängehöhe von 700 mm wird der Korrekturterm mit $D_{n,f,w,korr} = y_{xprog} - y_{700}$ (mit bspw. $y_{xprog} = D_{n,f,w,korr}$ bei 300 mm = y_{300}) bestimmt. Der berechnete Korrekturwert $D_{n,f,w,korr}$ wird schließlich dem gemessenen Einzahlwert $D_{n,f,w}$ aufgeschlagen.

$$y_{800} = D_{n,f,w,korr} = a_1 \cdot x_{prog} + a_0 \quad [-] \quad \text{Formel 19}$$

$$= -0,0049428571 \cdot x_{prog} + 4,0019047619$$

mit

y_{800} = Korrekturwert für bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz [dB]

Die beiden vorgestellten Prognoseverfahren bildet jeweils eine Möglichkeit, um die Abweichungen der (bewerteten) Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei von der Norm abweichenden Abhängehöhen ($x < 700$ mm) zu prognostizieren. Da die Prognose bei abgehängten Unterdecken, deren spezifischer Strömungswiderstand $0,8 < R_s < 2,4$ kPa s/m beträgt, mit Ansatz A nicht gelingt, wird mit Ansatz B eine mögliche frequenzunabhängige Korrektur des Einzahlwertes vorgeschlagen.

Validierung

Für die Validierung werden zunächst die Messergebnisse herangezogen, die auch zur Entwicklung des Prognosemodells genutzt wurden. Damit wird eine maximal mögliche Güte der Prognose herausgestellt. Eine exakte Übereinstimmung ist dabei nicht zu erwarten, da die Prognose bereits auf gemittelten Messergebnissen basiert. Daran anschließend werden Messungen der Prüfstelle am IBP für eine Validierung herangezogen, die nicht zur Entwicklung des Prognosemodells genutzt wurden. Damit wird die Anwendung auf andere abgehängte Unterdecken bewertet.

Zunächst werden die Ergebnisse der Norm-Flankenschallpegeldifferenz (Einzahlwert $D_{n,f,w}$) der Mineralfaserplatte A im Vergleich zu den Prognoseergebnissen in Tabelle 6 dargestellt. Die Abweichung

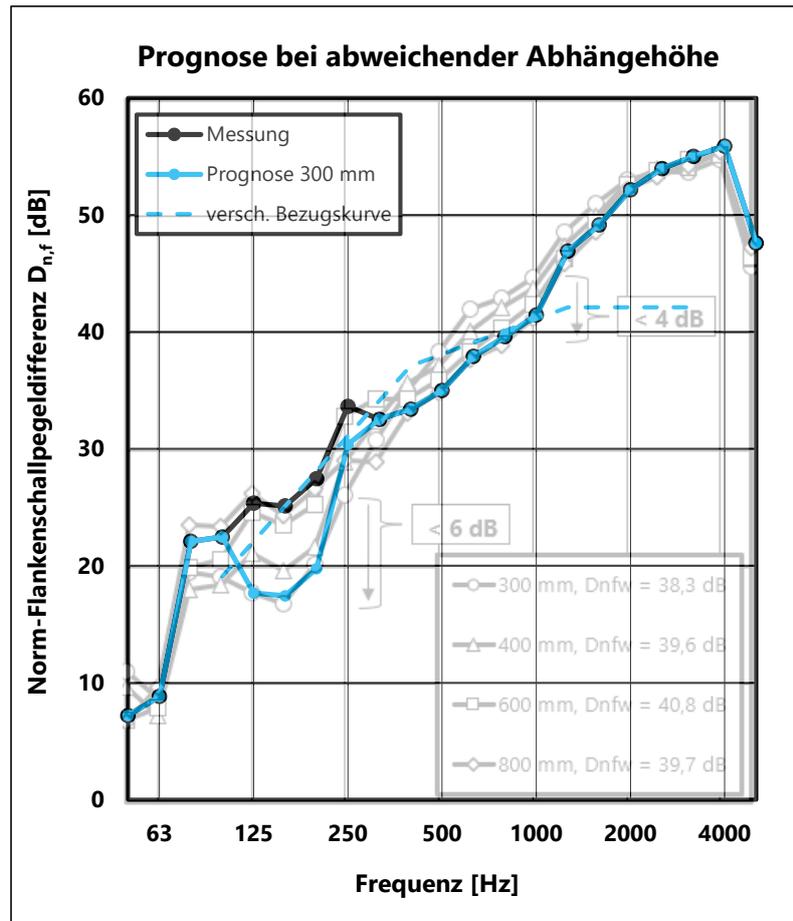
zwischen Messung und Prognose liegen bei $\Delta D_{n,f,w} < 1$ dB und damit unterhalb der bei der Prüfung nach DIN EN ISO 10848-2 anzugebenen Messunsicherheit von $\pm 1,2$ dB. In diesem Fall kann die Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer von der Prüfung abweichende Abhängehöhe innerhalb dieses Grenzwertes ausreichend genau prognostiziert werden.

Tabelle 6

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 700 mm nach Ansatz A.

$D_{n,f,w}$ [dB] Vergleich: Mineralfaserplatte A	x [mm]	800	700	600	500	400	300
Messergebnis		39,7	40,7	40,8	40,8	39,6	38,3
Prognose		40,6	40,7	40,4	39,9	39,1	38,2
$\Delta D_{n,f,w}$		0,9	0	0,4	0,9	0,5	0,1

Für die folgenden Vergleiche werden die frequenzabhängigen Messergebnisse in der bekannten Darstellung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz als transparente Kurven im Hintergrund aufgetragen. Im Vordergrund ist in Schwarz das Messergebnis bei (hier) 700 mm zu sehen, während die Prognose und die damit berechnete verschobene Bezugskurve zur Ermittlung des Einzahlwertes in Blau dargestellt wird. Abbildung 20 zeigt beispielhaft das Prognoseergebnis der Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A für eine Abhängehöhe von 300 mm (Blau) ausgehend von der Messung bei 700 mm. Anhand dieser Darstellung kann gezeigt werden, dass die frequenzabhängige Korrektur dem Verlauf des Messergebnisses zwischen 125 Hz und 200 Hz angenähert und anhand der Prognose, die im Vergleich erhöhte Schallübertragung in diesem Frequenzbereich abgebildet werden kann.



Quelle: IBP

Abbildung 20

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte A bei einer Abhänghöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhänghöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhänghöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet.

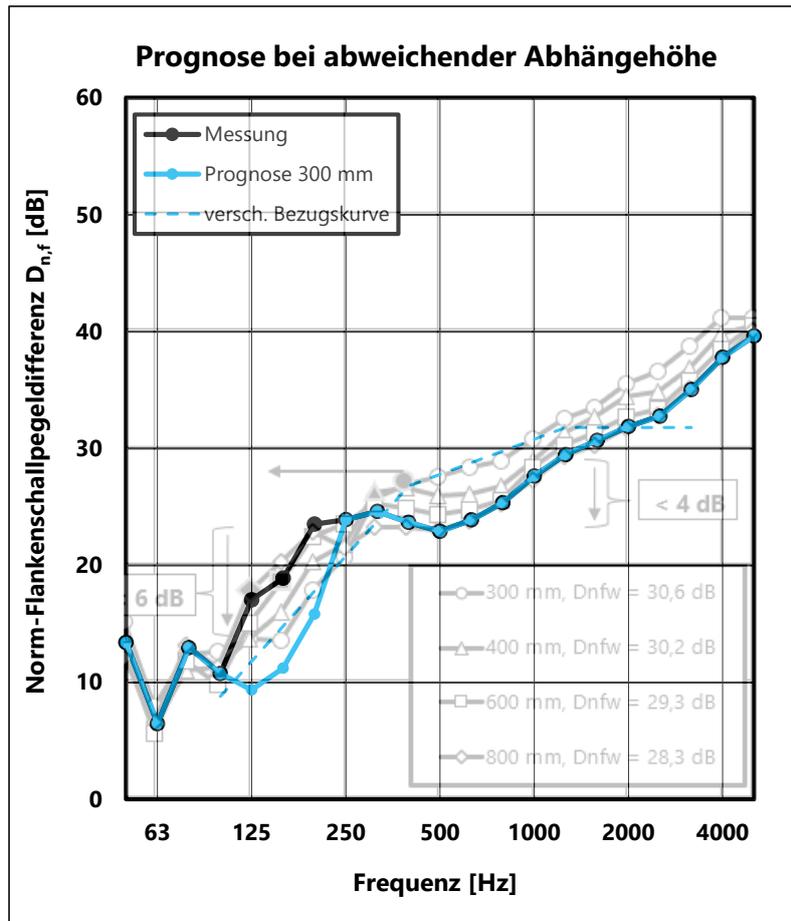
Tabelle 7 zeigt den Vergleich der Mess- und Prognoseergebnisse der Mineralfaserplatte B. Im Vergleich zur Mineralfaserplatte A weist diese Unterdecke einen geringen und für Schallabsorber mit Wandabstand optimalen Strömungswiderstand auf ($R_s \approx 1,2$ kPa s/m). Dies führt im Vergleich mit einer akustisch dichteren Unterdecken zu einer geringeren Norm-Flankenschallpegeldifferenz. Außerdem ist der Schallabsorptionsgrad abhängig von der Abhänghöhe. Das Prognosemodell basiert auf Messungen der Norm-Flankenschallpegeldifferenz und vernachlässigt den Effekt der Schallabsorption bei unterschiedlichen Abhänghöhen. Dadurch gelingt eine Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei geringen Abhänghöhen weniger genau als für Mineralfaserplatte A ($\Delta D_{n,f,w}$ bis zu 2,8 dB). Festzustellen ist dabei, dass es dabei zu einer Unterschätzung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz kommen kann. Daher ist zumindest eine Überschätzung des Schallschutzes ausgeschlossen.

Tabelle 7

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte B für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 700 mm nach Ansatz A.

$D_{n,f,w}$ [dB] Vergleich: Mineralfaserplatte B	x [mm]	800	700	600	500	400	300
Messergebnis		28,3	28,8	29,3	29,9	30,2	30,6
Prognose		28,8	28,8	28,8	28,8	28,5	27,8
$\Delta D_{n,f,w}$		0,5	0	0,5	1,1	1,7	2,8

Abbildung 21 zeigt beispielhaft den Vergleich der Messung mit der Prognose bei 300 mm ausgehend von der Messung bei 700 mm von Mineralfaserplatte B. Dieser Vergleich zeigt ebenfalls die Unterschätzung der Prognose im Vergleich zur Messung. Diese wird besonders im Frequenzbereich oberhalb von 250 Hz deutlich, in dem keine Korrektur mit Ansatz A durchgeführt wird.



Quelle: IBP

Abbildung 21

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte B bei einer Abhängehöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet.

Alternativ dazu kann mit Ansatz B für Unterdecken mit optimalem Strömungswiderstand anhand Tabelle 8 gezeigt werden, dass die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz in diesem Fall besser angenähert werden können.

Tabelle 8

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 700 mm nach Ansatz B.

$D_{n,f,w}$ [dB] Vergleich: Mineralfaserplatte B	x [mm]	800	700	600	500	400	300
Messergebnis		28,3	28,8	29,3	29,9	30,2	30,6
Prognose		28,3	28,8	29,3	29,8	30,3	30,8
$\Delta D_{n,f,w}$		0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2

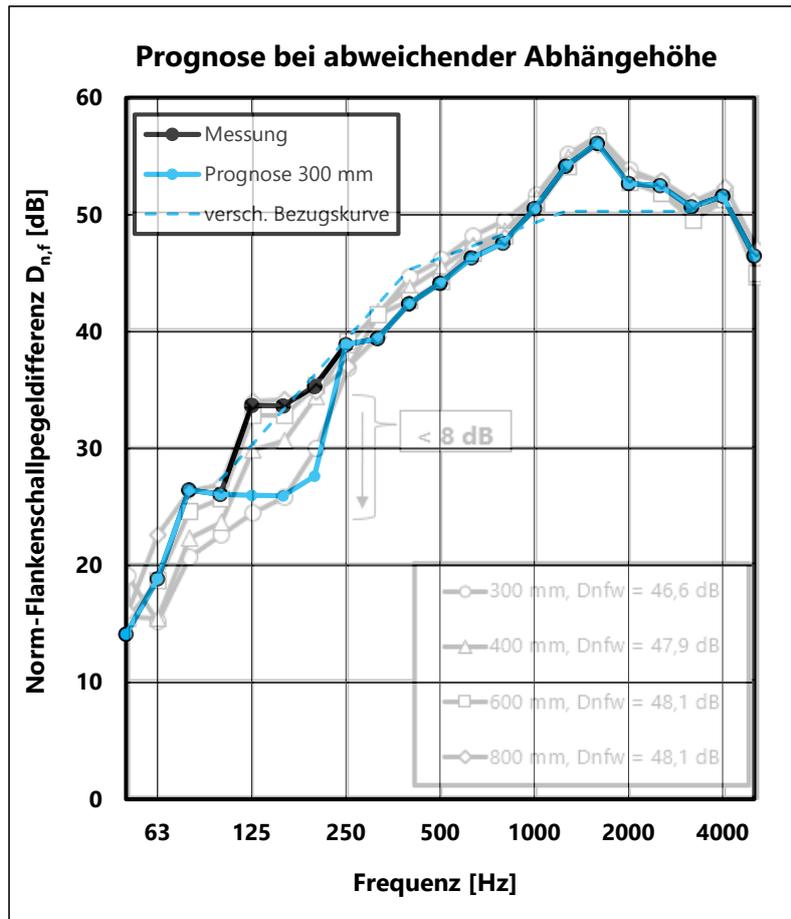
Im Vergleich zu Mineralfaserplatte B weist die Metallkassette A konstruktionsbedingt einen hohen Strömungswiderstand auf. Diese Eigenschaft ist demnach eher mit Mineralfaserplatte A vergleichbar. Die Prognose gelingt mit einer vergleichbaren und ausreichenden Qualität ($\Delta D_{n,f,w} \leq 0,8$ dB), wie in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Metallkassette A für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 700 mm nach Ansatz B.

$D_{n,f,w}$ [dB] Vergleich: Metallkassette A	x [mm]	800	700	600	500	400	300
Messergebnis		48,1	48,2	48,1	48,3	47,9	46,6
Prognose		48,1	48,2	48,0	47,6	47,1	46,3
$\Delta D_{n,f,w}$		0	0	0,1	0,7	0,8	0,3

Abbildung 22 zeigt die Norm-Flankenschallpegel frequenzabhängig. Sie bestätigen die Beobachtungen zur Prognose der Mineralfaserplatte A. Mit der entwickelten Prognose kann im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz die Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer nicht Norm-konformen Abhängehöhe abgeschätzt werden.

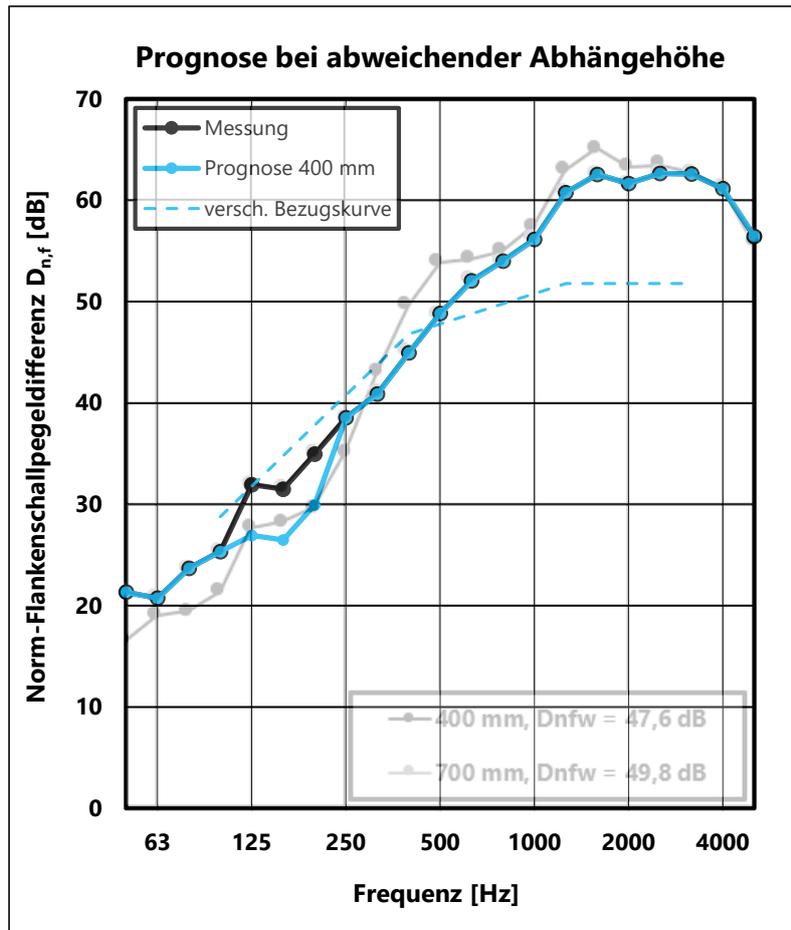


Quelle: IBP

Abbildung 22

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette A bei einer Abhänghöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhänghöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhänghöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet.

Der Vergleich der Prognoseergebnisse mit der Messung der Norm-Flankenschallpegeldifferenz anhand des durchgeführten Messumfangs zeigt bereits, dass grundsätzlich eine wesentliche Abhängigkeit des Messwertes $D_{n,f}$ zur Abhänghöhe für die Prognose genutzt werden kann. Für einen weiteren Vergleich stehen Messungen von drei verschiedenen Deckensystemen aus der bauakustischen Prüfstelle des IBP zur Verfügung. Neben den bereits vorgestellten Unterdecken aus gepresster Holzwohle und gelochtem Gipskarton wird zunächst die Prognose eines weiteren Unterdeckensystem betrachtet. Dabei steht eine Unterdecke aus Metallkassetten mit einem vergleichbaren Aufbau wie Metallkassette B im Fokus. Abbildung 23 zeigt die Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz (in Blau) im Vergleich zur zu Grunde liegenden Messung bei 700 mm sowie der Messung bei 400 mm Abhänghöhe.



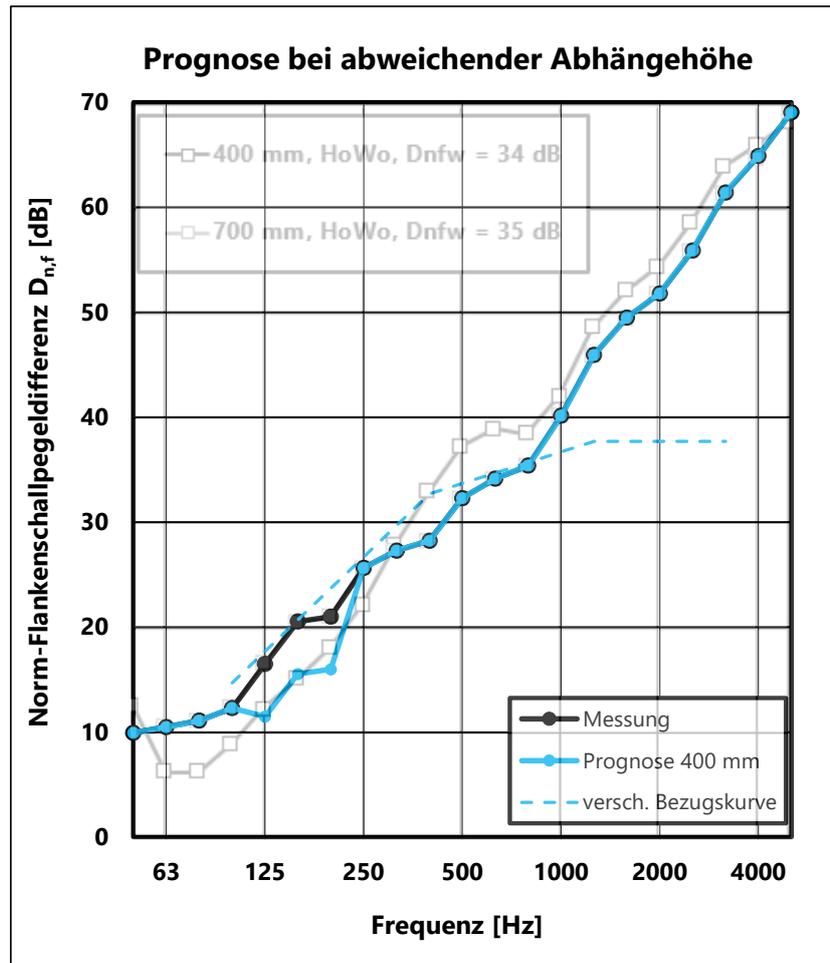
Quelle: IBP

Abbildung 23

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus Metallkassetten (Archiv IBP) bei einer Abhänghöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhänghöhe von 700 mm (in Schwarz).

Es kann gezeigt werden, dass die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei 400 mm mit $D_{n,f,w} = 47,6$ dB um 0,2 dB geringer ausfällt als die Prognose mit $D_{n,f,w} = 49,8$ dB. Die Messergebnisse überschreiten dabei den Grenzwert der Messunsicherheit ($\pm 1,2$ dB), während die Prognose diese deutlich unterschreitet. Damit ist davon auszugehen, dass die Prognose ausreichend genau gelingt. Da diese Messungen nicht für die Entwicklung des Prognosemodells herangezogen wurden, unterstreicht dieses Ergebnis die Tendenz einer Allgemeingültigkeit für die Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Unterdecken mit einem hohen Strömungswiderstand.

Der Vergleich der Messergebnisse mit der Prognose der Unterdecke aus gepresster Holzwole bestätigt diese Beobachtung weiter. Auch hier wird die Messung und Prognose bei einer Abhänghöhe von 400 mm verglichen. Ausgehend von einer bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 35,2$ dB bei 700 mm wird bei 400 mm ein $D_{n,f,w}$ von 34,1 dB gemessen sowie ein $D_{n,f,w}$ von 33,7 dB prognostiziert. Dementsprechend ist es sinnvoll die Prognose bei 400 mm für die Planung mit dieser Abhänghöhe dem Messwert bei 700 mm (nach Norm) vorzuziehen, um Schallschutzmängel zu vermeiden. Abbildung 24 zeigt das frequenzabhängige Mess- und Prognoseergebnis. Im korrigierten Frequenzbereich gelingt eine Annäherung der gemessenen und prognostizierten Verläufe.



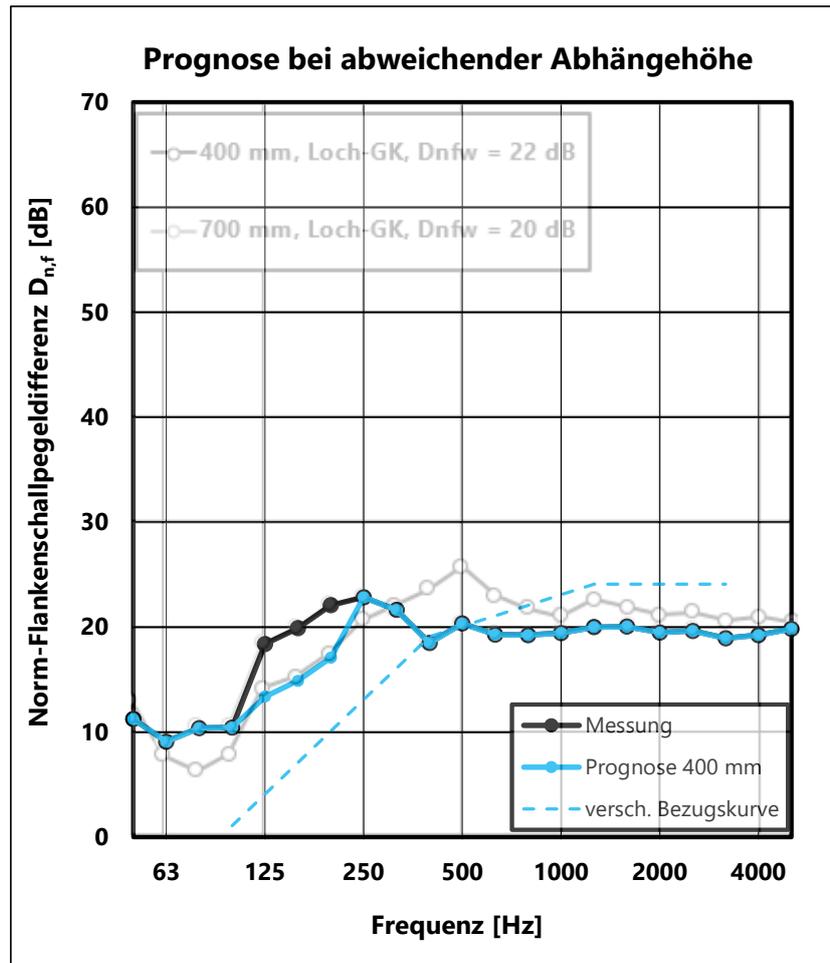
Quelle: IBP

Abbildung 24

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus gepresster Holzfaser bei einer Abhängehöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz).

Schließlich wird mit der Unterdecke aus gelochtem Gipskarton noch einmal die Grenze der Prognose mit Ansatz A aufgezeigt. Für diese Unterdecke gelingt die Prognose nicht ausreichend genau. Bei 700 mm liegt eine bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 20,1$ dB vor, während sich diese bei 400 mm auf $D_{n,f,w} = 22,3$ dB erhöht.

Der Grund für die Erhöhung ist die Abhängigkeit der Norm-Flankenpegeldifferenzen von der Schallabsorption der Unterdecke. Diese ist, wie bereits festgestellt, dann von der Abhängehöhe abhängig, wenn der Strömungswiderstand für poröse Schallabsorber mit Wandabstand optimal ist. Für eine perforierte, für Schall durchlässige Unterdecke aus gelochtem Gipskarton ist dieses Verhalten zu beobachten. Abbildung 25 zeigt, dass die Messkurve bei einer Abhängehöhe von 400 mm im Frequenzbereich ab 250 Hz (also oberhalb der Korrektur durch die Prognose nach Ansatz A) eine höhere Norm-Flankenschallpegeldifferenz bestätigt. Bei Unterdecken mit einem hohen Strömungswiderstand ist dieser Unterschied in diesem Frequenzbereich kaum bis nicht ausgeprägt. Trotzdem führt er zu einer Erhöhung der bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz auf $D_{n,f,w} = 22,3$ dB, während die Prognose diese mit $D_{n,f,w} = 20,1$ dB nicht abbilden kann.



Quelle: IBP

Abbildung 25

Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus perforiertem Gipskarton bei einer Abhänghöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhänghöhe von 700 mm (in Schwarz).

Mit den gezeigten Vergleichen der Messergebnisse mit der Prognose, sowohl mit den im Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen als auch anhand von Archivmessungen der bauakustischen Prüfstelle am IBP kann gezeigt werden, dass die Prognose für abgehängte Unterdecken mit einem hohen Strömungswiderstand mit Ansatz A in einer ausreichenden Qualität gelingt. Für abgehängte Unterdecken mit einem für Schallabsorber mit Wandabstand optimalen Strömungswiderstand von $0,8 R_s < 2,4 \text{ kPa s/m}$ (z. B. perforierte Gipskartonplatten, Mineralfaserplatte B) gelingt die Prognose nicht ausreichend genau. Für abgehängte Unterdecken, die durch diese Materialeigenschaft eher die schallabsorbierende Eigenschaften im Senderaum verbessern sollen, kann auf die Abhängigkeit der bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz gemäß Ansatz B zurückgegriffen werden.

Am Beispiel der Messergebnisse der Unterdecke aus gelochtem Gipskarton (siehe Abbildung 25) kann die Qualität der Prognose nach Ansatz B festgestellt werden. Demnach erhöht sich die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Messung bei einer Abhänghöhe von 400 mm um $\Delta D_{n,f,w}$ von ca. 1,5 dB ausgehend von einer Messung bei einer Abhänghöhe von 700 mm. Die bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 20,1 \text{ dB}$ erhöht sich demnach auf $D_{n,f,w} = 21,6$. Diese Prognose des Einzahlwertes entspricht dem Messwert von $D_{n,f,w} = 22,3 \text{ dB}$ tendenziell eher als die Prognose nach Ansatz A ($D_{n,f,w} = 20,1 \text{ dB}$). Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse in einer Übersicht.

Tabelle 10

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz einer Unterdecke aus gelochtem Gipskarton für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 700 mm nach Ansatz B.

$D_{n,f,w}$ [dB] Vergleich: Gipskarton (gelocht)	x [mm]	700	400
Messergebnis		20,1	22,3
Prognose		20,1	21,6
$\Delta D_{n,f,w}$		0	0,7

Der Vergleich der Mess- und Prognoseergebnisse stellt zwei Verfahren zur Prognose der (bewerteten) Norm-Flankenschallpegeldifferenz ausgehend von Messungen bei einer normgerechten Abhängehöhe von 700 mm bzw. 800 mm vor. Beide Prognoseverfahren konnten empirisch auf der durchgeführten Messreihe ermittelt und mit ersten, zusätzlichen Messungen validiert werden. Für die hier vorgestellten Vergleiche kann eine Prognose bei abweichenden Abhängehöhen in einer ausreichenden Qualität bestätigt werden.

Leitfaden für die Akustik abgehängter Unterdecken

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden als Leitfaden für die Praxis zusammengefasst. Damit gelingt eine Einordnung der zu erwartenden Änderung der Norm-Flankenpegeldifferenz, wenn die Abhängehöhe in der Praxis von der bei der Prüfung nach Norm im Labor abweicht.

Geltungsbereich

Die im folgenden beschriebenen Anwendungsfälle betrachten einen Einbauzustand, bei dem der Deckenhohlraum einer abgehängte Unterdecke auch in der Praxis durch keine begrenzende Wand bzw. ein Schott getrennt wird. Zwei (oder mehr) Räume sind also mit einer durchgehenden Unterdecke verbunden. Anhand der Messergebnisse der im Forschungsprojekt untersuchten Unterdecken kann eine Unterteilung in zwei Kategorien erfolgen. Der spezifische Strömungswiderstand bildet dafür die grundlegende Materialeigenschaft².

Hoher spezifischer Strömungswiderstand

$R_s > 2,4 \text{ kPa s/m}$

Abgehängte Unterdecken dieser Kategorie zeichnen sich durch mindestens eine Schicht aus besonders dichtem Material mit erhöhtem spezifischen Strömungswiderstand aus. Hierzu zählen bspw. abgehängte Unterdecken aus Metallkassetten, deren Rückseite mit Gipskartonplatten abgedeckt wird. Bei Unterdecken dieser Art wird der Schalldurchgang dadurch auf ein Minimum reduziert oder verhindert. Eingelegte Schallabsorber (z. B. aus nicht gepresster Mineralfaser) werden für die schallabsorbierende Wirkung verwendet. Das als Decke sichtbare Metall wirkt je nach Lochung und integrierter thermischer Aktivierung (z. B. durch Rohrmäander) auf das schallabsorbierende Verhalten. Aber auch ausreichend dicht gepresste Mineral- bzw. Holzfaserplatten fallen in diese Kategorie. Eine erhöhte Dichte oder Dicke dieser Deckenelemente sowie mögliche zusätzliche Vliese oder Anstriche führt zu einer Erhöhung des Strömungswiderstands.

Der Schallabsorptionsgrad kann im Hallraum unabhängig von der Abhängehöhe bestimmt werden. Die nach DIN EN ISO 10848-2 geforderte Abhängehöhe (700 mm bzw. 800 mm) im Unterdeckenprüfstand ergibt die im Vergleich maximale bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz im Einzahlwert $D_{n,f,w}$. Eine geringere Abhängehöhe kann zu einer im Vergleich höheren und frequenzspezifischen Schallübertragung zwischen den Räumen führen (z. B. menschliche Sprache mit Grundfrequenzbereich $< 500 \text{ Hz}$). Bei einer entsprechenden Raumnutzung (z. B. als Büro) kann durch eine nicht normgerechte Abhängehöhe ein Schallschutzmangel entstehen.

Um das Schallschutzrisiko bei nicht normgerechten Abhängehöhen zu reduzieren, ist bei der Auswahl des Deckensystems entsprechend auf die frequenzspezifische Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f}$ unterhalb von 500 Hz zu achten. Eine pauschale Aussage darüber, inwieweit ein höherer Einzahlwert $D_{n,f,w}$ dem Schallschutzrisiko entgegenwirken kann, ist wegen der Frequenzabhängigkeit nicht möglich.

Optimaler spezifischer Strömungswiderstand

$0,8 < R_s < 2,4 \text{ kPa s/m}$

Abgehängte Unterdecken dieser Kategorie bestehen typischerweise aus gepresster Mineral- oder Holzfaser sowie perforierten Gipskartonplatten. Der Schallabsorptionsgrad kann im Hallraum nicht unabhängig von der Abhängehöhe bestimmt werden. Eine Abhängehöhe von 300 mm ergibt tendenziell den im Vergleich maximalen bewerteten Schallabsorptionsgrad im Einzahlwert $\alpha_{w,k}$. Größere Abhängehöhen verringern den

² Abgehängte Unterdecken mit rückseitiger Auflage eines hochschallabsorbierenden Materials (z. B. Mineralwolle) sind auf Grund ihrer besonderen akustischen Eigenschaften zunächst auszuschließen.

Einzahlwert $\alpha_{w,k}$, aber erhöhen die Schallabsorption im Frequenzbereich unter 500 Hz gemäß dem Verhalten eines porösen Schallabsorbers mit Wandabstand.

Der Einfluss der Abhängehöhe auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz kann für Unterdecken dieser Kategorie nachgewiesen werden. Mit Verkleinerung der Abhängehöhe erhöht sich diese im bewerteten Einzahlwert $D_{n,f,w}$. Die nach DIN EN ISO 10848-2 geforderte normgerechte Abhängehöhe (700 mm bzw. 800 mm) ergibt die im Vergleich minimale bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz. Die Norm-Flankenschallpegeldifferenz steigt mit zunehmender Abhängehöhe im Frequenzbereich unter 500 Hz tendenziell an, nimmt jedoch im Frequenzbereich über 500 Hz tendenziell ab. Eine geringere Abhängehöhe als nach DIN EN ISO 10848-2 gefordert führt in der Praxis also zu einer Verbesserung des Einzahlwertes $D_{n,f,w}$, erhöht aber ebenfalls die frequenzspezifische Schallübertragung zwischen den Räumen (z. B. menschliche Sprache mit Grundfrequenzbereich < 500 Hz). Bei einer entsprechenden Raumnutzung (z. B. als Büro) kann durch eine nicht normgerechte Abhängehöhe ein Schallschutzmangel entstehen. Diese Abhängigkeit zur Abhängehöhe ist also für beide Kategorien erkennbar.

Tutorial Excel-Werkzeug

Allgemeine Hinweise

Das vorliegende Excel-basierte digitale Werkzeug (*Dnf_Prognose_f1.xlsx*) basiert auf den empirischen Erkenntnissen des "Zukunft-Bau"-Forschungsvorhabens "Akustik von Unterdecken". Ziel ist es, die (bewertete) Norm-Flankenschallpegeldifferenz von abgehängten Unterdecken abzuschätzen, wenn die geplante Abhängehöhe in der Praxis von der nach DIN 10848-2 geprüften Abhängehöhe (700 mm und 800 mm) abweicht. Dazu sind zwei Prognoseansätze basierend auf den Messungen des Forschungsprojektes (siehe Projektbericht) implementiert. Diese unterscheiden sich in Bezug auf den spezifischen Strömungswiderstand der abgehängten Unterdecke. Dieser konnte im Sinne des Ziels als (eine) maßgebliche Materialeigenschaft herausgestellt werden.

Mit dem digitalen Werkzeug kann die Terz-frequenzabhängige Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f}$ sowie der bewertete Einzahlwert $D_{n,f,w}$ für abgehängte Unterdecken mit einem spezifischen Strömungswiderstand $R_s > 2,4$ kPa s/m abgeschätzt werden. Für abgehängte Unterdecken mit einem spezifischen Strömungswiderstand zwischen $0,8 < R_s < 2,4$ kPa s/m gelingt die Abschätzung für den bewerteten Einzahlwert $D_{n,f,w}$.

Schritt 1: Eingabe der Messdaten

Für die Abschätzung der (bewerteten) Norm-Flankenschallpegeldifferenz wird eine Messung bei einer normgerechten Abhängehöhe von $x = 700$ mm oder $x = 800$ mm vorausgesetzt. Die Ergebnisse der Messung sind neben der Abhängehöhe im ersten Schritt in die blauen Zellen einzutragen.

Schritt 2: Festlegung der Abhängehöhe

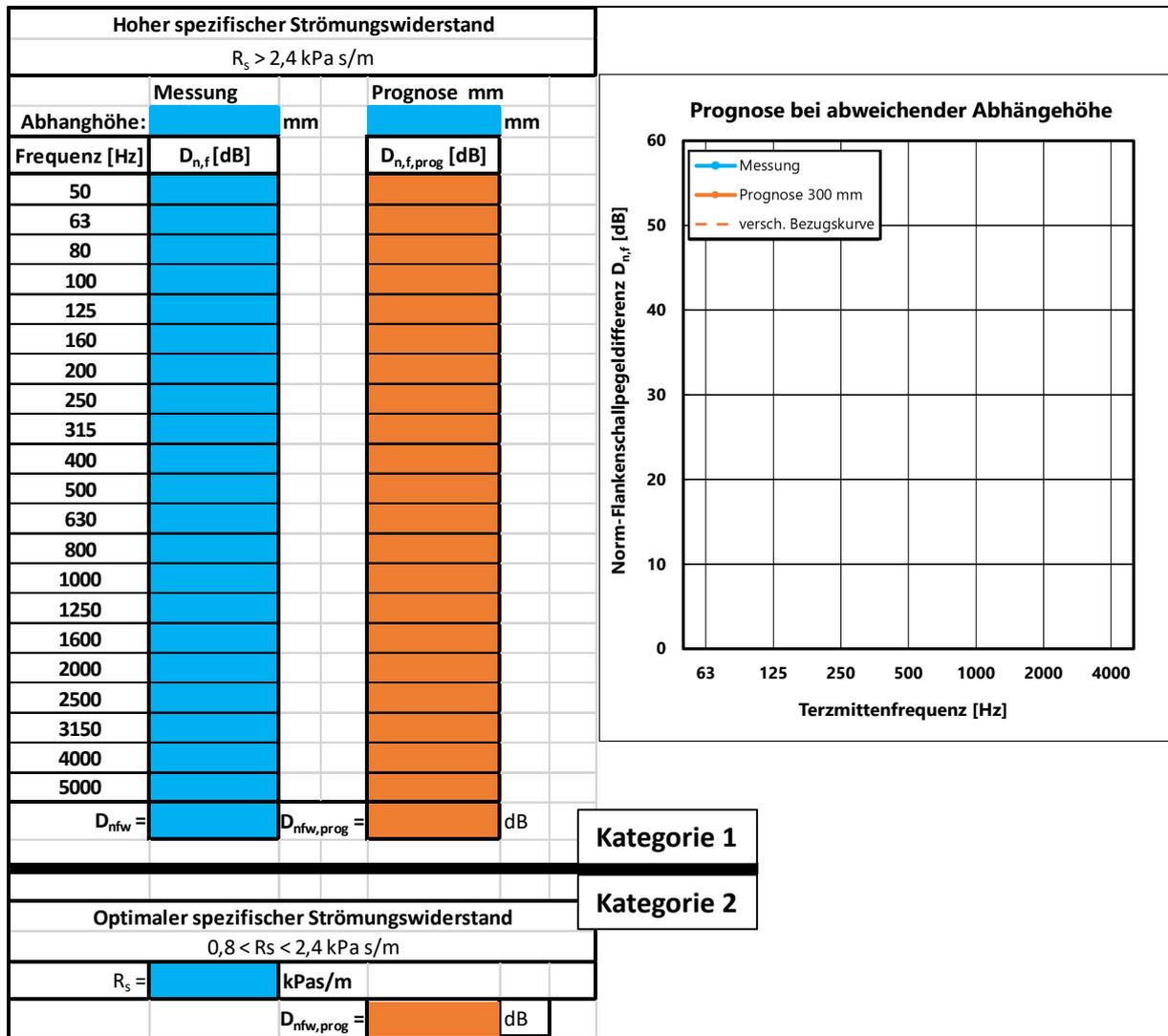
Im zweiten Schritt ist festzulegen, bei welcher Abhängehöhe die (bewertete) Norm-Flankenschallpegeldifferenz ausgehend von der Messung abgeschätzt werden soll.

Schritt 3: Auswahl der Prognose und Ergebnisausgabe

Wie in den allgemeinen Hinweisen beschrieben, wird zwischen zwei Kategorien des spezifischen Strömungswiderstandes R_s unterschieden. Aus diesem Grund ist das Ergebnis der Prognose abhängig von der Eingabe eines spezifischen Strömungswiderstandes und der Einordnung in die jeweilige Kategorie (siehe Abbildung 26).

Ist im Feld R_s ein hoher Strömungswiderstand $R_s > 2,4$ kPa s/m angegeben, erscheint das (Terz-frequenzabhängige) Prognoseergebnis im farblich in Orange markierten Ausgabefeld der ersten Kategorie (oben).

Ist ein für poröse Schallabsorber mit Wandabstand optimaler spezifischer Strömungswiderstand zwischen $0,8 < R_s < 2,4$ kPa s/m angegeben, erscheint die Prognose der bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz im farblich Orange markierten Ausgabefeld der zweiten Kategorie (unten).



Quelle: IBP

Abbildung 26 Darstellung des Eingabe- (linke Spalte) und Ausgabebereichs (rechte Spalte und Diagramm rechts) des digitalen, Excel-basierten Prognosewerkzeugs zur Berechnung der abweichenden (bewerteten) Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei unterschiedlichen Abhänghöhen.

Bewertung der Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext

Das vorgestellte Forschungsprojekt beinhaltet eine systematische Untersuchung darüber, wie sich die Abhängöhe von Unterdecken auf die Schallabsorption und die Norm-Flankenschallpegeldifferenz auswirkt. Dabei werden, basierend auf den Mess- und Simulationsergebnissen, Erkenntnisse präsentiert, wie eine von der jeweiligen Prüfnorm abweichende Abhängöhe in der Praxis (am Bau) die Akustik abgehängter Unterdecken beeinflussen kann. Der erstellte Leitfaden und ein digitales Prognosewerkzeug können für Planungssicherheit sorgen, Hersteller bei der Entwicklung akustisch optimierter Produkte unterstützen und das Risiko für einen Schallschutzmangel reduzieren. Durch den Einsatz in der Praxis ist zukünftig die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse sowie die Qualität der Ergebnisse weiter herauszustellen.

Anhand der systematischen Untersuchung an repräsentativen Unterdeckensystemen wird der Einfluss der Abhängöhe auf die akustischen Eigenschaften deutlich. Dabei stehen insbesondere Abhänghöhen im Fokus, die bei der akustischen Prüfung der jeweils anderen akustischen Größe (Schallabsorption oder Norm-Flankenschallpegeldifferenz) im Labor nicht vorgesehen sind. Dafür wird der Einfluss der Abhänghöhe von 300 mm bis 800 mm (in 100 mm Schritten) auf die Norm-Flankenschallpegeldifferenz und die Schallabsorption abgehängter Unterdecken aufgezeigt. Zwei wesentliche Forschungsfragen 1. und 2. werden damit mit einer Einschränkung beantwortet: Die Abhänghöhe unterhalb von 300 mm konnte mit der umfangreichen und notwendigen Messtechnik im Deckenhohlraum nicht realisiert werden. Da die Ergebnisse trotzdem für beide Größen bei gleichen Abhänghöhen vorliegen, ist eine Einordnung bzw. eine Ableitung des Einflusses der Abhänghöhe auf beide akustischen Eigenschaften im Sinne der Projektziele trotzdem möglich.

Darüber hinaus werden im Projektverlauf bereits bekannte Berechnungsmodelle näher betrachtet. Ein maßgeblicher Parameter für den Schalleintrag in den Deckenhohlraum stellt der Transmissionsgrad dar. Anhand des Vergleichs wird deutlich, dass die Ermittlung des Transmissionsgrades (pro Unterdecke) im Unterdeckenprüfstand und im Hallraum durch die zusätzliche Messtechnik im Deckenhohlraum sowie mit den zusätzlichen Messungen im Fensterprüfstand nicht in ausreichender Qualität gelingt. Eine zusätzlich zur Prüfpraxis durchzuführende Messung des Transmissionsgrades ist also nicht möglich. Daher liegt der Transmissionsgrad als eine wesentliche Berechnungsgrundlage für ein Prognosemodell nach MARINER und MECHEL nicht vor. Ausblickend sind Mess- und Simulationsumfänge notwendig, die die Ermittlung des Transmissionsgrades abhängig vom Schallfeld im Deckenhohlraum ermöglichen.

Alternativ zu den Ansätzen nach MARINER und MECHEL wird ein Prognosemodell basierend auf den Messergebnissen vorgestellt. Es berücksichtigt zwei Kategorien von Unterdecken, die sich im Wesentlichen in ihrem spezifischen Strömungswiderstand unterscheiden. Dieser Parameter vereint beide Untersuchungsgrößen: Norm-Flankenschallpegeldifferenz und Schallabsorptionsgrad. So wird eine Prognose der Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei von der Prüfnorm abweichenden Abhänghöhen auch in Abhängigkeit des Schallabsorptionsgrades ermöglicht.

Die dritte Forschungsfrage ist damit schließlich beantwortet: Eine Berechnung der Norm-Flankenpegeldifferenz kann mit dem Prognosemodell nach MARINER und MECHEL auf Grund fehlender Eingangsdaten nicht validiert werden. Das Ziel, einfache Formeln zur Übertragung der Prüfstandswerte auf reale Bauten empirisch abzuleiten und als Rechentool zur Verfügung zu stellen, gelingt daher durch einen alternativen Ansatz. Durch die Prognose wird die (bewertete) Norm-Flankenschallpegeldifferenz für die in der Praxis geplante Abhänghöhe angenähert. Damit kann einem Schallschutzmangel insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 250 Hz vorgebeugt werden. Erste Simulationsumfänge und Validierungen mit Messungen der bauakustischen Prüfstelle am IBP zeigen eine ausreichende Ergebnisqualität. Ausblickend sollten jedoch sowohl Simulations- als auch Validierungsumfänge erweitert werden, um die Qualität der Prognose weiter zu steigern.

Wissenschaftliche Abschlussfähigkeit

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP führt akustische Prüfungen an abgehängten Unterdecken durch. Bei den Industriepartnern handelt es sich um Hersteller und Bauunternehmer entsprechender Produkte. Beide Seiten profitieren von dem vorgestellten Leitfaden und einem Berechnungstool, um für mehr Planungssicherheit zu sorgen. Die Industriepartner besitzen jeweils die nötigen Fertigungsressourcen, um die abgehängten Unterdecken zu produzieren.

Es kann gezeigt werden, dass für eine bessere, rechnerische Prognose weitere Untersuchungen notwendig sind. Dabei sind Methoden und Messumfänge zu entwickeln, um noch nicht eindeutig messbare Parameter, wie dem Schallfeld im Deckenhohlraum und dem Schalltransmissionsgrad, zu bestimmen. Nach weiteren Untersuchungen ist es denkbar, dass die Industriepartner ein weiterentwickeltes Prognosetool ihren Kunden zur Verfügung stellen. Weitere Produkte werden aus den Ergebnissen nicht generiert, eine kommerzielle Vermarktung ist nicht geplant. Für die konkrete Weiterentwicklung eines Berechnungsmodells sind bereits Gespräche mit möglichen Industriepartnern geplant.

Den Industriepartnern steht zum Projektabschluss der aus den Messergebnissen erarbeitete Leitfaden zur Verfügung, um bei der Auswahl der geeigneten Unterdecke zu unterstützen. Die Ergebnisse werden in mindestens einer Fachzeitschrift (z. B. Bauphysik, Trockenbau Akustik) und wurden bereits teilweise auf einer Fachtagung (DAGA 2022) veröffentlicht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse über den Online-Auftritt des IBP den Architekten, Nutzern und Planern entsprechender Gebäude vor- und zur Verfügung gestellt. Außerdem werden die Erkenntnisse in den fachspezifischen Arbeitskreisen bekannt gemacht.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die finanzielle Förderung und fachliche Begleitung des durchgeführten Forschungsvorhabens. Unser Dank gilt außerdem

- den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern **Odenwald Faserplattenwerk GmbH** und der **Fural Systeme in Metall GmbH** für die Unterstützung des Vorhabens, insbesondere die Bereitstellung von Unterdeckensystemen, deren Einbau in die bauakustischen Prüfstände des IBP sowie der Beteiligung an der Versuchsplanung,
- Herrn Klaus-Dieter Brandstetter für die Bereitstellung und Aufbereitung weiterer Messergebnisse sowie Frau Dr. Yohko Aoki für die Erstellung und Auswertung zusätzlicher Simulationsumfänge,
- Frau Annabelle Geiger und Frau Ellen Schaaf für die Mitwirkung und wertvolle Unterstützung bei einem großen Teil der durchgeführten Messungen und Entwicklungsumfänge,
- Herrn Thomas Gräber für die gewissenhafte und sorgfältige Durchführung vieler handwerklicher Arbeiten.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Goecke, David (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Wack, Roman (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Koehler, Mark (Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Weitere Mitwirkende

Brandstetter, Klaus-Dieter

Dr. Aoki, Yohko

Geiger, Annabelle

Schaaf, Ellen Maureen

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Odenwald Faserplattenwerk GmbH,
Gewerbegebiet Odenwald Faserplattenwerk, Dr. F. A. Freundt-Straße 3, 63916 Amorbach

Fural Systeme in Metall GmbH,
Cumberlandstraße 62, 4810 Gmunden, Österreich

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann
BRÜGGEMANN KISSELER INGENIEURE
i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Literatur

- [1] DIN EN ISO 10848-2:2018-02 Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen: *Teil 2: Anwendung auf leichte Bauteile, wenn die Verbindung geringen Einfluss hat.*
- [2] DIN EN ISO 354:2003 Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen".
- [3] H. V. Fuchs, "Raum-Akustik und Lärm-Minderung: *Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und -dämpfern*, 4. Aufl.", Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [4] DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen_ - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Berlin.
- [5] DIN EN ISO 717-1:2021-05 Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen.: *Teil 1, Luftschalldämmung.*
- [6] H. V. Fuchs, "Raum-Akustik und Lärm-Minderung", Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [7] F. P. Mechel, "Schall-Längsdämmung von Deckenverkleidungen", IRB Verl., Stuttgart, 1980.
- [8] F. P. Mechel und E. Veres, "Experimentelle Untersuchungen der Einflussparameter zur Schallübertragung durch abgehängte Unterdecken", Fraunhofer-Inst. für Bauphysik, Stuttgart, 1985.
- [9] E. Veres, "Längs-Schalldämmung von abgehängten Unterdecken - Vergleich der alten und neuen Prüfverfahren nach DIN 52 210, Teil 2 und ISO 140, Part 9", Fraunhofer-Inst. für Bauphysik, Stuttgart, 1988.
- [10] F. P. Mechel, "Anwendungen", Hirzel, Stuttgart, 1998.
- [11] T. Mariner, „Theory of Sound Transmission through Suspended Ceilings over Partitions“, The Journal of the Acoustical Society of America, Jg. 31, Nr. 11, S. 1577, 1959.
- [12] K. Gösele, B. Kühn und F. Stumm, "Schall-Längsdämmung von untergehängten Deckenverkleidungen", Stuttgart, 1975.
- [13] J. Allard und N. Atalla, "Propagation of Sound in Porous Media: *Modelling Sound Absorbing Materials 2e*, 1. Aufl.", Wiley, J, New York, NY, 2009.
- [14] T. Mariner, „Theory of Sound Transmission Through Suspended Ceilings over Partitions“, Noise Control, Jg. 5, Nr. 6, S. 13–18, 1959.

Abbildungs- und Bildverzeichnis

- Abbildung 1 Beispielhaftes Verhalten der Schallabsorption α_s eines porösen Schallabsorbers aufgetragen über Terzmittenfrequenzen in Hz. Ausgehend von 20 % bei 100 Hz ansteigend bis zu einem Maximum von ca. 90 % ab 1.250 Hz. 11
- Abbildung 2 Gemessene (und interpolierte) Abweichung des Schallabsorptionsgrades durch die Holzrahmen in % zur Korrektur der Messergebnisse für 200 mm, 300 mm (interpoliert), 400 mm, 600 mm (interpoliert) und 800 mm Aufbau- bzw. Abhängehöhe. 29
- Abbildung 3 Darstellung des am Unterdecken- und Fensterprüfstand gemessenen Transmissionsgrades der Mineralfaserplatte A. 33
- Abbildung 4 Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Mineralfaserplatte A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,60$ bei nahezu deckungsgleichem Kurvenverlauf. 34
- Abbildung 5 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $D_{n,f,w} = 2$ dB bei variierendem Kurvenverlauf hauptsächlich im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.000 Hz. 35
- Abbildung 6 Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Mineralfaserplatte B bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit variierendem Einzahlwert α_w jeweils in Abhängigkeit der Abhängehöhe. Entsprechend des Schallabsorptionsverhaltens verschiebt sich der Scheitelpunkt des Kurvenverlaufs mit steigender Abhängehöhe hin zu tieferen Frequenzen (durch schwarz ausgefüllte Markierungen dargestellt). 36
- Abbildung 7 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte B bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 2,3$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im gesamten abgebildeten bzw. relevanten Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 5000 Hz. 37
- Abbildung 8 Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Metallkassette A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,70$ bei nahezu deckungsgleichem Kurvenverlauf. 39
- Abbildung 9 Ergebnisdarstellung des (korrigierten) frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades für Metallkassette B (mit Rohrmäander) bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit einem Einzahlwert von $\alpha_w = 0,50$ bzw. 0,60 bei überwiegend deckungsgleichem Kurvenverlauf. 39
- Abbildung 10 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette A bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 1,5$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1000 Hz. 40
- Abbildung 11 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette B (mit Rohrmäander) bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm mit jeweils variierenden Einzahlwerten von $\Delta D_{n,f,w} = 2$ dB bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1.000 Hz. 41
- Abbildung 12 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für gepresste Holzwolle (HoWo) und gelochte Gipskartonelemente (Loch-GK) bei den Abhängehöhen 400 mm und 700 mm mit jeweiligem Einzahlwert $D_{n,f,w}$ bei variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz als Indiz für ein nicht ausschließlich diffuses Schallfeld im Deckenhohlraum. 42

Abbildung 13 Ergebnisdarstellung der frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für gelochte Gipskartonelemente (Loch-GK, links) mit aufgelegter Mineralwolle (MiWo, rechts) zur Erhöhung der rückseitigen Schallabsorption bei den Abhängehöhen 400 mm und 700 mm mit jeweiligem Einzahlwert $D_{n,f,w}$ bei kaum variierendem Kurvenverlauf im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz als Indiz für ein nicht ausschließlich diffuses Schallfeld im Deckenhohlraum. 43

Abbildung 14 Simulationsbereich Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) eingezeichnet in die Skizze des Deckenhohlraums im Unterdeckenprüfstands am IBP. 45

Abbildung 15 Ergebnisdarstellung der mit COMSOL[®] berechneten frequenzabhängigen Schallintensitätspegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb einer Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) für die Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz. 46

Abbildung 16 Skizze des Unterdeckenprüfstands am IBP mit eingezeichneten Mikrofon-Positionen im Senderraum (mit Schall angeregter Raum 1 bzw. 2) sowie im Deckenhohlraum. 47

Abbildung 17 Ergebnisdarstellung (Schwarze gestrichelte Linie) der mit COMSOL[®] berechneten frequenzabhängigen Schallintensitätspegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb einer Aluminiumplatte (2 mm dick, Verlustfaktor $\eta = 0,01$) für die Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 500 Hz. Zusätzliche Darstellung der mittleren Schalldruckpegeldifferenz zwischen unter- und oberhalb der untersuchten Unterdecken in Grau. 48

Abbildung 18 Darstellung der Abweichung der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhängehöhe bei einer Referenz-Abhängehöhe von 800 mm im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 200 Hz. 50

Abbildung 19 Abweichung der bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ in Abhängigkeit der Abhängehöhe bei einer Referenz-Abhängehöhe von 800 mm und optimalem Strömungswiderstand. 52

Abbildung 20 Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte A bei einer Abhängehöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet. 54

Abbildung 21 Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Mineralfaserplatte B bei einer Abhängehöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet. 56

Abbildung 22 Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für Metallkassette A bei einer Abhängehöhe von 300 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). Zum Vergleich sind die Messergebnisse bei den Abhängehöhen 300 mm, 400 mm, 600 mm und 800 mm transparent im Hintergrund abgebildet. 58

Abbildung 23 Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus Metallkassetten (Archiv IBP) bei einer Abhängehöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). 59

Abbildung 24 Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus gepresster Holzfasern bei einer Abhängehöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz). 60

Abbildung 25	Ergebnisdarstellung der prognostizierten frequenzabhängigen Norm-Flankenschallpegeldifferenz für eine Unterdecke aus perforiertem Gipskarton bei einer Abhängehöhe von 400 mm (in Blau) ausgehend von einer gemessenen Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei einer Abhängehöhe von 700 mm (in Schwarz).	61
Abbildung 26	Darstellung des Eingabe- (linke Spalte) und Ausgabebereichs (rechte Spalte und Diagramm rechts) des digitalen, Excel-basierten Prognosewerkzeugs zur Berechnung der abweichenden (bewerteten) Norm-Flankenschallpegeldifferenz bei unterschiedlichen Abhängehöhen.	65
Bild 1	Skizze des Aufbaus einer abgehängten Unterdecke oberhalb einer nicht bis zur Massiv- / Rohdecke durchgehenden Raumtrennwand. (a) zeigt den Weg des Luftschalls nach seiner Transmission durch die Decke in den Hohlraum (und zurück), (b) die durch Körperschallschwingungen übertragene Schallenergie durch die Unterdecke selbst und (c) die Übertragung durch Undichtigkeiten oberhalb der Trennwand.	14
Bild 2	Beispielhafter Aufbau eines Elements einer abgehängten Unterdecke aus zu einer Platte gepresster Mineralfaser mit einem zu Gunsten der Schallabsorption beklebten Akustik-Vlies (Unterseite der Decke).	17
Bild 3	Skizze eines typischen Aufbaus einer Metallkassette als Element einer abgehängten Unterdecke. Beginnend auf der Rückseite jeder Kassette folgt eine Einlage aus Mineralwolle einer Gipskartonplatte. Darunter befinden sich ggf. Rohrmäander für eine thermische Aktivierung sowie ein Akustik-Vlies, welches auf die gelochte Unterseite der Metallkassette geklebt ist.	17
Bild 4	Unterseite einer Metallkassette mit auf das Akustik-Vlies geklebten Rohrmäander von innen abgebildet.	18
Bild 5	Hallraum am Fraunhofer IBP ($S_H = 60 \text{ m}^2$, $V = 392 \text{ m}^3$) mit charakteristischen Diffusoren in Gelb.	25
Bild 6	Beispielhafter Messaufbau im Hallraum zur Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke bei einer Abhängehöhe von 800 mm. Aufgestellt werden dazu 8 Holzrahmen mit einer Kantenlänge von 10 cm und einer begrenzenden Probenfläche von 12 m^2 (3 m x 4 m). In den obersten Rahmen wird das Prüfobjekt, die Unterdecke, in ein Schienensystem eingelegt. Sie bildet eine Ebene mit dem obersten Holzrahmen.	26
Bild 7	Unterkonstruktion des Messaufbaus im Hallraum zur Messung der Schallabsorption einer abgehängten Unterdecke. Für eine vollflächige Abstützung der einzelnen Deckenelemente werden Holzstützen positioniert. Zusätzlich ist der Aufbau für die Schalldruckpegelmessung durch an Führungsleinen (Weiß) befestigten Mikrofonen im Deckenhohlraum abgebildet.	26
Bild 8	Fläche aus Holz (Rahmenfugen mit Klebeband versiegelt) mit den für den Messaufbau verwendeten Holzrahmen. Die Fläche entspricht der beim Messaufbau von außen sichtbaren Fläche der gestapelten Holzrahmen bei einer Aufbau- bzw. Abhängehöhe von 800 mm. Alle Fugen sind mit Klebeband abgedichtet.	28
Bild 9	Grundriss und Ansicht des Unterdeckenprüfstand am IBP mit Maßen der Länge, Breite und Höhe des Prüfstands sowie der Trennwand, der umlaufenden Fuge und der Abhängehöhe.	30
Bild 10	Innenansicht des Unterdeckenprüfstands am Fraunhofer IBP mit Sicht auf die Trennwand und Traversen (Dreieck-Struktur) zum Abhängen der Unterdecke unterhalb der Rohdecke des Labors.	30
Bild 11	Von außen über einen Elektromotor verfahrbare Prüfstandsrohdecke zur stufenlosen Einstellung der Abhängehöhe.	31
Bild 12	Mikrofonarray zur Messung des Schalldruckpegels im Deckenhohlraum transmittiert durch die Unterdecke. Der Schalleintrag im Deckenhohlraum wird damit an insgesamt 36 Mikrofonpositionen äquidistant über die gesamte Länge des Prüfstands von 11 m hinweg gemessen, während eine Schallquelle den Senderraum beschallt.	32

Bild 13 Bestimmung des Schalltransmissionsgrades einer Unterdecke (Mineralfaserplatte) über ihr Schalldämm-Maß gemessen im Fensterprüfstand in einer Maske (50 mm x 80 mm) fixiert aus Sicht des Sendes- (links) und Empfangsraum (rechts)..... 32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die untersuchten Unterdecken, ihre Maße und Eigenschaften. Insgesamt sind alle acht untersuchten Unterdecken aufgeführt. Hervorgehoben werden je zwei aus Mineralfaserplatten und Metallkassetten.	18
Tabelle 2 Übersicht möglicher sowie belegter Einflussfaktoren des Messaufbaus auf die Messergebnisse sowie abgeleitete Modifikationen.	27
Tabelle 3 Tabellarische Übersicht der Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) aus der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhängöhe bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm bzw. 700 mm.	51
Tabelle 4 Tabellarische Übersicht der Koeffizienten und Polynome (2ten Grades) zur Berechnung des Korrekturfaktors (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm und 700 mm.	51
Tabelle 5 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm.	51
Tabelle 6 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm nach Ansatz A.	53
Tabelle 7 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte B für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm nach Ansatz A.	55
Tabelle 8 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Mineralfaserplatte A für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm nach Ansatz B.	57
Tabelle 9 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz der Metallkassette A für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm nach Ansatz B.	57
Tabelle 10 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten bewerteten Norm-Flankenschallpegeldifferenz einer Unterdecke aus gelochtem Gipskarton für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 700 mm nach Ansatz B.	62
Tabelle 11 Tabellarische Übersicht der Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 200 Hz) aus der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhänghöhe bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm, 700 mm, 600 mm, 500 mm, 400 mm und 300 mm.	76
Tabelle 12 Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhänghöhen bei einer Referenz-Abhänghöhe von 800 mm, 700 mm, 600 mm, 500 mm, 400 mm und 300 mm.	76

Anlagen

Korrekturwerte für Norm-Flankenschallpegeldifferenz

Tabelle 11

Tabellarische Übersicht der Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 200 Hz) aus der mittleren Schalldruckpegeldifferenz (ober- und unterhalb der untersuchten Unterdecken) in Abhängigkeit der Abhängehöhe bei einer Referenz-Abhängehöhe von 800 mm, 700 mm, 600 mm, 500 mm, 400 mm und 300 mm.

$D_{n,f,korr(125-200)}$ [dB]	x [mm]	800	700	600	500	400	300
	800	0	-0,4	-1,7	-3,5	-5,7	-8,2
	700	0,4	0	-1,3	-3,1	-5,2	-7,8
	600	1,7	1,3	0	-1,9	-4	-6,5
	500	3,5	3,1	1,9	0	-2,1	-4,6
	400	5,7	5,2	4	2,1	0	-2,5
	300	8,2	7,8	6,5	4,6	2,5	0

Koeffizienten für Korrektur der Norm-Flankenschallpegeldifferenz

Tabelle 12

Tabellarische Übersicht des Vergleichs der gemessenen und prognostizierten Korrekturfaktoren (Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 200 Hz) für unterschiedliche Abhängehöhen bei einer Referenz-Abhängehöhe von 800 mm, 700 mm, 600 mm, 500 mm, 400 mm und 300 mm.

x [mm]	$D_{n,f,korr(125-200)}$ [dB]	=	a_2	$\cdot x^2_{prog}$	+ a_1	$\cdot x_{prog}$	+ a_0
800	y_{800}	=	$2,51786 \cdot 10^{-5}$		-0,044467857		19,19502098
700	y_{700}	=	$2,53571 \cdot 10^{-5}$		-0,044578571		18,78002098
600	y_{600}	=	$2,44643 \cdot 10^{-5}$		-0,043710714		17,33216384
500	y_{500}	=	$2,51786 \cdot 10^{-5}$		-0,044267857		15,53502098
400	y_{400}	=	$2,42857 \cdot 10^{-5}$		-0,043428572		13,25287812
300	y_{300}	=	$2,44643 \cdot 10^{-5}$		-0,043710714		10,83216384