

Lutz Weber, Bernd Kaltbeitzel, Waldemar Maysenhölder

Verbesserung der Schalldämmung von leichten Ständerwänden bei tiefen Frequenzen

F 3076

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0225-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

IBP-Bericht B-BA 2/2017

Verbesserung der Schalldämmung von leichten Ständerwänden bei tiefen Frequenzen

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.32 / IBP-412457)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

83 Seiten Text

2 Tabellen

71 Abbildungen

Dr. Lutz Weber

M.Sc. Bernd Kaltbeitzel

apl. Prof. Dr. habil. Waldemar Maysenhölder

Stuttgart, 8. März 2018

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Philip Leistner

Dr.
Peter Brandstät

Dr.
Lutz Weber

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Literatur- und Produktrecherche	6
3	Vorgehensweise	11
4	Grundlagen	13
4.1	Messung der Schalldämmung	13
4.2	Schalldämmung einschaliger Platten	14
4.3	Schalldämmung von Ständerwänden	16
4.4	Bewertetes Schalldämm-Maß	18
4.5	Spektrum-Anpassungswerte	19
5	Versuchsdurchführung	22
5.1	Aufbau der untersuchten Wände	22
5.2	Unterschiede gegenüber bauüblichen Wänden	24
5.3	Durchführung der Messungen	27
5.4	Fremdgeräusche und Grenzdämmung	28
5.5	Reproduzierbarkeit	29
6	Ergebnisse Teil 1 – Diverse Maßnahmen	30
6.1	Elementierung der Wandschalen	31
6.2	$\lambda/4$ -Resonatoren im Wandhohlraum	33
6.3	Flächige Bedämpfung der Wandschalen	35
6.4	Bedämpfung der Wandschalen mit Schwingungstilgern	38
7	Ergebnisse Teil 2 – Periodische Beschwerung	43
7.1	Grundlagen der periodischen Beschwerung	44
7.2	Untersuchte Konstruktionsvarianten	46
7.3	Berechnung der Schalldämmung mit HYPERAKUS	47
7.3.1	Eingabewerte und Anwendungsbereich	49
7.3.2	Einfluss der Konstruktionsparameter	50
7.3.3	Einfluss des Schalleinfallswinkels	52
7.3.4	Vergleich von Rechnung und Messung	53
7.4	Berechnung der Resonanzfrequenz	55
7.5	Beschwerung von Gipskartonplatten	57
7.6	Ständerwände mit einseitiger Beschwerung	60

7.7	Ständerwände mit beidseitiger Beschwerung	62
7.8	Beschwerung im Wandhohlraum	64
7.9	Verwendung von Silentboard statt Stahl	65
7.10	Streifenförmige Beschwerung	67
7.11	Teilflächig verklebte Gipskartonplatten	70
7.12	Folie im Wandhohlraum	71
8	Zusammenfassung	74
9	Literatur	77
10	Danksagung	82

1 Einleitung

Leichte Ständerwände sind wegen ihrer zahlreichen praktischen Vorzüge nicht nur im Büro- und Industriebau beliebt, sondern werden zunehmend auch im Wohnungsbau eingesetzt. Das gilt insbesondere für Gipskarton-Metallständerwände als die am weitesten verbreitete Variante dieser Bauweise. Ständerwände haben eine erheblich geringere Masse als übliche Massivwände, lassen sich sehr viel schneller aufbauen und sind – da sie sich bei Bedarf verhältnismäßig leicht demontieren lassen – äußerst vielseitig und flexibel einsetzbar. Außerdem lassen sie sich kostengünstig herstellen und tragen als Trockenbausysteme kaum Feuchte ins Bauwerk ein. Der vorhandene Wandhohlraum ermöglicht die schnelle und einfache Verlegung von Leitungen und Rohren, was in der baulichen Praxis vor allem bei Elektro- und Wasserinstallationen einen großen Vorteil darstellt.

Auch im Hinblick auf den baulichen Schallschutz sind Ständerwände massiven Bauteilen im Normalfall durchaus ebenbürtig. Dies gilt zumindest bei wohnüblichen Geräuschen, wie z. B. menschlicher Sprache oder den von Radio- und Fernsehgeräten erzeugten Schallsignalen, deren maßgebende Geräuschanteile vorwiegend bei mittleren und hohen Frequenzen liegen [1]. Auch bei den baurechtlichen Schallschutzanforderungen wird nicht zwischen Ständer- und Massivwänden unterschieden: sofern der erforderliche Wert des bewerteten Schalldämm-Maßes eingehalten wird, dürfen wahlweise beide Bauweisen eingesetzt werden [2]. Da Ständerwände bei geeignetem Aufbau ohne Weiteres das gleiche bewertete Schalldämm-Maß wie einschalige Massivwände erreichen, sind sie – sofern sie keine tragende Funktion zu erfüllen haben – in fast allen baulichen Bereichen einsetzbar.

Dennoch haben Wände in Ständerbauweise in akustischer Hinsicht einen schwerwiegenden Nachteil: unterhalb von etwa 250 Hz (wenn im folgenden von tiefen Frequenzen gesprochen wird, ist immer dieser Bereich gemeint) weisen sie gegenüber akustisch vergleichbaren Massivwänden eine deutlich geringere Schalldämmung auf. Bei wohnüblichen Geräuschen macht sich das zwar im Allgemeinen nicht negativ bemerkbar, wenn der einwirkende Schall jedoch pegelbestimmende Anteile bei tiefen Frequenzen enthält, erfolgt eine verstärkte Schallübertragung durch die Wand, die erhebliche Lärmbelastigungen hervorrufen kann. Dies trifft beispielsweise für manche Anlagengeräusche, Verkehrslärm sowie basshaltige Musik aus Stereo- oder Heimkinoanlagen zu. In derartigen Fällen ist bei Ständerwänden daher häufig mit einer beträchtlich verminderten Schallschutzwirkung zu rechnen.

Die Ursache für die niedrige Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen liegt naturgemäß vor allem in ihrer vergleichsweise geringen Masse. Obgleich dies anschaulich verständlich ist und eigentlich keiner weiteren Erläuterung bedarf, lohnt es sich dennoch, die akustischen Eigenschaften von Ständerwänden im Bereich tiefer Frequenzen ein wenig genauer zu betrachten. Für die verminderte Schalldämmung sind vor allem zwei Effekte verantwortlich:

- Wie alle zweischaligen Bauteile weisen auch Ständerwände eine Doppelschalenresonanz auf, deren Frequenz für bauübliche Konstruktionen bei etwa $50 \text{ Hz} \leq f_0 \leq$

125 Hz liegt. Im Resonanzbereich erfolgt eine starke Verschlechterung der Schalldämmung, die sich normalerweise über etwa zwei bis drei Terzen erstreckt und die in diesem Bereich ohnehin schon niedrige Schalldämmung noch weiter herabsetzt. Im bewerteten Schalldämm-Maß, das nur die Frequenzen von 100 - 3150 Hz berücksichtigt, macht sich der Resonanzeinbruch zwar meist nur wenig bemerkbar. Da er in einem Bereich liegt, in dem das menschliche Gehör noch über ein gutes Wahrnehmungsvermögen verfügt, kann er jedoch – bei Einwirkung tieffrequenter Geräusche – erhebliche Lärmbelastigungen hervorrufen.

- Unterhalb der Doppelschalenresonanz verhalten sich Ständerwände wie einschalige Bauteile, deren Masse der Gesamtmasse beider Schalen entspricht. Im Vergleich zu einer Massivwand, die den gleichen Wert des bewerteten Schalldämm-Maßes aufweist, ist diese Masse – abhängig von der baulichen Ausführung der Ständerwand – jedoch um etwa den Faktor 5 bis 15 geringer. Gemäß dem Massegesetz, dass in diesem Frequenzbereich die Schalldämmung bestimmt, bedeutet dies, dass sich für Ständerwände bauartbedingt eine etwa 15 - 25 dB niedrigere Schalldämmung als für Massivwände mit gleichem bewerteten Schalldämm-Maß ergibt.

Zur Behebung der dargestellten akustischen Probleme sind geeignete technische Maßnahmen erforderlich, um die Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen wirksam zu verbessern. Die derzeit bevorzugt eingesetzten akustischen Verbesserungsmaßnahmen, wie etwa die Beschwerung der Wandschalen (z. B. durch mehrlagige Beplankung der Ständer), die Erhöhung des Schalenabstandes sowie der Einsatz getrennter Ständer zur Unterbindung der Körperschallübertragung, sind hierzu nur bedingt geeignet. Obgleich sie teilweise auch bei tiefen Frequenzen wirksam sind, konzentriert sich ihre Verbesserungswirkung vor allem auf den Bereich mittlerer und hoher Frequenzen. Dadurch wird zwar die Schalldämmung insgesamt angehoben, am Grundproblem der Ständerbauweise – der im Vergleich zu einer Massivwand mit gleichem bewerteten Schalldämm-Maß erheblich geringeren Schalldämmung bei tiefen Frequenzen – ändert sich jedoch nichts.

Daher sollen in dem Forschungsvorhaben alternative Maßnahmen zur Verbesserung der Schalldämmung betrachtet werden, die vor allem im Bereich tiefer Frequenzen wirksam sind. Es wird dabei vor allem auf solche Maßnahmen zurückgegriffen, deren Grundprinzip bereits bekannt ist, deren Wirkung in Verbindung mit Ständerwänden aber bislang noch wenig oder gar nicht untersucht wurde. Dies umfasst z. B. die Erhöhung des Verlustfaktors der Wandschalen durch körperschalldämpfende Beläge oder Schwingungstilger, die Elementierung der Schalen, die Beschwerung der Schalen durch periodisch angeordnete Zusatzmassen sowie den Einsatz von Resonanzabsorbern im Wandhohlraum. Die verschiedenen Maßnahmen werden zunächst an die akustischen Bedingungen der untersuchten Ständerwände angepasst und anschließend in Vorversuchen experimentell überprüft. Maßnahmen, die hierbei keine ausreichende Wirkung zeigen, werden nicht weiter betrachtet. Bei den übrigen Maßnahmen werden genauere Untersuchungen durchgeführt und das akustische Verhalten durch Variation des Aufbaus und der technischen Eigenschaften optimiert. Da Pegelunterschiede bei tiefen Frequenzen besonders deutlich empfunden werden [3], kann schon eine verhältnismäßig gerin-

ge Verbesserung der Schalldämmung in diesem Frequenzbereich eine merkliche Verminderung der Lärmbelastung bewirken.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung der Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen zu überprüfen und die Maßnahmen mit der größten akustischen Wirkung zu ermitteln. Die besten Maßnahmen sollen anschließend noch weiter entwickelt und experimentell optimiert werden. Dies schließt auch Verfahren zur Auslegung der technischen Eigenschaften und zur Abschätzung der resultierenden akustischen Verbesserungen ein, um auf diese Weise alle erforderlichen Voraussetzungen für die praktische Umsetzung der Maßnahmen bereitzustellen.

2 Literatur- und Produktrecherche

Ständerwände stellen eine weit verbreitete Bauweise dar, so dass dazu umfangreiche Literatur existiert. Da die Wände außerdem eine sehr große Konstruktionsvielfalt aufweisen (z. B. Holz- und Metallständer, Beplankung mit Holzwerkstoff- oder Gipskartonplatten, etc.), ist es erforderlich, die nachfolgenden Betrachtungen einzugrenzen. Die folgenden Angaben beziehen sich deshalb vor allem auf Gipskarton-Metallständerwände, da diese Bauweise in der baulichen Praxis mit Abstand am häufigsten anzutreffen ist. Die hierzu vorhandenen Ergebnisse lassen sich aber natürlich zum großen Teil auch auf Ständerwände mit anderem Aufbau übertragen.

Um die Schalldämmung von Ständerwänden zu berechnen, gibt es unterschiedliche Verfahren [4 - 10]. Allerdings sind viele der Berechnungsverfahren bei tiefen Frequenzen nicht oder nur eingeschränkt verwendbar. So sind analytische Modelle zur Untersuchung von Verbesserungsmaßnahmen zu ungenau und für die Statistische Energieanalyse (SEA) sind die Anwendungsvoraussetzungen nicht erfüllt [11 - 12]. Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) wären zwar im Prinzip möglich, sind aber für viele der untersuchten Maßnahmen zu aufwändig. Deshalb wurde entschieden, die Untersuchungen weitgehend auf experimenteller Grundlage durchzuführen und sich bei den notwendigen Berechnungen auf einfache Näherungsformeln zu beschränken. Soweit detaillierte Berechnungen erforderlich waren, wurde dazu eine im IBP entwickelte numerische Software (HYPERAKUS) eingesetzt.

Zur Schalldämmung von Gipskarton-Ständerwänden existieren zahlreiche Messungen, so dass für die meisten bauüblichen Konstruktionen geeignete Angaben verfügbar sind. Eine wichtige Informationsquelle bilden hierbei die Produktunterlagen der Hersteller, da alle großen Firmen (wie z. B. Knauf, Saint-Gobain Rigips und Siniat) komplette Wandsysteme mit allen zugehörigen Bauteilen und Baustoffen anbieten. Produktneutrale Angaben zur Schalldämmung von Gipskarton-Ständerwänden sind z. B. aus DIN 4109-33 [13] zu entnehmen. Allerdings findet man hier – wie vielfach auch in den Herstellerunterlagen – nur das bewertete Schalldämm-Maß, aber keine Aussagen zum Frequenzverlauf der Schalldämmkurve. Das bewertete Schalldämm-Maß bauüblicher Ständerwände liegt etwa zwischen $R_w = 40$ dB (CW 50 Profile, einfach beplankt) und $R_w =$

60 dB (getrenntes Ständerwerk, doppelt beplankt). Bei entsprechendem Wandaufbau lassen sich jedoch auch Werte von bis zu $R_w = 80$ dB erreichen.

Der Einfluss der verschiedenen Konstruktionsparameter auf die Schalldämmung von Ständerwänden ist im Wesentlichen gut bekannt [14 - 18]. Neben den technischen Grunddaten, wie z. B. der flächenbezogenen Masse der Beplankung oder dem Schalenabstand, spielen dabei auch Ausführungsdetails, wie z. B. die Anzahl und Position der Befestigungsschrauben, eine nicht zu vernachlässigende Rolle [19 - 23]. Für die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen ist ihr Einfluss allerdings eher gering, so dass er hier nicht weiter betrachtet wird.

Aus der Kenntnis der maßgebenden akustischen Einflussgrößen lassen sich auf einfache Weise geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Schalldämmung ableiten. Diese Maßnahmen, die im wesentlichen aus einer geeigneten Kombination der vorhandenen Grundbauteile bestehen, werden häufig eingesetzt, wenn erhöhte Schallschutzanforderungen an Ständerwände bestehen. Eine kurze Beschreibung der gebräuchlichen Maßnahmen und ihres akustischen Verbesserungspotenzials ist nachfolgend dargestellt (angegeben ist jeweils die aus vorhandenen Messdaten ermittelte Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes):

- Hohlraumbedämpfung: Durch Bedämpfung des Schallfeldes im Hohlraum von Ständerwänden lässt sich die Schallübertragung erheblich herabsetzen. Deshalb ist es üblich, Mineralwolle als Schallabsorber in den Hohlraum einzubringen. Die Schalldämmung bei leerem und vollständig gefülltem Hohlraum kann sich um mehr als 10 dB unterscheiden. Da zwischen der Schalldämmung und dem Füllgrad des Hohlraums ein exponentieller Zusammenhang besteht, ist bei einem Füllgrad von mehr als etwa 50 % allerdings nur noch ein verhältnismäßig geringer Zuwachs der Schalldämmung zu verzeichnen [24].
- Mehrfache Beplankung: Durch das Hinzufügen einer zweiten Beplankungslage verbessert sich die Schalldämmung von Ständerwänden um 5 - 10 dB. Mit einer dreilagigen Beplankung lassen sich Verbesserungen von bis zu etwa 15 dB erreichen.
- Getrennte Ständer: Durch die Verwendung getrennter Ständer wird die Körperschallübertragung zwischen den Wandschalen vollständig unterbunden, so dass sich die Schalldämmung der Wand um 5 - 10 dB erhöht.
- Schallschutz-Ständer: Schallschutz-Ständer enthalten Sicken oder Aussparungen, die die Steifigkeit des Profils herabsetzen und so die Körperschallübertragung vermindern (s. Abb. 1). Da jedoch im Gegensatz zu getrennten Ständern keine vollständige Körperschallisolation erreicht wird, verbessert sich die Schalldämmung hier lediglich um etwa 2 - 4 dB.

Schallschutz-Platten: Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Schalldämmung von Ständerwänden besteht darin, die Wände mit Schallschutz-Platten zu beplanken. Diese haben eine größere Masse und – abhängig vom jeweiligen Produkt – außerdem eine geringere Biegesteife bzw. eine höhere innere Dämpfung als herkömmliche Gipskartonplatten. Beispiele hierfür sind Knauf Silentboard und Rigips DuoTech [25 - 27]. Mit Hilfe dieser Platten lässt sich die Schalldämmung um bis zu 15 dB verbessern.



Abb. 1: Beispiel für ein CW-Profil, wie es standardmäßig für Gipskarton-Ständerwände verwendet wird (links) und ein Schallschutz-Profil mit verringerter Körperschallübertragung über das Ständerwerk (rechts).

Die oben aufgeführten Maßnahmen sind einfach durchführbar und verbessern die Schalldämmung in beträchtlichem Maße. Deshalb sind sie bei Planern und ausführenden Unternehmen sehr beliebt. Die Verbesserungen erfolgen jedoch vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen, so dass die Maßnahmen für den Schallschutz bei tiefen Frequenzen nur eingeschränkt geeignet sind. In der Vergangenheit wurde deshalb immer wieder versucht, alternative Möglichkeiten zur Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen zu finden. Zwar haben die vorgeschlagenen Maßnahmen bislang keinen Eingang in die bauliche Praxis gefunden, für das durchgeführte Forschungsvorhaben sind sie jedoch von großem Interesse. Nachfolgend sind die wichtigsten Vorschläge deshalb in einem kurzen Überblick zusammengestellt.

Der große Einfluss der Hohlraumbedämpfung auf die Schalldämmung von Ständerwänden wurde bereits erwähnt. Befindet sich im Hohlraum nicht ausreichend Schallabsorptionsmaterial, so können sich stehende Wellen ausbilden, die die Schalldämmung erheblich beeinträchtigen. Die üblicherweise zur Bedämpfung des Hohlraums eingesetzte Mineralwolle absorbiert allerdings hauptsächlich bei mittleren und hohen Frequenzen. Gleiches gilt auch für andere poröse Absorber, gleichgültig ob es sich um Faser- oder Schaumstoffe handelt. Eine Verbesserung der Schalldämmung durch Optimierung des verwendeten Absorptionsmaterials ist deshalb bei tiefen Frequenzen nicht zielführend [28 - 32].

Eine Alternative zum Einsatz von porösem Absorptionsmaterial bilden in den Wandhohlraum eingebaute Resonatoren. Im Gegensatz zu porösen Absorbern beschränkt sich die Wirkung von Resonatoren im Wesentlichen auf den Bereich der Resonanzfre-

quenz, in dem allerdings hohe Schallabsorptionsgrade erreicht werden. Durch entsprechende Abstimmung der Resonanzfrequenz (vorzugsweise auf die Doppelschalenresonanz der Ständerwand), lässt sich der Wandhohlraum daher auch bei tiefen Frequenzen wirksam bedämpfen [33 - 35]. Als Absorber können z. B. Helmholtz-Resonatoren, $\lambda/4$ -Resonatoren sowie Verbundplattenresonatoren zum Einsatz kommen (Verbundplattenresonatoren bestehen aus einer Platte aus elastischem Schaumstoff, die beidseitig mit Blechen beklebt ist und sich wie ein Masse-Feder-Masse System verhält). Bei Ständerwänden mit Helmholtz-Resonatoren wurde in Vorversuchen im Resonanzbereich eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung erreicht, wobei die verwendete Konstruktion für den praktischen Einsatz am Bau allerdings nicht tauglich war [34].

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Schalldämmung von Ständerwänden besteht darin, die innere Dämpfung der Wandschalen zu erhöhen. Dies kann z. B. durch das Aufkleben von Körperschalldämpfenden Belägen (zumeist auf Bitumen- oder Acrylbasis) erfolgen, wobei sich die beste Wirkung ergibt, wenn die dämpfende Schicht zwischen zwei Beplankungslagen angeordnet ist, so dass ein Sandwichelement mit Dämpfungskern entsteht [36]. Die bereits erwähnte DuoTech-Platte von Rigips ist ein typisches Beispiel für ein derartiges Element [27]. Ein weiteres Beispiel ist die Dämpfungsmasse Green Glue, die aus der Kartusche auf die erste Beplankungslage aufgetragen wird, bevor die zweite Lage montiert wird [37, 38]. Alle derartigen Systeme haben jedoch den Nachteil, dass bei tiefen Frequenzen nur verhältnismäßig wenig Dämpfung vorhanden ist [39].

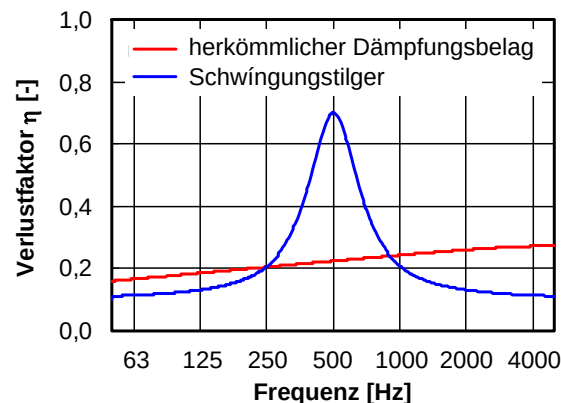


Abb. 2: Erhöhung der Körperschalldämpfung einer Platte durch einen Dämpfungsbelag im Vergleich zum Einsatz von Schwingungstilgern mit einer Resonanzfrequenz von 500 Hz. Schematische Darstellung zur Veranschaulichung der akustischen Wirkungsweise.

Für den tieffrequenten Schallschutz ist es deshalb oft günstiger, statt einer flächigen Bedämpfung der Beplankung an den Beplankungsplatten Schwingungstilger anzubringen. Schwingungstilger sind Masse-Feder-Masse Systeme, deren Feder – die zumeist aus einem Elastomerelement besteht – eine hohe innere Dämpfung aufweist. Im Bereich der Resonanzfrequenz entziehen die Tilger der angekoppelten Struktur in starkem Maße Körperschallenergie und wirken so lokal als "akustische Blutegel". Die Wirkungsweise ähnelt der von Helmholtz-Resonatoren, nur dass statt des Luftschallfeldes im Wandhohlraum das Körperschallfeld auf der Beplankung bedämpft wird. Die unter-

schiedliche Wirkungsweise von Dämpfungsbelägen und Schwingungstilgern ist in Abb. 2 schematisch veranschaulicht. In der Literatur wird über mehrere Beispiele für den Einsatz von Schwingungstilgern bei Ständerwänden berichtet [40 - 43]. Hinsichtlich der erzielten Verbesserungswirkung bestehen dabei jedoch große Unterschiede.

Im Prinzip wäre es auch möglich, aktive Systeme zur Reduzierung des Körper- und Luftschallpegels in Ständerwänden einzusetzen. Diese Technik ist jedoch sehr aufwändig, da sie geeignete Sensoren (Mikrofone oder Körperschallaufnehmer) und Aktuatoren (Lautsprecher oder Schwingerreger) sowie eine elektronische Regelung erfordert. Abgesehen von speziellen Anwendung, wie z. B. dem Studiobau, ist sie deshalb für den Einsatz im Bauwesen zu teuer. Da sich den bisherigen Erfahrungen zufolge außerdem nur verhältnismäßig geringe Verbesserungen ergeben [44, 45], wird auf die Untersuchung aktiver Systeme zur Verbesserung der Schalldämmung verzichtet.

Als letzte Verbesserungsmaßnahme wird nachfolgend die Beschwerung der Beplankung von Ständerwänden durch kleinflächige Zusatzmassen betrachtet, wobei die Massen auf einem periodischen Gitter angeordnet sind. Die Idee zu dieser Maßnahme, die hinsichtlich der betrachteten Problematik besonders vielversprechend erscheint, stammt bereits aus dem Jahr 1959 [46] und ist erst durch die Untersuchungen an akustischen Metamaterialien wieder in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Unter Metamaterialien versteht man Werkstoffe, bei denen die effektive Dichte und der Kompressionsmodul negative Werte annehmen. In den Frequenzbereichen, in denen dies der Fall ist, ergibt sich für die Schallwellen ein negativer Brechungsindex. Platten mit periodisch angeordneten Zusatzmassen stellen einen zweidimensionalen Sonderfall derartiger Metamaterialien dar, was sich im Hinblick auf die Schalldämmung darin äußert, dass das Schalldämm-Maß der unbeschwerten Platte in einigen Frequenzbereichen stark angehoben wird (weit stärker, als es der Gesamtmasse der Beschwerung entspricht). Die Hintergründe dieses Effekts werden später noch genauer erläutert.

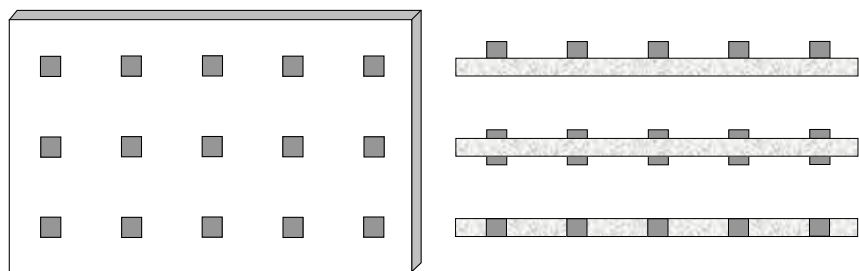


Abb. 3: Beispiel für die Beschwerung einer Platte durch auf einem periodischen Gitter angeordnete Zusatzmassen. Um eine ausreichende akustische Wirkung zu gewährleisten, müssen die Abmessungen der Massen klein im Verhältnis zu ihrem Abstand untereinander (entspricht dem Rastermaß des Gitters) sein. Die Massen können ein- oder beidseitig an der Platte angebracht oder bereits bei der Herstellung in die Platte integriert werden (rechts im Bild).

Periodisch angeordnete Zusatzmassen wurden bislang vor allem in Verbindung mit der Schalldämmung von Folien und Membranen untersucht [47 - 59]. Die bisherigen Ergebnisse lassen jedoch erwarten, dass die Maßnahme auch bei Gipskartonplatten und Gipskarton-Ständerwänden erfolgreich angewendet werden kann.

3 Vorgehensweise

Um zu untersuchen, wie sich die Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen am günstigsten verbessern lässt, wurden unterschiedliche technische Maßnahmen betrachtet und hinsichtlich ihrer akustischen Wirkung miteinander verglichen. Die Untersuchungen erfolgten in drei aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten:

- Im ersten Schritt wurden im Rahmen einer Vorauswahl zunächst geeignete Maßnahmen zusammengestellt, die eine wirksame Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen erwarten ließen. Neben dem akustischen Verbesserungspotenzial wurden dabei auch die Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung sowie der Herstellungsaufwand mit in die Betrachtung einbezogen. Die weiteren Untersuchungen beschränkten sich dann ausschließlich auf die ausgewählten Maßnahmen.
- Die Aufgabe des zweiten Schrittes bestand darin, die akustische Verbesserungswirkung der ausgewählten Maßnahmen zu bestimmen. Dies erfolgte durch messtechnische Untersuchungen in einem bauakustischen Prüfstand, indem die Maßnahmen zunächst bezüglich ihrer technischen Eigenschaften an die untersuchten Ständerwände angepasst und anschließend – nach Herstellung eines entsprechenden Versuchsaufbaus – experimentell erprobt wurden. Da Untersuchungen an Wänden normaler Größe zu aufwändig gewesen wären, wurden die Messungen an einem verkleinerten Wandausschnitt mit einer Fläche von ca. 2,5 m² durchgeführt, was die Aussagefähigkeit der ermittelten Ergebnisse jedoch nicht beeinträchtigt. Die Eigenschaften des verwendeten Versuchsaufbaus werden später noch ausführlich beschrieben.
- Im dritten Schritt wurden die Maßnahmen, die bei den vorangehenden Messungen die besten Ergebnisse erbrachten, genauer untersucht und messtechnisch optimiert. Dies erfolgte vor allem durch Variation der technischen Eigenschaften, teilweise aber auch durch den Einsatz alternativer Werkstoffe sowie durch Modifikation des Wandaufbaus. Bestandteil dieses Arbeitsschrittes war es außerdem, geeignete Planungswerkzeuge und Erfahrungswerte für den praktischen Einsatz bereitzustellen, um den Anwendern auf diese Weise die technische Auslegung der Maßnahmen, die Anpassung an unterschiedliche Arten von Wänden und die Abschätzung der resultierenden Verbesserung der Schalldämmung zu ermöglichen.

Wegen der Vielzahl der bei Ständerwänden anzutreffenden Konstruktionen war es erforderlich, die durchgeführten Untersuchungen auf einen Wandtyp zu beschränken. Da sie die mit Abstand am häufigsten verwendete Bauweise darstellen, wurden dazu als repräsentatives Beispiel Gipskarton-Metallständerwände ausgewählt. Die Aussagefähigkeit der Untersuchungen wird hierdurch nicht beeinträchtigt, da die Ergebnisse in ähnlicher Weise auch für die meisten anderen leichten zweischaligen Konstruktionen, wie z. B. Ständerwände in Holzbauweise, gelten.

Die meisten untersuchten Maßnahmen basieren auf dem Resonanzprinzip, so dass sich die akustische Wirkung auf einen verhältnismäßig schmalen Frequenzbereich beschränkt. Um in Summe eine möglichst große Verbesserung der Schalldämmung zu er-

reichen, wurden die Maßnahmen deshalb so ausgelegt, dass sie ihre Wirkung dort entfalten, wo die Schalldämmung der Wand besonders niedrig ist. Dies ist bei Ständerwänden normalerweise im Bereich der Doppelschalenresonanz der Fall, die sich bei den untersuchten Wänden abhängig von der flächenbezogenen Masse der Beplankung rechnerisch etwa im Bereich von 70 - 90 Hz befand. Da die tatsächliche Resonanzfrequenz erfahrungsgemäß meist etwas über dem berechneten Wert liegt, wurden die Maßnahmen so abgestimmt, dass die maximale Wirkung etwas oberhalb des für die Doppelschalenresonanz berechneten Wertes einsetzt (abhängig von der jeweiligen Maßnahme bei etwa 100 - 150 Hz).

Eine zentrale Aufgabe der durchgeführten Untersuchungen bestand darin, die betrachteten Verbesserungsmaßnahmen miteinander zu vergleichen und die Maßnahmen mit der höchsten akustischen Wirkung zu identifizieren. Hierzu ist ein geeigneter Vergleichsmaßstab erforderlich, an dem sich die Wirkung der einzelnen Maßnahmen bemessen lässt. Üblicherweise wird die Verbesserungswirkung ermittelt, indem man die Schalldämmung des Grundbauteils vor und nach Durchführung der Maßnahme miteinander vergleicht. Dies allein hat jedoch nur geringe Aussagekraft, denn für die Beurteilung neuer Maßnahmen ist vor allem interessant, wie ihre akustische Wirkung im Vergleich zu herkömmlichen Maßnahmen ausfällt.

Mit Ausnahme der Elementierung der Beplankung und der in den Wandhohlraum eingestellten Resonanzabsorber gingen alle anderen untersuchten Maßnahmen mit einer Beschwerung der Wand einher. Daher bot es sich an, als Vergleichsmaßstab für die Wirkung der untersuchten Verbesserungsmaßnahmen die Schalldämmung einer herkömmlichen Ständerwand mit gleicher flächenbezogener Masse heranzuziehen. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurden die Maßnahmen so ausgelegt, dass ihre Gesamtmasse pro Flächeneinheit einem ganzzahligen Vielfachen von $8,5 \text{ kg/m}^2$ (dies ist die flächenbezogene Masse der verwendeten Gipskartonplatten) entsprach. So lässt sich auf einfache Weise entscheiden, ob es günstiger ist, die untersuchte Maßnahme einzusetzen, oder ob eine herkömmliche Wand mit mehrlagiger Beplankung – bei insgesamt gleicher Masse – die bessere Lösung darstellt. Natürlich war es nicht möglich, bei allen Maßnahmen eine Masse von genau $8,5 \text{ kg/m}^2$ (oder ein Vielfaches davon) einzuhalten. Da der Unterschied jedoch nicht mehr als etwa 10 % betrug, ist dies für das Ergebnis der Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung.

Die Wirkung von akustischen Verbesserungsmaßnahmen lässt sich am besten beurteilen, wenn man die jeweiligen Schalldämmkurven direkt miteinander vergleicht. Entsprechende Diagramme bilden daher einen zentralen Bestandteil des vorliegenden Berichts. Zur Vereinfachung und zur besseren Übersicht ist es jedoch manchmal sinnvoll, die Messkurven in Einzahlangaben zusammenzufassen. Die wichtigste Einzahlangabe für den baulichen Schallschutz ist das bewertete Schalldämm-Maß R_w . Da es die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen jedoch nur unzureichend berücksichtigt, muss es im vorliegenden Fall in geeigneter Weise ergänzt werden. Zur Beurteilung der untersuchten Maßnahmen wird deshalb neben dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w zusätzlich auch noch die Summe $R_w + C_{tr,50-5000}$ mit angegeben, wobei $C_{tr,50-5000}$ den Spektrumanpassungswerte für tieffrequente Geräusche bezeichnet.

4 Grundlagen

4.1 Messung der Schalldämmung

Die Schallschutzwirkung von Bauteilen gegenüber Luftschallanregung wird durch ihr Schalldämm-Maß R gekennzeichnet, das als logarithmisches Verhältnis zwischen auftretender und durchgelassener Schall-Leistung, P_1 und P_2 , definiert ist:

$$R = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

Bei einem Schalldämm-Maß von $R = 30 \text{ dB}$ tritt demnach 0,1 % der auftreffenden Schall-Leistung durch das angeregte Bauteil hindurch.

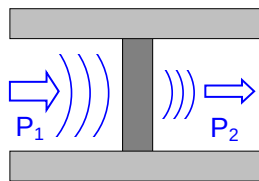


Abb. 4: Schematische Darstellung zur Veranschaulichung der Schalldämmung eines plattenförmigen Bauteils.

Die Schalldämmung ist eine frequenzabhängige Größe und wird deshalb normalerweise in Terzen gemessen. Da eine direkte Messung der Schall-Leistung verhältnismäßig aufwändig und schwierig ist, wird das untersuchte Bauteil zwischen zwei Räumen eingebaut und mit einem Lautsprecher beschallt. Aus den mittleren Schallpegeln in den beiden Räumen lässt sich dann das Schalldämm-Maß des Bauteils bestimmen. Die verwendete Messanordnung ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Messung und Auswertung erfolgen nach der Normenreihe DIN EN ISO 10140-1 bis -5 [60].

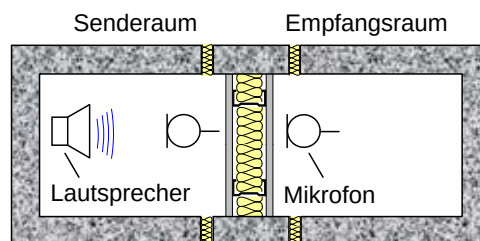


Abb. 5: Messanordnung zur Bestimmung der Schalldämmung von Wänden nach DIN EN ISO 10140. Die elastischen Trennfugen in den Flankenbauteilen stellen sicher, dass die Schallübertragung vom Sende- in den Empfangsraum ausschließlich über die geprüfte Wand erfolgt. Eine wesentliche Voraussetzung für das Messverfahren ist, dass im Sende- und Empfangsraum des Prüfstands ein diffuses Schallfeld vorhanden ist.

Das Schalldämm-Maß des geprüften Bauteils lässt sich nach folgender Formel aus den ermittelten Messwerten berechnen:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{S}{A} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

- mit L_1 = Schallpegel im Senderraum [dB],
 L_2 = Schallpegel im Empfangsraum [dB],
 S = Fläche des geprüften Bauteils [m²],
 A = $0,16 V / T$ = äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum [m²],
 V = Volumen des Empfangsraums [m³],
 T = Nachhallzeit im Empfangsraums [s].

4.2 Schalldämmung einschaliger Platten

Die Schalldämmung einschaliger plattenförmiger Bauteile steigt mit zunehmender Frequenz kontinuierlich an. Im Bereich der Koinzidenz wird der Anstieg allerdings vorübergehend unterbrochen und die Schalldämmkurve durchläuft ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum, dessen Tiefe von verschiedenen Einflüssen, wie z. B. der Fläche und der Randspannung der Platte sowie ihrer inneren Dämpfung abhängt. Koinzidenz setzt dann ein, wenn die Wellenlänge des auftreffenden Luftschalls mit der freien Biegewellenlänge der Platte übereinstimmt, so dass die Platte verstärkt in Schwingungen versetzt wird. Die Frequenz, bei dieser Effekt auftritt, wird als Koinzidenzgrenzfrequenz oder kurz als Koinzidenzfrequenz f_g bezeichnet.

Unterhalb der Koinzidenzfrequenz wird der Frequenzverlauf der Schalldämmung durch das Bergersche Massegesetz beschrieben, das sich für großflächige Bauteile (d. h. unter Vernachlässigung von Eigenschwingungen) im Bereich $f \ll f_g$ näherungsweise als

$$R = 10 \lg \left(1 + \left[\frac{2\pi f m'' \cos \theta}{2\rho_L c} \right]^2 \right) \text{ dB} \quad (3)$$

- mit m'' = flächenbezogene Masse der Platte [kg/m²],
 θ = Schalleinfallswinkel (bezogen auf die Flächennormale) [°],
 $\rho_L c$ = Schallkennimpedanz der Luft (ca. 417 kg/(m²s) unter Normalbedingungen).

darstellen lässt [61]. Um die Schalldämmung bei diffusem Schalleinfall zu erhalten, kann man in erster Näherung mit $\theta = 45^\circ$ rechnen. Da außerdem der zweite Term im Ausdruck für den Logarithmus im Normalfall sehr viel größer als 1 ist, vereinfacht sich Gl. (3) zu

$$R \cong 20 \lg \left(\frac{\pi f m''}{\sqrt{2}\rho_L c} \right) \text{ dB} . \quad (4)$$

Wie sich aus der obigen Formel entnehmen lässt, erhöht sich die Schalldämmung bei Verdopplung der Frequenz um 6 dB. Die Steigung der Schalldämmkurve beträgt somit 6 dB/Oktave.

Die Koinzidenzfrequenz der Platte hängt von ihrer flächenbezogenen Masse und ihrer Biegesteife ab. Die entsprechende Formel lautet:

$$f_g = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad (5)$$

mit c = Schallgeschwindigkeit in Luft (ca. 340 m/s unter Normalbedingungen),
 m'' = flächenbezogene Masse der Platte [kg/m²],
 B' = Biegesteife je Breite [Nm].

Die Biegesteife steigt gemäß

$$B' = \frac{Ed^3}{12(1-\mu^2)} \quad (6)$$

mit E = Elastizitätsmodul [N/m²],
 d = Dicke der Platte [m],
 μ = Poissonzahl (für die meisten Materialien gilt $\mu \approx 0,3$),

mit zunehmendem Elastizitätsmodul und wachsender Dicke der Platte an, weshalb weiche, dünne Bauteile in der Regel eine hohe Koinzidenzfrequenz aufweisen. Für bauübliche Gipskartonplatten liegt die Koinzidenzfrequenz normalerweise etwa im Bereich von 2500 - 3500 Hz. Ein Beispiel für die Schalldämmkurve einer Gipskartonplatte ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

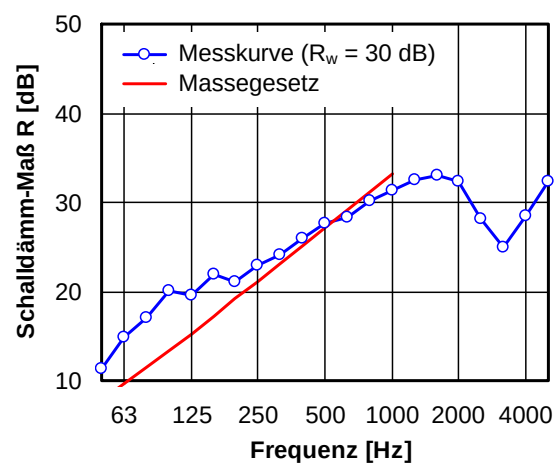


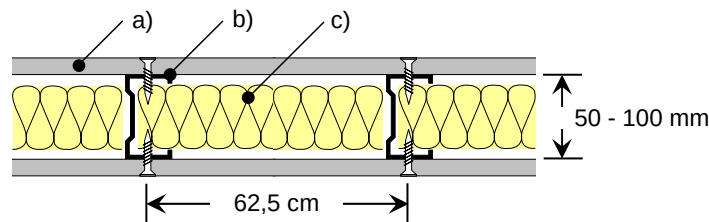
Abb. 6: Schalldämmung einer bauüblichen Gipskartonplatte mit $d = 12,5$ mm und $m'' = 8,5$ kg/m² in Abhängigkeit von der Frequenz. Der Koinzidenzeffekt bei 3150 Hz ist als Minimum deutlich im Kurvenverlauf erkennbar. Neben den Messwerten ist außerdem die nach Gl. (4) für das Massegesetz berechnete Kurve dargestellt.

Wie zu erkennen ist, weicht die gemessene Schalldämmung bei tiefen Frequenzen merklich vom Massegesetz ab. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Mes-

sungen an einem Bauteil mit verhältnismäßig kleiner Fläche ($B \times H = 1,25 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$) und eingespannten Rändern erfolgten, wodurch sich Eigenschwingungen ausbilden konnten und Körperschallenergie in die Flankenbauteile übertragen wurde.

4.3 Schalldämmung von Ständerwänden

Aufgrund ihrer zweischaligen Bauweise erreichen Ständerwände trotz ihrer verhältnismäßig geringen Masse ähnlich hohe Werte für das bewertete Schalldämm-Maß wie erheblich schwerere Massivwände. Der Frequenzverlauf der Schalldämmkurve entscheidet sich jedoch grundlegend von dem Verhalten einschaliger Bauteile. Nachfolgend wird dies am Beispiel von Gipskarton-Ständerwänden erläutert.



- a) Gipskartonplatte ($d = 12,5 \text{ mm}$, $m'' \approx 8,5 \text{ kg/m}^2$)
- b) CW-Profil (Stahlblech, $d \approx 0,6 \text{ mm}$)
- c) Mineralwolle-Trennwandplatte (längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 5 \text{ kNs/m}^4$)

Abb. 7: Aufbau einer bauüblichen Gipskarton-Metallständerwand (schematisch). Die Beplankungsplatten (Standardbreite 62,5 cm) werden im Abstand von etwa 250 mm mittels Schnellbauschrauben mit den Ständern verschraubt. Anschließend werden die Plattenstöße mit Fugenmasse (meist auf der Basis von Gips) verspachtelt.

Wie sich der obigen Darstellung entnehmen lässt, weisen Gipskarton-Ständerwänden üblicherweise einen Schalenabstand von 50 - 100 mm auf. Die Ständer bestehen aus CW-Profilen, die aus 0,6 mm dicken Stahlblech gefertigt sind und standardmäßig in den Breiten 50 mm, 75 mm und 100 mm erhältlich sind. Normalerweise wird die Beplankung auf der Vorder- und Rückseite der Wand am gleichen Ständer festgeschraubt. Bei hohen Anforderungen an die Schalldämmung können aber auch getrennte Ständer oder Schallschutzständer mit einer in Querrichtung verminderten Steifigkeit zum Einsatz kommen. Hierdurch wird erreicht, dass weniger oder gar kein Körperschall von der Vorder- auf die Rückseite der Wand übertragen wird.

Bauübliche Gipskartonplatten sind 12,5 mm dick und haben einen flächenbezogene Masse von etwa 8 - 9 kg/m^2 . Um eine höhere Schalldämmung zu erreichen, können die Platten mehrlagig übereinander geschraubt werden, wobei in der Praxis zur Beschwerung von Ständerwänden selten mehr als drei Plattenlagen verwendet werden. Als Alternative hierzu können auch Platten mit erhöhter Rohdichte eingesetzt werden, die bei gleicher Dicke eine größere Masse als normale Gipskartonplatten aufweisen. Beispiele hierfür sind Gipsfaserplatten sowie Gipskartonplatten, denen zur Beschwerung entsprechende Zuschlagstoffe zugesetzt wurden.

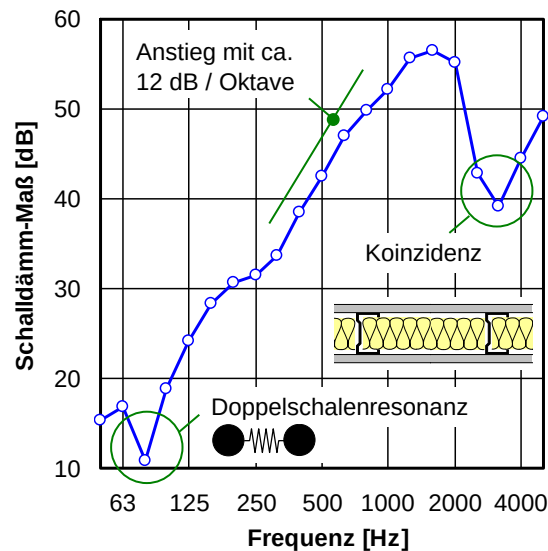


Abb. 8: Verlauf der Schalldämmkurve einer typischen Ständerwand (CW 100, beidseitig $m'' = 8,7 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 42 \text{ dB}$, $C_{tr,50-5000} = -13 \text{ dB}$).

Die obigen Abbildung veranschaulicht den Frequenzverlauf der Schalldämmung von Ständerwänden am Beispiel einer typischen Messkurve. Der Verlauf lässt sich prinzipiell in vier Bereiche unterteilen:

- Unterhalb der Doppelschalenresonanz ist die Luftfeder zwischen den Wandschalen so steif, dass die beiden Schalen wie ein einziges einschaliges Bauteil schwingen. In diesem Bereich gilt das Massegesetz, wobei die Bauteilmasse der Gesamtmasse beider Schalen entspricht.
- Bei der Doppelschalenresonanz verhält sich die Wand wie ein Masse-Feder-Masse System, wobei die beiden Wandschalen als Massen und die Luftschicht im Wandhohlraum als Feder wirken. Da im Resonanzbereich hohe Schwingungsamplituden auftreten, durchläuft die Schalldämmkurve hier ein Minimum. Die Tiefe des Minimums hängt unter anderem von der inneren Dämpfung, der Randeinspannung und der Fläche der Wandschalen ab. Bei einigen Wänden ist das Minimum sehr deutlich ausgeprägt, bei anderen – insbesondere solchen mit hoher Dämpfung – ist es in der Schalldämmkurve hingegen kaum erkennbar.
- Oberhalb der Doppelschalenresonanz steigt die Schalldämmung mit zunehmender Frequenz theoretisch mit 18 dB / Oktave an. In der Praxis tritt dieser steile Anstieg allerdings nur dicht oberhalb der Resonanz in Erscheinung. Zu höheren Frequenzen hin flacht der Anstieg rasch ab, bis er sich normalerweise auf eine Steigung von etwa 12 dB / Oktave einpendelt. Dies immer noch erheblich steiler als bei einschaligen Bauteilen, bei denen die Schalldämmkurve gemäß dem Massegesetz eine Steigung von 6 dB / Oktave aufweist.
- Im Bereich der Koinzidenzfrequenz ist auch bei Ständerwänden analog zu einschaligen Bauteilen ein starker Dämpfungseinbruch zu verzeichnen. Der Einbruch ist bei Ständerwänden zumeist sogar noch deutlicher ausgeprägt, da – unter Voraussetzung einer symmetrischen Beplankung der Wand – zwei separate Schalen dazu

beitragen. Allerdings spielen dabei auch die Dämpfung und insbesondere die Fläche der Beplankungsplatten eine Rolle.

Wie aus den obigen Ausführungen hervorgeht, ist für die Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen vor allem die Doppelschalenresonanz maßgebend. Bei bauüblichen Gipskarton-Ständerwänden mit einer Ständerbreite von 50 - 100 mm und ein- bis dreifacher Beplankung mit normalen Gipskartonplatten liegt sie etwa im Bereich von $50 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 125 \text{ Hz}$. Die Resonanzfrequenz lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)} \quad (7)$$

mit s' = dynamische Steifigkeit der Luftschicht im Wandhohlraum [N/m^2],
 m''_1 = flächenbezogene Masse der vorderseitigen Beplankung [kg/m^2],
 m''_2 = flächenbezogene Masse der rückseitigen Beplankung [kg/m^2].

Ist der Wandhohlraum mit Mineralwolle gefüllt, lässt sich die dynamische Steifigkeit der Luftschicht näherungsweise nach der Beziehung

$$s' = \frac{0,111 \text{ MN/m}^2}{d} \quad (8)$$

bestimmen, wobei d den Schalenabstand der Wand bezeichnet. Die Resonanzfrequenz ist also um so niedriger, je höher die flächenbezogene Masse der Beplankung und je größer der Schalenabstand der Ständerwand ist.

4.4 Bewertetes Schalldämm-Maß

Während die Messung der Schalldämmung frequenzabhängig (zumeist in Terzen) erfolgt, werden für die schalltechnische Planung und den Vergleich mit den Schallschutzanforderungen in der Regel Einzahlangaben verwendet. Die zentrale Einzahlangabe für die Luftschalldämmung von Bauteilen ist das bewertete Schalldämm-Maß R_w , auf das sich sämtliche Schallschutzanforderungen in DIN 4109-1 beziehen. Die Berechnung von R_w erfolgt gemäß DIN EN ISO 717-1 [62] durch Vergleich der Messkurve mit einer normten Bezugskurve. Das verwendete Verfahren ist in Abb. 9 am Beispiel der Schalldämmkurve einer typischen Massivwand veranschaulicht.

Für die akustische Planung in der baulichen Praxis wird das bewertete Schalldämm-Maß im Normalfall als ganzzahliger Wert gebildet. Da dies jedoch zwangsläufig eine Berechnungsunsicherheit von $\pm 0,5 \text{ dB}$ nach sich zieht, wird R_w im vorliegenden Bericht zumeist mit einer Genauigkeit von $0,1 \text{ dB}$ angegeben, indem die Bezugskurve gemäß DIN EN ISO 717-1 in Schritten von $0,1 \text{ dB}$ anstatt 1 dB verschoben wird. Im Sinne einer konsistenten Darstellung wird analog dazu auch der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ mit $0,1 \text{ dB}$ Genauigkeit berechnet. Dies ist zwar in DIN EN ISO 717-1 bislang nicht explizit vorgesehen, lässt sich aber einfach realisieren, indem das Berechnungsergebnis statt auf 1 dB auf $0,1 \text{ dB}$ gerundet wird.

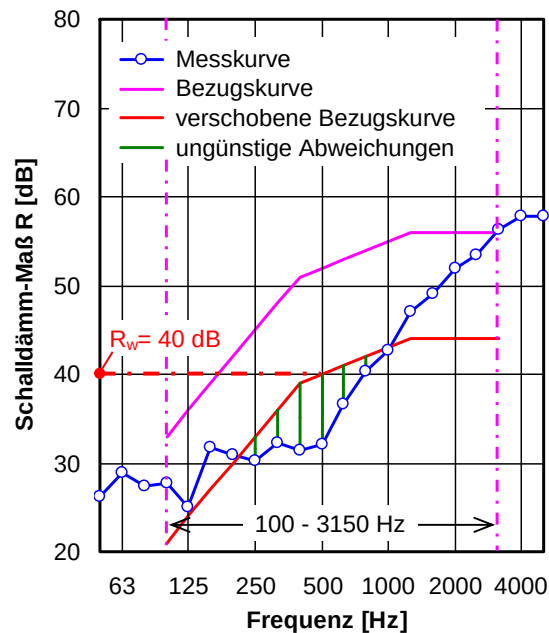


Abb. 9: Beispiel für die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w . Die Berechnung erfolgt durch vertikale Verschiebung der Bezugskurve in ganzzahligen Schritten. Die Verschiebung wird so lange fortgesetzt, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, aber nicht mehr als 32,0 dB beträgt (eine ungünstigste Abweichung liegt vor, wenn der Messwert unter der Bezugskurve liegt). Das bewertete Schalldämm-Maß entspricht dem Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz (im dargestellten Beispiel ergibt sich $R_w = 40$ dB).

4.5 Spektrum-Anpassungswerte

Das Verfahren zur Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes stammt aus dem Jahr 1960. Da damals noch keine elektronischen Rechner zur Verfügung standen, wurde es im Hinblick auf geringen Berechnungsaufwand konzipiert. Die damit verbundenen Vereinfachungen verursachen jedoch bei der praktischen Anwendung erhebliche Probleme:

- Das bewertete Schalldämm-Maß ist auf den Schallschutz bei wohnüblichen Geräuschen ausgerichtet. Bei tieffrequentem Lärm liefert es keine adäquate Beschreibung der Schallschutzwirkung und korreliert nicht mit dem menschlichen Höreindruck.
- Der Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz, der für den Schallschutz bei tieffrequenten Geräuschen von zentraler Bedeutung ist, wird bei der Bewertung vollständig ausgespart.
- Einbrüche in der Schalldämmkurve, wie sie z. B. durch Bauteilresonanzen entstehen, werden nur unzureichend erfasst.

Um die angesprochenen Probleme zu beheben, wurden in DIN EN ISO 717-1 im Jahr 1997 die beiden Spektrum-Anpassungswerte C (für Wohnaktivitäten und hochfrequenten

te Geräusche) und C_{tr} (für tieffrequenten Lärm) eingeführt. Die Werte sind so definiert, dass die Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert (also z. B. $R_w + C_{tr}$) unmittelbar der menschlichen Geräuschwahrnehmung entspricht.

Da die Spektrum-Anpassungswerte aus dem gemessenen Schalldämm-Maß berechnet werden, sind keine zusätzlichen Messungen erforderlich. Die verwendete Berechnungsformel (am Beispiel von C_{tr}) lautet:

$$C_{tr} = -10 \lg \left(\sum_n 10^{(L_n - R_n)/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB} - R_w . \quad (9)$$

Summiert wird hierbei über die verschiedenen Terzen, wobei R_n und L_n die Terzwerte des Schalldämm-Maßes und des zugrunde gelegten Anregungsspektrums bezeichnen. Die genormten Anregungsspektren für C und C_{tr} sind in DIN EN ISO 717-1 definiert und entsprechen den nachfolgend dargestellten Kurven.

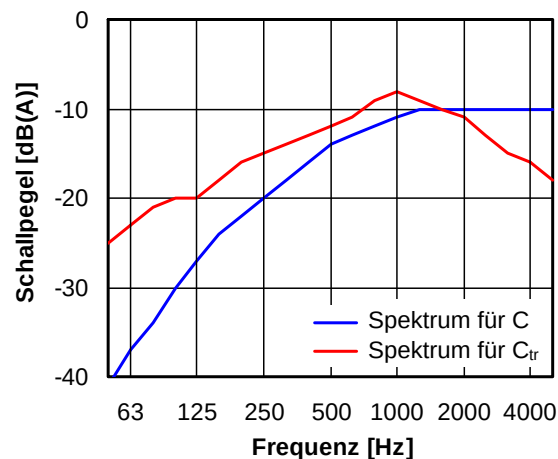


Abb. 10: Frequenzspektren zur Berechnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} nach DIN EN ISO 717-1. Das für C verwendete Spektrum (sogenanntes rosa Rauschen) stellt eine vereinfachte Nachbildung wohnüblicher Innengeräusche dar. Das Spektrum für C_{tr} entspricht – abgesehen von dem bis 50 Hz hinab erweiterten Frequenzbereich – dem standardisierten Verkehrslärm-spektrum für Straßenverkehr nach DIN EN 1793-3 [32]. Beide Spektren sind auf den gleichen Gesamtpegel von 0 dB(A) normiert und lassen sich somit direkt miteinander vergleichen.

Neben dem standardmäßig verwendeten Frequenzbereich von 100 - 3150 Hz können die Spektrum-Anpassungswerte – sofern entsprechende Messwerte für die Schalldämmung vorliegen – optional auch für die Bereiche von 100 - 5000 Hz, 50 - 3150 Hz und 50 - 5000 Hz ermittelt werden. In diesen Fällen werden die Werte mit einem entsprechenden Index (also z. B. $C_{tr,50-5000}$) gekennzeichnet. Ist kein Index vorhanden, so ist immer der Bereich von 100 - 3150 Hz gemeint. Da die Vielzahl unterschiedlicher Angaben (zwei verschiedene Spektrum-Anpassungswerte mit jeweils vier verschiedenen Frequenzbereichen) bei der praktischen Anwendung häufig zu Unklarheiten führt, hier in kurzer Form die wichtigsten Anwendungsregeln [63]:

- Für die Wahrnehmung der Schallschutzwirkung durch das menschliche Gehör ist die Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert maßgebend. Spektrum-Anpassungswerte allein haben keine direkte Aussagekraft.
- Der betrachtete Frequenzbereich sollte in jedem Fall die bauakustisch bedeutsamen Frequenzen von 50 - 100 Hz einbeziehen. Ob die obere Bereichsgrenze bei 3150 oder 5000 Hz liegt, hat demgegenüber nur geringen Einfluss auf das Ergebnis.
- Die Wahl des geeigneten Spektrum-Anpassungswertes hängt von der Art der einwirkenden Geräusche ab (siehe Hinweise in DIN EN ISO 717-1). Als Faustregel ist bei Wohngeräuschen der Wert C und bei tieffrequenten Geräuschen (z. B. basshaltige Musik, vielen Anlagengeräuschen und manchen Arten von Verkehrslärm) der Wert C_{tr} heranzuziehen.

Trotz ihrer großen akustischen Bedeutung wurden die Spektrum-Anpassungswerte in den gesetzlichen Anforderungen für den baulichen Schallschutz in Deutschland bislang nicht berücksichtigt. In Anhang A von DIN 4109-1 findet sich lediglich die unverbindliche Empfehlung, dass bei der Festlegung des gewünschten Schallschutzniveaus abhängig von Nutzung und Lage des Raums sowie dem angestrebten Qualitätsstandard auch die Spektrum-Anpassungswerte berücksichtigt werden sollen. Da der Anhang jedoch nur informativen Charakter hat, ist die Berücksichtigung von Spektrum-Anpassungswerten bei der baulichen Schallschutzplanung rechtlich gesehen nicht zwingend erforderlich.

In den durchgeführten Forschungsvorhaben geht es vor allem darum, die Schallschutzwirkung der untersuchten Verbesserungsmaßnahmen bei tiefen Frequenzen adäquat zu beurteilen. Hierzu wird neben dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w außerdem auch der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ herangezogen, wobei R_w die Schallschutzwirkung bei üblichen Wohngeräuschen und $R_w + C_{tr,50-5000}$ die Wirkung bei tieffrequentem Lärm beschreibt. Welche Werte sich hierbei in der Praxis ergeben, ist in Abb. 11 an einem idealisierten Beispiel veranschaulicht.

Dargestellt sind die Schalldämmkurven einer Ständerwand und einer Massivwand. Obgleich die Ständerwand bei tiefen Frequenzen eine erheblich geringere Schalldämmung aufweist, ist das bewertete Schalldämm-Maß mit $R_w = 45$ für beide Wände gleich. Um die Unterschiede bei tiefen Frequenzen mit in die Bewertung einzubeziehen, muss man neben R_w zusätzlich auch noch den Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ heranziehen. Bezogen auf $R_w + C_{tr,50-5000}$ unterscheiden sich die beiden Wände um 11 dB, was sich näherungsweise als Maß für die unterschiedliche Schallschutzwirkung gegenüber tieffrequenten Geräuschen ansehen lässt. In ähnlicher Weise wie in dem beschriebenen Beispiel kann auch die Verbesserungswirkung der in dem Forschungsvorhaben untersuchten Schallschutzmaßnahmen bei tiefen Frequenzen unter Verwendung der Größe $R_w + C_{tr,50-5000}$ beurteilt und miteinander verglichen werden.

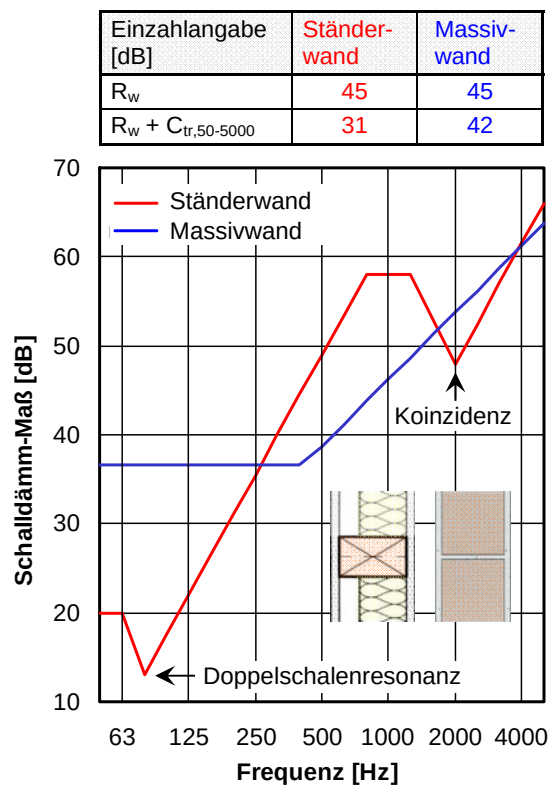


Abb. 11: Frequenzverlauf der Schalldämmung für eine Massiv- und eine Ständerwand (idealisierte Darstellung typischer Wände). Das Beispiel wurde so gewählt, dass sich trotz des unterschiedlichen Kurvenverlaufs für beide Wände das gleiche bewertete Schalldämm-Maß von $R_w = 45$ dB ergibt.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Aufbau der untersuchten Wände

Um einen direkten Vergleich der untersuchten Verbesserungsmaßnahmen zu ermöglichen, wurden alle Untersuchungen an der gleichen Grundwand durchgeführt. Als Grundwand wurde eine bauübliche einlagig beplankte Gipskarton-Metallständerwand gewählt, die folgenden Aufbau aufwies:

- Ständer: Knauf-Profile CW 75/50/06 aus Stahlblech (Profilbreite 75 mm, Schenkelhöhe 50 mm, Blechstärke 0,6 mm),
- Randprofile: Knauf-Profile UW 75/40/06 aus Stahlblech (Profilbreite 75 mm, Flanschbreite 40 mm, Blechstärke 0,6 mm), an Boden und Decke,
- Beplankung: Gipskartonplatten Knauf GKB, $d = 12,5$ mm, $\rho = 680$ kg/m³, $m'' = 8,5$ kg/m², $E = 1500$ MN/m², $B' = 270$ Nm,
- Hohlraumbedämpfung: Glaswolle Isover Akustic TP 1 Trennwandplatte, $r \geq 5$ kNs/m⁴, $d = 60$ mm.

Die für die Gipskartonplatten angegebenen technischen Daten wurde durch eigene Messungen bestimmt. Bei den übrigen Daten handelt es sich um Herstellerangaben.

Um den Herstellungsaufwand für die untersuchten Maßnahmen zu vermindern, wurden die Messungen nicht an einer vollflächigen Wand, sondern an einem Wandausschnitt mit einer verkleinerten Fläche von $B \times H = 125 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ durchgeführt. Da die Einbauöffnung des Prüfstands eine Fläche von $B \times H = 125 \text{ cm} \times 320 \text{ cm}$ aufwies, wurde der obere Teil der Öffnung mit einer hoch schalldämmenden Maske in Leichtbauweise verschlossen. Der Einbau der Wand erfolgte in üblicher Weise mit CW-Profilen, die oben und unten in UW-Profile eingestellt wurden. Da für den Einbau in die Prüföffnung nur eine lichte Breite von ca. 125 cm zur Verfügung stand, wurde der Achsabstand zwischen den CW-Profilen gegenüber dem Normwert von 62,5 cm geringfügig auf 60,0 cm vermindert, was jedoch praktisch keinen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse hat. Weiterhin wurde darauf verzichtet, die beiden äußeren CW-Profile an den Seitenwänden der Prüföffnung zu befestigen, weil der Versuchsaufbau als Teil einer großflächigen Wand (Ausschnitt aus dem Mittelteil der Wandfläche) konzipiert war. Die Abmessungen der Wand und der Prüföffnung sind in der nachfolgenden Skizze dargestellt:

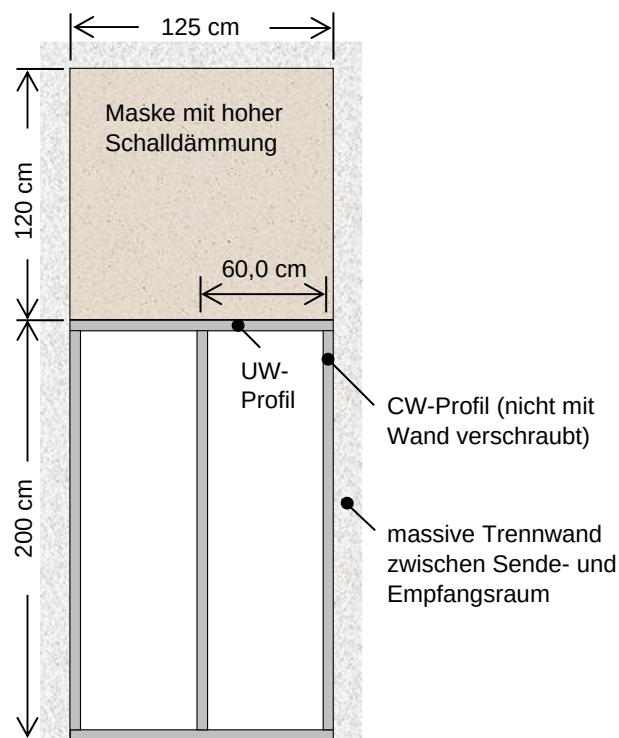


Abb. 12: Einbau der Messwand in die Prüföffnung zwischen Sende- und Empfangsraum.

Die Herstellung der Wand erfolgte in üblicher Weise, indem die Gipskartonplatten mit Schnellbauschrauben in einem Abstand von ca. 25 cm mit den Profilen verschraubt wurden. Da Platten mit den Abmessungen $B \times H = 125 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ zum Einsatz kamen, bestand die Beplankung der Wand auf der Vorder- und Rückseite jeweils nur aus einer einzigen fugenlosen Platte, so dass das Verspachteln der Plattenfugen entfiel. Um

Zeit zu sparen und den Ein- und Ausbau der Wand zu vereinfachen – dies war bei der Vielzahl der untersuchten Maßnahmen von großer praktischer Bedeutung – wurde zur Versiegelung der zwischen Beplankung und Prüföffnung vorhandenen Randfugen eine plastische Dichtmasse aus synthetischem Butyl-Kautschuk (Terostat) verwendet, die sich leicht anbringen und wieder entfernen ließ. Auf die akustischen Auswirkungen der Einbaubedingungen wird später noch genauer eingegangen.



Abb. 13: Fotos der Einbausituation im Prüfstand. Die Prüföffnung befand sich zwischen den Räumen P9a (Senderraum) und P10a (Empfangsraum) im bauakustischen Kombi-Prüfstand des IBP.

- links: Einbau der Ständerwand in die Prüföffnung (Mittelständer, Mineralwolle und vordere Beplankung fehlen noch).
- rechts oben: Wandhohlraum vor Befestigung der vorderen Beplankung. Der Hohlraum war vollflächig mit Mineralwolle gefüllt.
- rechts unten: Abdichtung der umlaufenden Randfugen zwischen Beplankung und Prüföffnung mit Terostat.

5.2 Unterschiede gegenüber bauüblichen Wänden

Wie bereits beschrieben, wurde für die durchgeführten Untersuchungen aus Zeit- und Kostengründen ein vereinfachter Versuchsaufbau verwendet. Gegenüber einer üblichen Gipskarton-Ständerwand am Bau bestanden im Wesentlichen folgende Unterschiede:

- Anstatt an vollflächigen Wänden erfolgten die Messungen an einem Wandausschnitt mit einer Fläche von $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$.
- Die Randfugen von Gipskarton-Ständerwänden werden am Bau üblicherweise mit einer gips- oder kunststoffgebundenen Spachtelmasse verschlossen, so dass eine starre Verbindung zu den flankierenden Bauteilen (Boden, Decke und Seitenwän-

de) entsteht. In dem Forschungsvorhaben wurde zur Versiegelung der Fugen hingegen eine plastische Dichtmasse eingesetzt, um den Aufwand für den Ein- und Ausbau der zahlreichen untersuchten Wände zu vermindern. Bei dem hierfür verwendeten Produkt Teroson RB IX (auch unter der früheren Bezeichnung Terostat IX bekannt) handelt es sich um eine plastische Knet- und Dichtmasse aus synthetischem Butyl-Kautschuk mit einer Dichte von ca. 1800 kg/m^3 und einer hohen inneren Dämpfung [64].

Da sich das Forschungsvorhaben mit der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen beschäftigt, muss sichergestellt sein, dass sich in den untersuchten Wänden im maßgeblichen Frequenzbereich von etwa 50 - 200 Hz in ausreichendem Maße Biegeschwingungen ausbilden können. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass die Biegewellenlänge der Beplankungsplatten kleiner als die Wandabmessungen ist. Die verwendeten Gipskartonplatten weisen bei 50 Hz eine Biegewellenlänge von $\lambda_B \approx 0,8 \text{ m}$ auf, so dass diese Voraussetzung im vorliegenden Fall erfüllt ist (der für die Wellenlänge angegebene Wert wurde aus den ermittelten technischen Daten der Platten berechnet).

Eine weitere Voraussetzung für die durchgeführten Untersuchungen besteht in einer genügend großen Anzahl von Eigenmoden bei tiefen Frequenzen. Die Modendichte sollte so hoch sein, dass in allen betrachteten Terzbändern zumindest einige Eigenschwingungen vorhanden sind (je mehr, desto besser). Wie die in Abb. 14 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, ist dies für den verwendeten Versuchsaufbau auch bei 50 Hz noch in ausreichendem Maße der Fall.

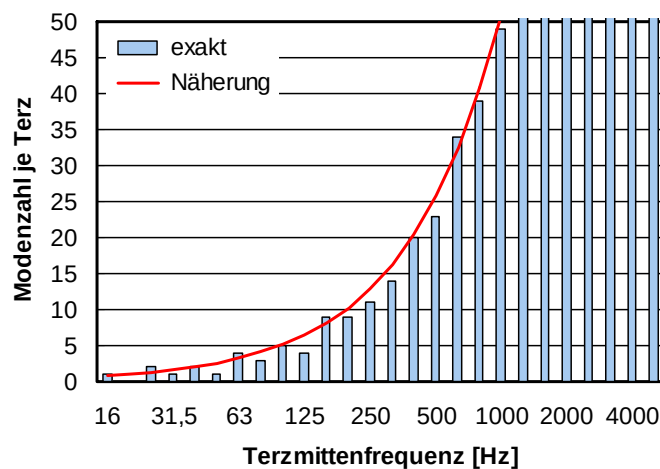


Abb. 14: Berechnete Modendichte einer Gipskartonplatte mit den Maßen $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$. Die Berechnung erfolgte für eine momentenfreie (drehbare) Lagerung der Plattenränder. Als Berechnungsgrundlage dienten folgende für die verwendeten Platten ermittelten technischen Angaben: $d = 12,5 \text{ mm}$, $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$ und $E = 1500 \text{ MN/m}^2$.

Um den Einfluss der Randabdichtung auf die Schalldämmung der betrachteten Wände zu untersuchen, wurden an einem einfachen Messaufbau (unbeschwerte Ständerwand mit beidseitig einlagiger Beplankung aus Gipskartonplatten) unter ansonsten gleichen Bedingungen nacheinander drei verschiedene Arten von Dichtungen eingebaut. Neben

der standardmäßigen Abdichtung mit Terostat handelte es sich dabei um eine elastische Versiegelung mit Acryl sowie einen über der Fuge angebrachten Klebestreifen (reifestes Kunststoffband mit Gewebeeinlage). Wie den Ergebnissen in der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, ergibt sich bei der Abdichtung mit Terostat – wegen der starken Bedämpfung der Plattenränder – erwartungsgemäß die höchste Schalldämmung. Das gilt auch im Vergleich zu einer gleichartigen Wand mit bauüblichen Abmessungen und praxisgerechter Abdichtung der Randfugen.

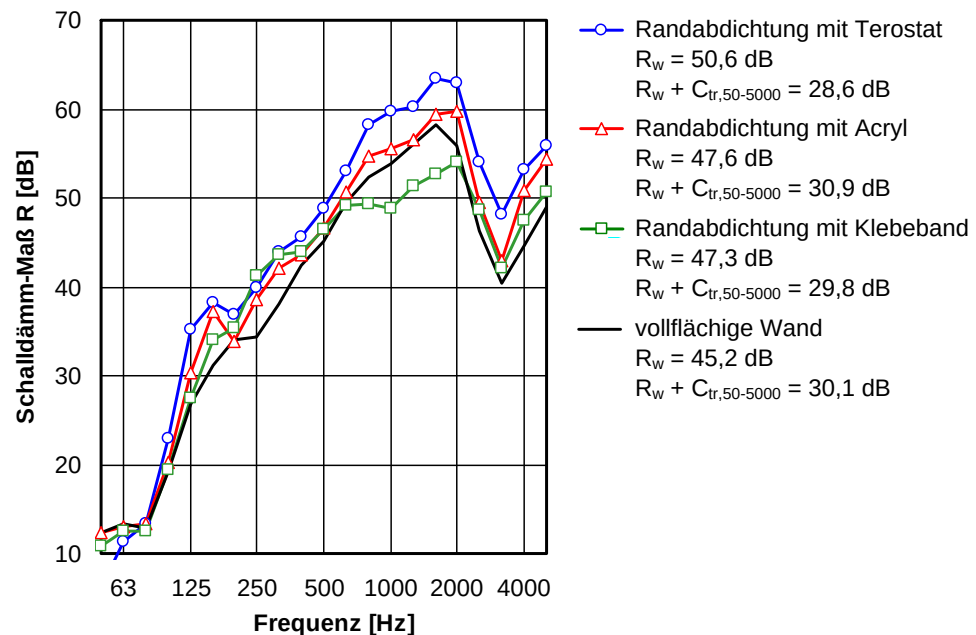


Abb. 15: Einfluss der Randabdichtung auf die Schalldämmung einer einlagig beplankten Gipskarton-Ständerwand. Zum Vergleich ist außerdem eine gleichartige Wand mit eingezeichnet, die im Gegensatz zu dem untersuchten Wandausschnitt (Fläche 2,5 m²) eine bautypische Fläche von ca. 10,8 m² aufwies. Bei der vollflächigen Wand waren die Randfugen, wie in der Praxis üblich, mit gipsgebundener Spachtelmasse verschlossen.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der verwendete Versuchsaufbau in seinen wesentlichen akustischen Eigenschaften für die durchgeführten Untersuchungen geeignet ist, auch wenn sich bei der Schalldämmung wegen der verringerten Bauteilfläche geringe Unterschiede gegenüber Wänden normaler Größe ergeben [65]. Aufgrund der Bedämpfung der Plattenränder durch die zur Abdichtung der Randfugen verwendete Dichtmasse (Terostat) ist die Schalldämmung einige Dezibel höher als bei gleichartigen Wänden am Bau. Außerdem wird die Doppelschalenresonanz der Wände abgeschwächt und die Unterschiede zwischen ein- und mehrlagig beplankten Wänden fallen geringer aus. Da es im vorliegenden Fall aber weniger auf den absoluten Wert des Schalldämm-Maßes als vielmehr auf die Verbesserung der Schalldämmung durch die entwickelten Maßnahmen ankommt, sind diese Unterschiede für das Ziel des Forschungsvorhabens von untergeordneter Bedeutung.

5.3 Durchführung der Messungen

Die Messung der Schalldämmung der untersuchten Wände erfolgte nach DIN EN ISO 10140 [60] unter Verwendung einer geeichten bauakustischen Messausrüstung (Mess-System Norsonic RTA 840). Der bauakustische Prüfstand, in dem die Messungen durchgeführt wurden, entsprach gleichfalls den Anforderungen nach DIN EN ISO 10140. Zur Erzeugung des Schallfeldes im Senderaum diente eine Dodekaeder-Lautsprecher, der während der Messungen mit einer pneumatischen Vorrichtung hin und her bewegt wurde. Für die Messung des Schallpegels im Sende- und Empfangsraum wurden feste Mikrofonpositionen verwendet, wobei jeweils über sechs verschiedene Positionen gemittelt wurde.

Da das Schallfeld in den Messräumen bei tiefen Frequenzen sehr ungleichmäßig verteilt ist, kommt der Auswahl geeigneter Mikrofonpositionen große Bedeutung zu, damit der über die verschiedenen Positionen gemittelte Schallpegel den mittleren Schallpegel im Raum möglichst gut repräsentiert. Um die optimalen Mikrofonpositionen zu ermitteln, wurden daher Vorversuche durchgeführt, bei denen das Schallfeld im Sende- und Empfangsraum unter ansonsten gleichen Bedingungen wie bei den Schalldämm-Messungen auf einem engmaschigen Netz abgetastet wurde [66]. Auf Grundlage der ermittelten Messdaten wurden dann die Mikrofonpositionen ausgewählt, die am besten mit dem über alle Positionen gemittelten Pegel übereinstimmten.

Da der für die Schalldämm-Messungen verwendete Senderaum P9a gleichzeitig auch Bestandteil eines Deckenprüfstandes ist, sind seine Wände mit Vorsatzschalen verkleidet. Diese Vorsatzschalen haben eine Resonanzfrequenz von 50 Hz, so dass sie bei dieser Frequenz in starkem Maße Schall absorbieren und das Schallfeld im Raum verzerren. Das hat zur Folge, dass sich bei der Messung der Schalldämmung bei 50 Hz systematisch zu hohe Werte ergeben. An und für sich ist das im vorliegenden Fall nicht kritisch, weil die in dem Forschungsvorhaben untersuchten Maßnahmen ihre Wirkung erst oberhalb von etwa 100 Hz entfalten. Die überhöhten Messwerte bei 50 Hz können aber bei der Berechnung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ zu Abweichungen führen. Deshalb wurden die Messwerte rechnerisch korrigiert, indem der für das Schalldämm-Maß bei 50 Hz gemessene Wert einheitlich bei allen Wänden um 8,5 dB abgesenkt wurde. Die Korrektur von 8,5 dB wurde ermittelt, indem das Schalldämm-Maß bei 50 Hz unter Verwendung des Massegesetzes aus dem bei 63 Hz gemessenen Wert berechnet wurde. Anschließend wurde die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert gebildet und über alle vorhandenen Messungen gemittelt.

Da bei den durchgeführten Versuchen teilweise auch Elastomere zum Einsatz kamen (es wurde gemischtzelliger Polyetherurethanschaum der Getzner Werkstoffe GmbH mit der Produktbezeichnung Sylomer verwendet), wurden neben den Schalldämm-Messungen auch Messungen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls durchgeführt. Hierbei wurde das Messverfahren nach DIN EN 29052-1 [67] verwendet, das zwar eigentlich für Trittschalldämmstoffe vorgesehen ist, für das verwendete Sylomer jedoch immerhin Näherungswerte liefert, die im übrigen recht gut mit den Herstellerangaben übereinstimmen.

5.4 Fremdgeräusche und Grenzdämmung

Wegen der im Umfeld vorhandenen Fremdgeräusche ist in bauakustischen Prüfständen immer ein mehr oder weniger hoher Grundgeräuschpegel vorhanden, der sich dem eigentlichen Mess-Signal überlagert. Der im Empfangsraum des verwendeten Prüfstands gemessene Grundgeräuschpegel ist in Abb. 16 dargestellt. Neben dem Grundgeräusch ist außerdem das Mess-Signal mit eingezeichnet, das bei einer typischen Schalldämm-Messung im Empfangsraum vorhanden ist (das dargestellte Mess-Signal wurde für eine Ständerwand mit $R_w = 52$ dB ermittelt, die sich hinsichtlich ihrer Schalldämmung im oberen Bereich der untersuchten Wände bewegte).

Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, beträgt der Abstand zwischen Mess-Signal und Grundgeräusch bei allen Frequenzen deutlich mehr als 10 dB. Für den Gesamtschallpegel L_{ges} ergibt sich sogar ein Unterschied von etwa 36 dB. Eine Beeinträchtigung der gemessenen Schalldämmung durch Fremdgeräusche ist daher normalerweise nicht zu befürchten.

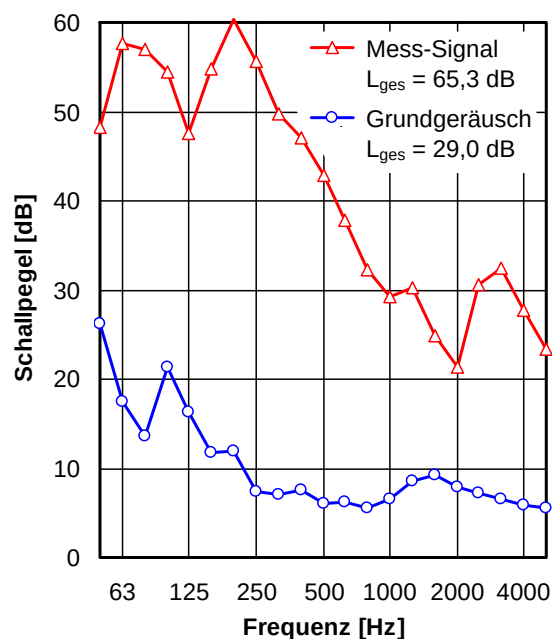


Abb. 16: Grundgeräuschpegel im Empfangsraum P10a im Vergleich zum Mess-Signal bei einer Schalldämm-Messung an einer Ständerwand mit $R_w = 52$ dB.

Selbst wenn das geprüfte Bauteil keinerlei Schall durchlässt, gelangt immer noch ein wenig Schall über Nebenwege vom Sende- in den Empfangsraum. Das entsprechende Schalldämm-Maß, das man als Grenzdämmung des Prüfstands bezeichnet, bestimmt die Höhe der Schalldämmung, die in dem Prüfstand maximal gemessen werden kann. Im vorliegenden Fall wurde die Grenzdämmung bestimmt, indem eine Ständerwand mit hoher Schalldämmung in den Prüfstand eingebaut und die Prüföffnung zusätzlich noch mit vorgesetzten Platten verschlossen wurde. Das auf diese Weise gemessene (auf die Fläche der Prüföffnung bezogene) Schalldämm-Maß ist in Abb. 17 dargestellt.

Aus der Abbildung geht hervor, dass zwischen der Grenzdämmung des Prüfstands und dem maximalen im Rahmen des Forschungsvorhabens gemessenen Schalldämm-Maß bei den meisten Frequenzen ein ausreichend großer Abstand von mehr als 10 dB besteht. Im Frequenzbereich von 100 - 160 Hz ist der Abstand zwar etwas geringer; hier kann der Einfluss der Grenzdämmung jedoch, soweit erforderlich, rechnerisch korrigiert werden. Da die meisten untersuchten Wände eine deutlich niedrigere Schalldämmung als die in Abb. 17 dargestellte Kurve aufwiesen, war eine Korrektur im Normalfall allerdings gar nicht erforderlich.

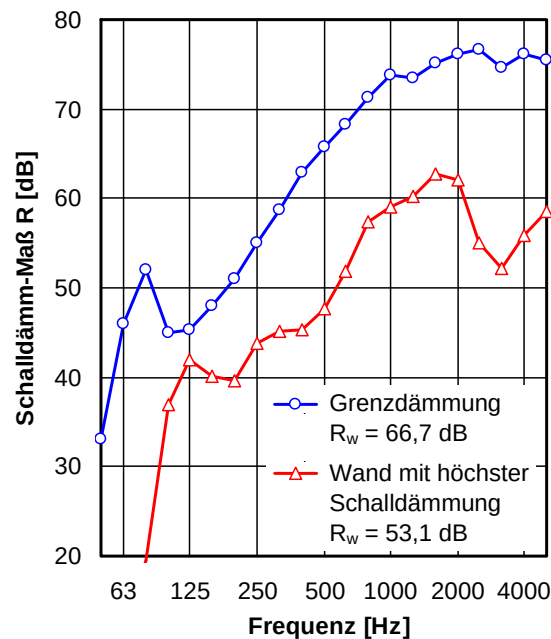


Abb. 17: Grenzdämmung des für die Untersuchungen verwendeten Prüfstands. Die zweite Kurve repräsentiert die Schalldämmung einer beidseitig dreifach beplankten Ständerwand. Es ist die Wand mit der höchsten Schalldämmung, die in dem Forschungsvorhaben untersucht wurde.

5.5 Reproduzierbarkeit

Ebenso wichtig wie geeignete Messbedingungen ist eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Messungen, da sich aus den Ergebnissen ansonsten keine Aussagen mit allgemeiner Geltung ableiten lassen. Entscheidend für die Reproduzierbarkeit ist im vorliegenden Fall weniger die Durchführung der akustischen Messungen (Wiederholungsmessungen am selben Aufbau zeigen, dass hier kaum Unterschiede bestehen) als vielmehr die Wiederholbarkeit bei der Herstellung der Messaufbauten. Das liegt daran, dass viele der Aufbauten aus einer großen Zahl von Einzelteilen bestehen und dass sich die Herstellungsdetails (Befestigung der Einzelteile, Verbindung der Teile untereinander, Abdichtung der Fugen, etc.) teilweise in starkem Maße auf die akustischen Eigenschaften auswirken.

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu überprüfen, wurde daher ein typischer Messaufbau komplett demontiert und anschließend wieder neu hergestellt. Bei dem untersuchten Aufbau handelte es sich um eine Gipskartonständerwand mit einlagig

beplankter Vorder- und dreilagig beplankter Rückseite. Die Vorderseite war zusätzlich mit fünfzehn Stahlplatten ($L \times B \times H = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$, $m = 2,81 \text{ kg}$) beschwert, die auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet waren. Die Messergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

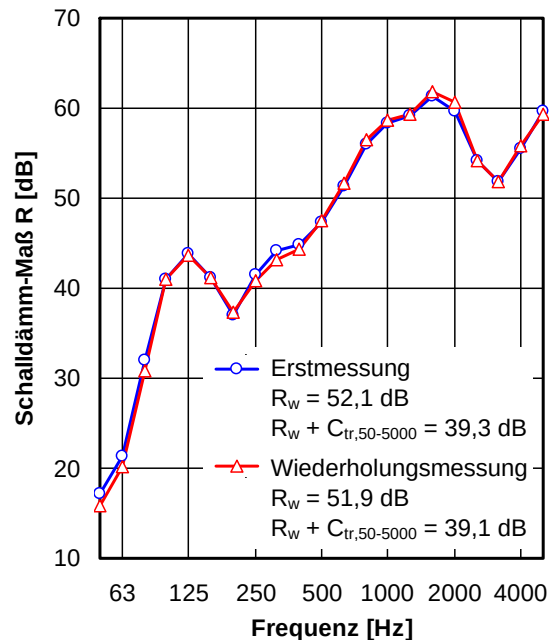


Abb. 18: Vergleich von Erst- und Wiederholungsmessung nach vollständiger Demontage und erneuter Herstellung des Messaufbaus. Der verwendete Aufbau ist oben beschrieben.

Wie sich aus den obigen Ergebnissen ergibt, sind die durchgeführten Messungen sehr gute reproduzierbar. Dies ist zum einen auf konstante akustische Messbedingungen (gleiche Mikrofon- und Lautsprecherpositionen, etc.) und zum anderen auf die handwerkliche Sorgfalt bei der Herstellung der Messaufbauten zurückzuführen.

6 Ergebnisse Teil 1 – Diverse Maßnahmen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den Maßnahmen, zu denen Voruntersuchungen durchgeführt wurden, die aber – da sie bei tiefen Frequenzen keine ausreichende akustische Verbesserungswirkung aufwiesen – anschließend nicht mehr weiterverfolgt wurden. Es handelte sich dabei um folgende Aufbauten:

- Elementierung der Beplankungsplatten der Ständerwand,
- Einbau von $\lambda/4$ -Resonatoren in den Wandhohlraum,
- Bedämpfung der Wandschalen durch vollflächig aufgeklebte Bitumenbahnen (breitbandige Dämpfung),
- Bedämpfung der Wandschalen durch Schwingungstilger (nur im Resonanzbereich der Tilger wirksam).

6.1 Elementierung der Wandschalen

Es ist allgemein bekannt, dass sich die Elementierung von plattenförmigen Bauteilen (d. h. die Unterteilung der Platten in getrennte Segmente mit schalldichter Versiegelung der zwischen den Segmenten vorhandenen Fugen) positiv auf die Schalldämmung bei hohen Frequenzen auswirkt. Dies ist unter anderem auf die verminderte Schallabstrahlung aufgrund des gestörten Biegewellenfeldes zurückzuführen, die insbesondere im Bereich der Koinzidenz eine Erhöhung der Schalldämmung bewirkt. Zum Einfluss der Elementierung bei tiefen Frequenzen existieren hingegen bislang noch kaum Erfahrungen. Deshalb wurden Messungen durchgeführt, bei denen die Beplankung der untersuchten Gipskarton-Ständerwände in streifenförmige Elemente unterteilt wurde.

Die verwendeten Gipskartonplatten hatten im Ausgangszustand eine Fläche von $B \times H = 125 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$. Die Elementierung der Platten erfolgte, indem die Plattenfläche durch horizontale Fugen in Streifen mit jeweils gleicher Höhe unterteilt wurde. So ergaben sich bei 40 cm Fugenabstand beispielsweise fünf übereinander angeordnete Streifen (siehe Abb. 19). Neben einem Fugenabstand von 40 cm wurden außerdem auch Elemente mit 20 cm und 30 cm Fugenabstand hergestellt.



Abb. 19: Beispiel für die Elementierung einer Gipskartonplatte mit den Maßen $B \times H = 125 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ in fünf Streifen mit einer Höhe von jeweils 40 cm. Die Fugen zwischen den Streifen wurden mit Klebeband beidseitig schalldicht verschlossen (rechts im Bild).

Bei der Herstellung der Wände wurde zunächst der unterste Gipskarton-Streifen an den Ständern festgeschraubt. Auf diesen Streifen wurde dann der nächste Streifen aufgesetzt und ebenfalls verschraubt. Ein Abstandshalter, der nach der Montage wieder entfernt wurde, bewirkte, dass zwischen den Streifen eine durchgehende 2 mm breite Trennfuge verblieb. Um die Wand akustisch abzudichten, wurden die Fugen anschließend von innen und außen mit selbstklebendem Gewebeklebeband verschlossen (aus früheren Untersuchungen geht hervor, dass beim Überkleben dünner Fugen mit einem ausreichend dicken, luftdichten Band der Schalldurchgang nahezu vollständig unterbunden wird [68]).

Bei der Messung der Schalldämmung wurde zunächst mit einer elementierten Gipskartonplatte begonnen. Danach erfolgten Messungen an einer Ständerwand, wobei die Vorderseite der Wand aus einer elementierten und die Rückseite aus einer unversehrten Gipskartonplatte bestand. Die ermittelten Messergebnisse sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen dargestellt:

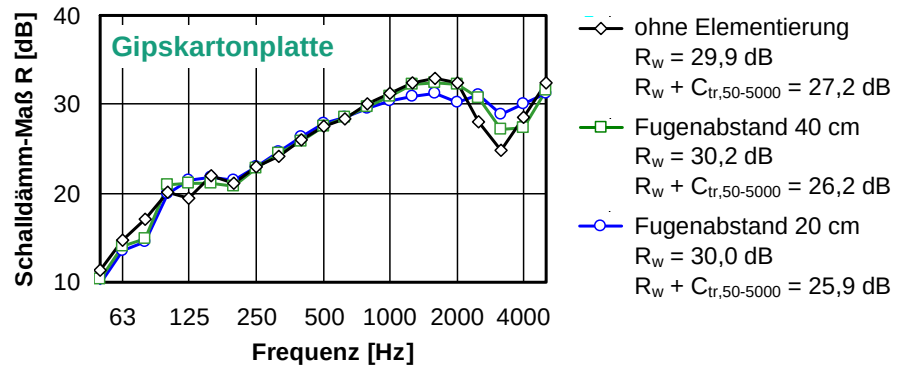


Abb. 20: Schalldämmung einer Gipskartonplatte mit und ohne Elementierung.

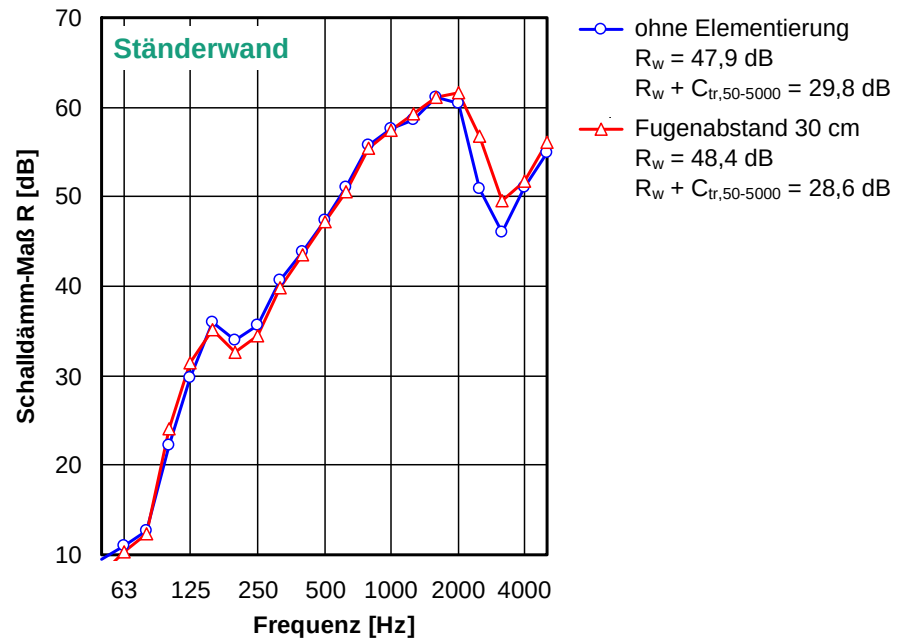


Abb. 21: Schalldämmung einer Ständerwand mit und ohne Elementierung. Die Elementierung erfolgte nur auf der vorderen Schale der Wand.

Die in den obigen Abbildungen dargestellten Messungen zeigen, dass durch die Elementierung der Wandschalen zwar erwartungsgemäß eine Verbesserung der Schalldämmung im Bereich der Koinzidenz erfolgt. Bei tiefen Frequenzen ist die Elementierung aber akustisch weitgehend wirkungslos. Teilweise tritt sogar eine leichte Verschlechterung der Schalldämmung ein, weshalb keine weiteren Untersuchungen dazu durchgeführt wurden.

6.2 $\lambda/4$ -Resonatoren im Wandhohlraum

Die Schalldämmung von Ständerwänden hängt in starkem Maße von der Bedämpfung des Wandhohlraums (d. h. der Befüllung des Hohlraums mit Schallabsorptionsmaterial) ab. Bei dem in Abb. 22 dargestellten Beispiel erhöht sich das bewertete Schalldämm-Maß R_w um 6,7 dB, wenn der zunächst leere Hohlraum vollständig mit Mineralwolle gefüllt wird. Bei tiefen Frequenzen ist die Wirkung der Mineralwolle allerdings verhältnismäßig gering, was auch daraus zu ersehen ist, dass der Unterschied bezogen auf die Einzulangabe $R_w + C_{tr,50-5000}$ lediglich 0,7 dB beträgt.

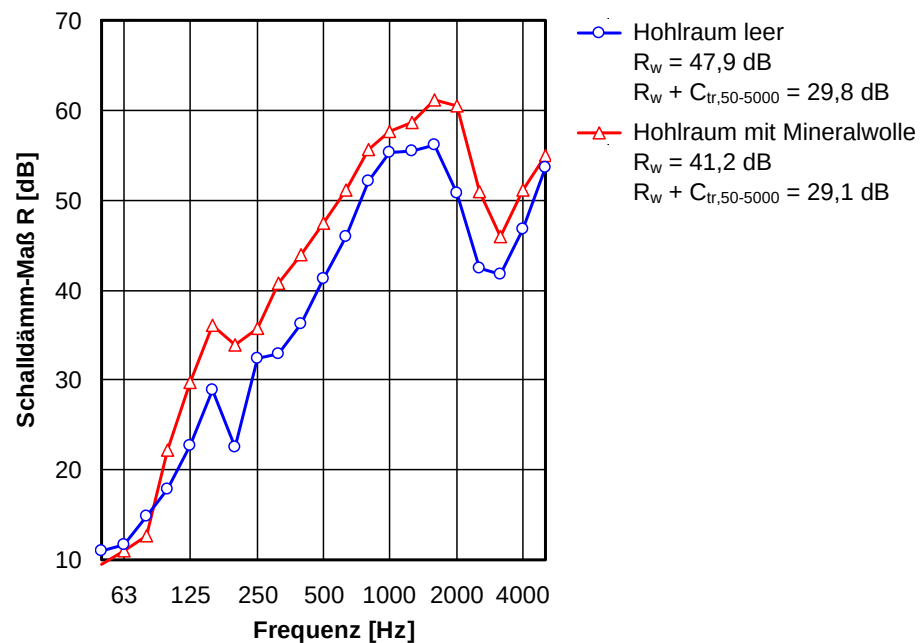


Abb. 22: Schalldämmung einer Gipskarton-Ständerwand (CW 75, beidseitig einlagig beplankt) bei leerem Wandhohlraum und bei Befüllung des Hohlraums mit Mineralwolle. Die Mineralwolle (Isover Akustic TP 1) füllte den Hohlraum vollständig aus.

Es liegt daher nahe, zur Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen zusätzlich Resonanzabsorber einzusetzen, die ihre Wirkung vor allem im tieffrequenten Bereich entfalten. Bei Versuchen mit Helmholtz-Resonatoren, deren Gesamtvolumen etwa 15 % des Hohlraumvolumens betrug, wurden im Bereich der Doppelschalenresonanz Verbesserungen vom mehr als 10 dB erreicht [34], wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass sich diese Angabe auf die Schalldämmung bei leerem Hohlraum bezieht und dass der verwendete Versuchsaufbau wegen des großen Herstellungsaufwandes nicht für die praktische Umsetzung geeignet ist.

Im vorliegenden Fall wurden zur Bedämpfung des Hohlraums bei tiefen Frequenzen deshalb $\lambda/4$ -Resonatoren eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass sie sich besonders einfach und kostengünstig herstellen lassen und im Verhältnis zu ihrem Volumen eine große Absorptionsfläche aufweisen. Bei $\lambda/4$ -Resonatoren handelt es sich um eine Sonderform von Helmholtz-Resonatoren. Sie bestehen aus einem einseitig geschlossenen Rohr, an dessen Mündung aufgrund des Impedanzsprungs zwischen Rohr und Freifeld

ein Teil des hindurchtretenden Schalls reflektiert wird [69 - 71]. Dies führt zur Ausbildung stehender Wellen, wenn die Länge des Rohrs einem Viertel der Wellenlänge des Schalls entspricht. An der Rohrmündung entsteht dabei ein Schwingungsbauch, an dem die Schallschnelle hohe Werte erreicht (siehe Skizze in Abb. 23).

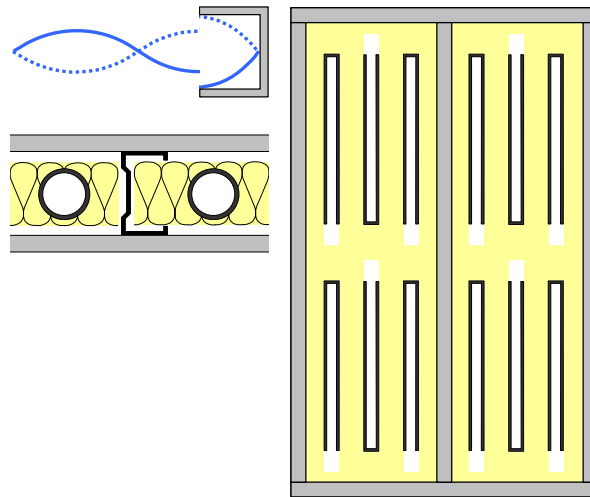


Abb. 23: Funktionsprinzip von $\lambda/4$ -Resonatoren (links oben) und Einbau der Resonatoren in die untersuchten Ständerwände im horizontalen Schnitt (links unten) und im vertikalen Schnitt (rechts).

Die bei den durchgeführten Untersuchungen verwendeten $\lambda/4$ -Resonatoren bestanden aus Kunststoffrohren (Polypropylen PP-H) mit einer Wandstärke von 2,7 mm und einem Innendurchmesser von 57,6 mm. Eine Seite der Rohre wurde mit einem Deckel verschlossen, die andere blieb offen. Die Rohrlänge betrug 680 mm, so dass sich eine Resonanzfrequenz von 125 Hz ergab. Es wurden zwölf Rohre verwendet, die jeweils senkrecht in die Wandhohlraum eingebaut wurden, wobei die Rohröffnung abwechselnd nach oben und nach unten wies. Das Gesamtvolumen der zwölf Rohre (ca. 0,021 m³) entsprach etwa 11 % des Volumens des Wandhohlraums. Die im Hohlraum befindliche Mineralwolle wurde weitgehend darin belassen und – wie in Abb. 24 zu sehen ist – nur im Bereich der Rohre und Rohröffnungen entfernt.



Abb. 24: Einbau der $\lambda/4$ -Resonatoren in den mit Mineralwolle gefüllten Wandhohlraum (dargestellt ist nur der obere Teil der Wand).

Da die Rohre auch ohne ihre Absorptionswirkung bei 125 Hz alleine schon wegen ihres Volumens und ihrer Masse die akustischen Eigenschaften der Wand verändern, wurden zur Kontrolle drei Messungen durchgeführt:

- Bei der ersten Messung wurde als Referenzwert die Schalldämmung der Wand ohne $\lambda/4$ -Resonatoren bestimmt.
- Die nächste Messung erfolgte mit eingebauten funktionsfähigen Resonatoren.
- Bei der letzten Messung wurden die Resonatoren im Wandhohlraum belassen, jedoch akustisch deaktiviert, indem auch das offene Ende der Rohre mit einem Deckel versehen wurde (die Rohre also beidseitig verschlossen waren).

Da zwischen den beschriebenen Untersuchungsvarianten kaum Unterschiede bestanden (siehe Messergebnisse in Abb. 25), ist davon auszugehen, dass sich die Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen mit Hohlraumresonatoren in der Praxis allenfalls geringfügig verbessern lässt.

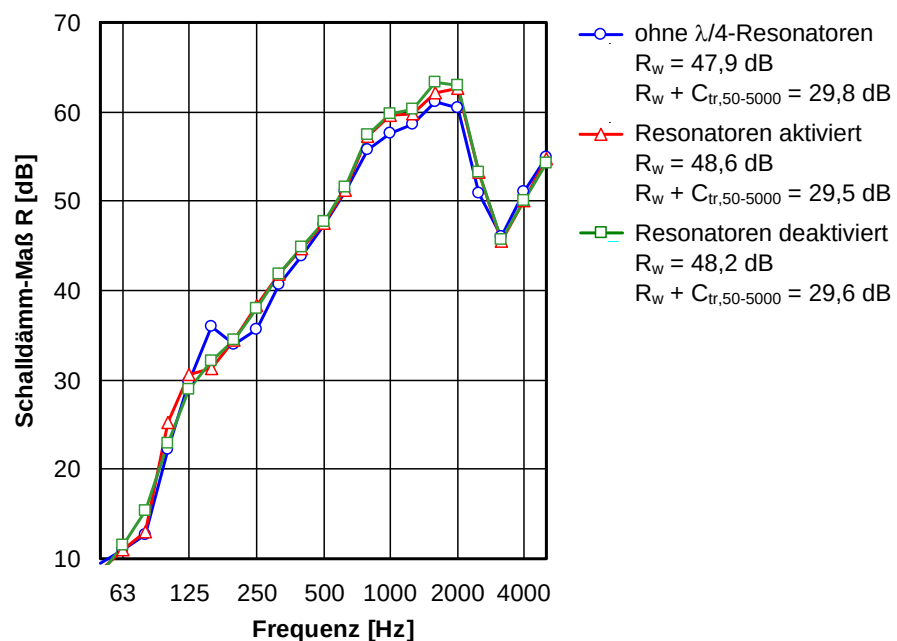


Abb. 25: Schalldämmung einer Gipskarton-Ständerwand (CW 75, beidseitig einlagig beplankt) mit und ohne im Wandhohlraum eingebauten $\lambda/4$ -Resonatoren. Bei der letzten Messung wurden die Resonatoren zur Kontrolle durch Verschließen beider Rohröffnungen akustisch deaktiviert.

6.3 Flächige Bedämpfung der Wandschalen

Bei Bauteilen mit niedriger innerer Dämpfung, wie z. B. Blechen, lässt sich die Schalldämmung erheblich verbessern, indem die Bauteiloberfläche ganz- oder teilflächig mit geeigneten Dämpfungsbelägen beklebt wird [72, 73]. Diese im Fahrzeug- und Maschinenbau weit verbreitete Maßnahme lässt sich – allerdings mit verminderter Wirkung – auch bei Gipskartonplatten anwenden. Zwar erfolgt die Verbesserung der Schalldämmung vorwiegend bei mittleren und hohen Frequenzen, doch auch bei tiefen Frequen-

zen sind positive akustische Effekte zu erwarten. Um den Einfluss auf die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen zu bestimmen, wurden daher Untersuchungen durchgeführt, bei denen Gipskartonplatten und Gipskarton-Ständerwände mit Dämpfungsbelägen versehen wurden.

Bei den verwendeten Dämpfungsbelägen handelte es sich um handelsübliche Bitumenmatten mit einer Dicke von 2,7 mm und einer flächenbezogenen Masse von $5,0 \text{ kg/m}^2$. Die Matten waren einseitig selbstklebend beschichtet, so dass sie direkt auf die Gipskartonplatten aufgeklebt werden konnten. Um die größtmögliche akustische Wirkung zu erreichen, wurde die Plattenoberfläche vollflächig mit Bitumen belegt. Dabei wurden zwei verschiedene Bauweisen verwendet: im einen Fall wurden die Matten einseitig auf die Gipskartonplatten aufgebracht, im anderen Fall wurden sie zwischen zwei Platten eingeklebt, so dass ein Sandwichelement mit Dämpfungskern entstand (siehe Abb. 26). Die letztgenannte Bauweise, die man auch als eingezwängten Dämpfungsbelag bezeichnet, weist theoretisch eine bessere Wirkung auf.

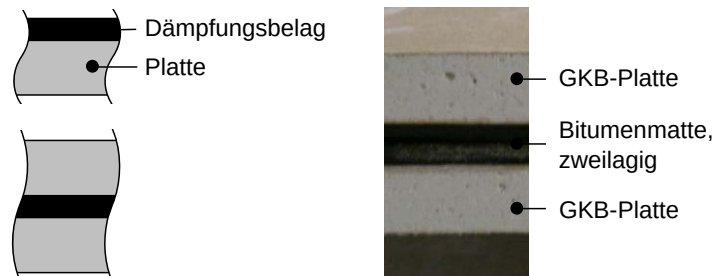


Abb. 26: Bedämpfung eines plattenförmigen Bauteils durch einen einseitig aufgetragenen Dämpfungsbelag (links oben) und einen eingezwängten Belag (links unten). Das Foto auf der rechten Seite zeigt als Beispiel eine der untersuchten Konstruktionen (zwei Gipskartonplatten mit dazwischen eingeklebter Dämpfungsschicht aus zwei Lagen einer 2,7 mm dicken Bitumenmatte).

Die Messungen wurden zunächst an einfachen Gipskartonplatten und anschließend an Gipskarton-Ständerwänden durchgeführt. Zum Vergleich mit den durch die Dämpfungsbeläge erzielten Verbesserungen wurden jeweils unbedämpfte Bauteile mit gleicher flächenbezogener Masse herangezogen.

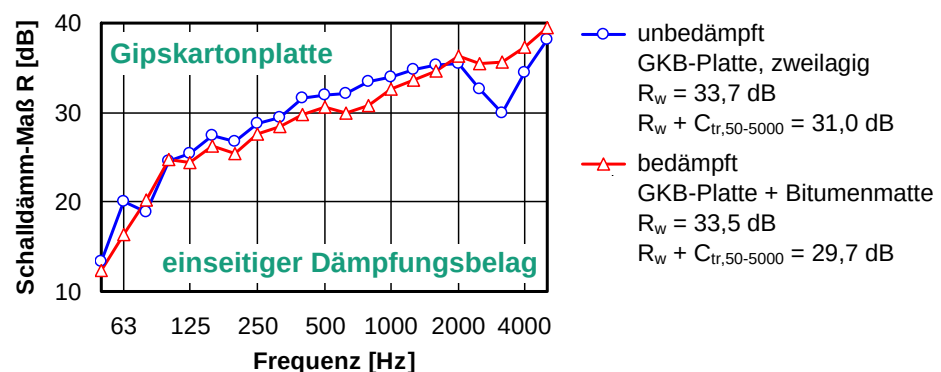


Abb. 27: Schalldämmung einer Gipskartonplatte mit und ohne Dämpfungsbelag. Der Belag (Bitumenmatte mit $m'' = 5,0 \text{ kg/m}^2$) wurde zweilagig aufgeklebt, wo-

bei die zweite Lage teilweise ausgespart wurde, so dass sich für das Bitumen insgesamt die gleiche Masse wie für eine einzelne Gipskartonplatte ($m'' = 8,5 \text{ kg/m}^2$) ergab.

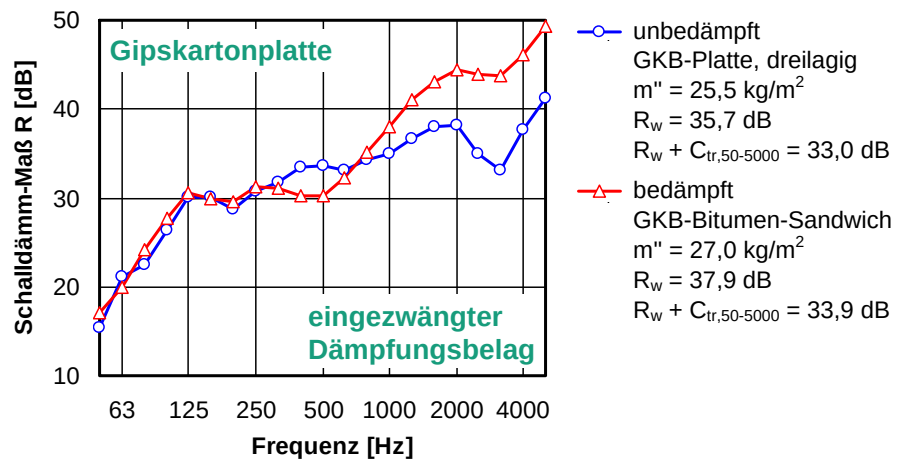


Abb. 28: Schalldämmung einer Gipskartonplatte mit und ohne Dämpfungsbelaag. Die Montage des Belaags erfolgte in Sandwichbauweise, d. h. zwei Lagen der verwendeten Bitumenmatten wurden zwischen zwei Gipskartonplatten eingeklebt. Ein Foto des Aufbaus ist in Abb. 26 dargestellt.

Den Messergebnissen in Abb. 27 und 28 ist zu entnehmen, dass sich mit eingezwängten Dämpfungsbelaagen wie erwartet eine höhere Verbesserung der Schalldämmung als mit einseitigen Belaagen ergibt. Bei tiefen Frequenzen ist die Wirkung allerdings in beiden Fällen nur gering.

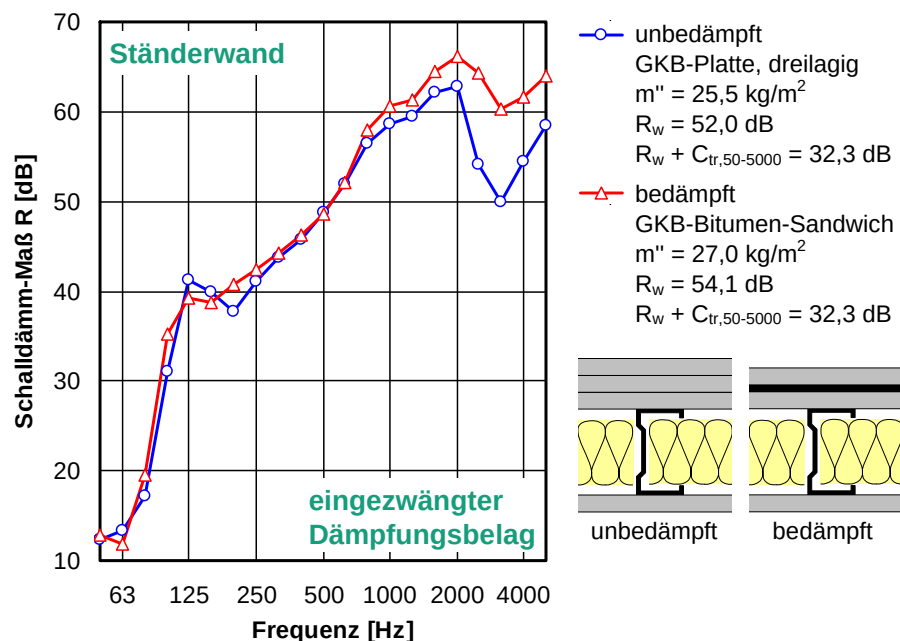


Abb. 29: Schalldämmung einer einseitig bedämpften Ständerwand (Vorderseite einfach beplankt, Rückseite als Sandwichelement) im Vergleich zu einer unbedämpften Wand mit etwa gleicher Masse.

Die geringe akustische Wirkung von Dämpfungsbelägen bei tiefen Frequenzen zeigt sich auch bei der in Abb. 29 dargestellten Ständerwand, bei der ein aus zwei Gipskartonplatten und zwei dazwischen eingeklebten Bitumenmatten bestehendes Sandwichelement die vorderseitige Beplankung bildete. Eine flächige Bedämpfung der Wandschalen mit aufgeklebten Belägen ist zur Verbesserung der Schalldämmung von Ständerwänden bei tiefen Frequenzen in der Praxis daher nur wenig geeignet.

6.4 Bedämpfung der Wandschalen mit Schwingungstilgern

Im Gegensatz zu Dämpfungsbelägen lassen sich Schwingungstilger auf unterschiedliche Frequenzen abstimmen und bieten so die Möglichkeit, die Beplankung von Ständerwänden gezielt bei tiefen Frequenzen zu bedämpfen. Der Herstellungsaufwand hält sich in Grenzen, ist aber natürlich deutlich höher als bei Dämpfungsbelägen. Es wurde untersucht, in welchem Maße sich die Schalldämmung von Gipskartonständerwänden mit Schwingungstilgern im Bereich tiefer Frequenzen verbessern lässt.

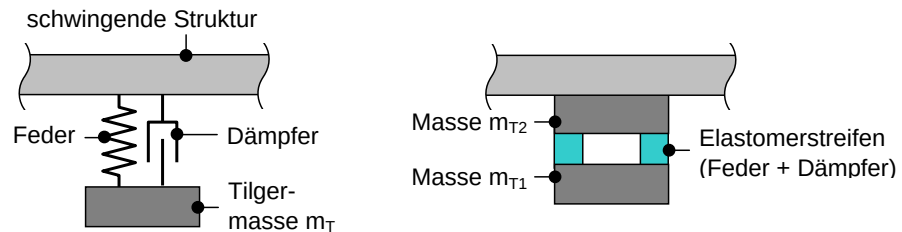


Abb. 30: Funktionsprinzip eines Schwingungstilgers (links) mit Darstellung der für die Bedämpfung der untersuchten Gipskarton-Ständerwände verwendeten Konstruktionsvariante (rechts).

Schwingungstilger bestehen im Prinzip aus einer beweglichen Masse, die über eine Feder mit hoher innerer Dämpfung an die schwingende Struktur angekoppelt wird (siehe Abb. 30). Als Feder werden zumeist Elastomerelemente verwendet, die über geeignete Materialeigenschaften (Elastizität und hoher Verlustfaktor) verfügen. Im Resonanzbereich schwingt die Tilgermasse mit hoher Amplitude, wodurch der schwingenden Struktur Körperschallenergie entzogen und in Wärme umgewandelt wird. Für die Resonanzfrequenz f_0 ergibt sich folgender Ausdruck:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{c \left(\frac{1}{m_T} + \frac{1}{m_S} \right)} \quad (10)$$

mit c = Federkonstante [N/m],
 m_T = Tilgermasse [kg],
 m_S = mitbewegte Masse der schwingenden Struktur [kg].

Um eine ausreichende Stabilität der Anordnung zu gewährleisten, muss die verwendete Feder verhältnismäßig steif sein. Resonanzfrequenzen im angestrebten tieffrequenten Bereich erfordern daher genügend große Massen. Da Gipskartonplatten hierfür nicht schwer genug sind, wurden für die Untersuchungen Tilger mit veränderter Bauweise verwendet. Sie bestanden aus zwei gleich großen elastisch verbundenen Massen, von

denen die eine, wie in Abb. 30 dargestellt, direkt an der Beplankung der Ständerwand befestigt wurde. Bei leichten Bauteilen, wie Gipskarton- oder Holzfaserplatten, ergibt sich für die Resonanzfrequenz dieser Konstruktion näherungsweise der bauteilunabhängige Ausdruck

$$f_0 \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{c \left(\frac{1}{m_{T1}} + \frac{1}{m_{T2}} \right)}, \quad (11)$$

wobei m_{T1} und m_{T2} die beiden Massen des Tilgers bezeichnen.

Die Massen der verwendeten Tilger wurden aus Stahlplatten hergestellt, da Stahl wegen seiner hohen Dichte von 7800 kg/m^3 eine besonders kompakte Bauweise ermöglicht. Um die Herstellung zu vereinfachen, wurden die Stahlplatten aus übereinanderliegenden vollflächig starr miteinander verklebten Blechstücken (Dicke je $2,0 \text{ mm}$) zusammengesetzt. Als Material für die erforderlichen Elastomerelemente diente Sylomer HD 30 der Getzner Werkstoffe GmbH. Es besteht aus gemischtzelligem Polyetherurethan und weist den Herstellerangaben zufolge einen besonders hohen Verlustfaktor von etwa $\eta = 0,4 - 0,5$ auf [74, 75].

Es wurden zwei unterschiedliche Typen von Schwingungstilgern hergestellt, die sich hinsichtlich ihrer Masse und ihrer Resonanzfrequenz voneinander unterschieden. Die wichtigsten Angaben zu den Tilgern sind in Tab. 1 zusammengefasst:

Typ	erste Masse	zweite Masse	Elastomer-Feder	m_{ges} [kg]	f_0 [Hz]
Tilger Nr. 1	Stahlplatte, 100 x 100 x 8 $m = 0,62 \text{ kg}$	Stahlplatte, 100 x 100 x 10 $m = 0,78 \text{ kg}$	Sylomer HD 30 zwei Streifen á 100 x 10 x 12,5	1,40	170
Tilger Nr. 2	Stahlplatte, 100 x 100 x 18 $m = 1,40 \text{ kg}$	Stahlplatte, 100 x 100 x 18 $m = 1,40 \text{ kg}$	Sylomer HD 30 zwei Streifen á 100 x 25 x 12,5	2,81	130

Tab. 1: Aufbau der verwendeten Schwingungstilger (alle Maße in mm). Neben den Maßen und Gewichten sind außerdem die Gesamtmasse m_{ges} sowie die gemessene Resonanzfrequenz f_0 der Tilger aufgeführt.

Eigentlich war vorgesehen, beide Tilger einheitlich auf eine Resonanzfrequenz von 125 Hz abzustimmen. Es war jedoch nicht möglich, die Resonanzfrequenz genau zu berechnen, weil für die erforderlichen Eingangsdaten nur Näherungswerte vorlagen und der Formfaktor der verwendeten Sylomerstreifen nur näherungsweise bestimmt werden konnte. Auch der für die dynamische Steifigkeit von Sylomer HD 30 gemessene Wert in Höhe von ca. $3,2 \text{ MN/m}^2$ stellt lediglich eine Näherung dar, so dass Abweichungen zwischen der angestrebten und der tatsächlich gemessenen Resonanzfrequenz nicht völlig zu vermeiden waren.

Ein Beispiel für die verwendeten Tilger ist in Abb. 31 dargestellt. Da ein einzelner Tilger selbstverständlich nicht ausreicht, wurden jeweils fünfzehn Tilger an der Wand befestigt, wodurch sich je nach Typ des Tilgers eine Gesamtmasse von 8,4 bzw. 16,8 kg/m² (also etwa die Masse von einer bzw. zwei Gipskartonplatten) ergab. Der Abstand zwischen den Tilgern betrug in horizontaler und vertikaler Richtung jeweils 40 cm. Wie später noch erläutert wird, hat ein derartiges periodisches Gitter von Massen besondere akustische Eigenschaften, die gleichfalls eine Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen bewirken. Um die akustische Wirkung der Schwingungstilger und des periodischen Massengitters voneinander zu trennen, wurde daher eine weitere Messung durchgeführt, bei der die Tilger gemäß Abb. 32 statt auf einem periodischen Gitter unregelmäßig verteilt auf der Wandfläche angeordnet waren. Gemessen wurde zunächst an einer Gipskartonplatte und anschließend an einer Ständerwand.

Schwingungstilger, Typ 2

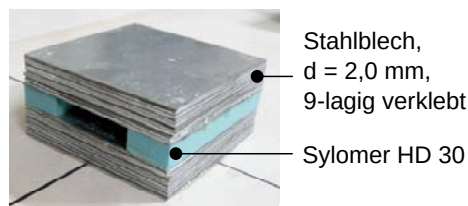


Abb. 31: Beispiel für einen der verwendeten Schwingungstilger (links) und Befestigung der Tilger auf der Wandoberfläche (rechts). In dem dargestellten Beispiel sind die Tilger auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet.

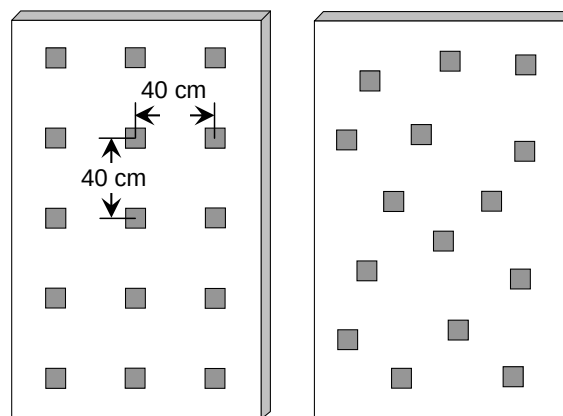


Abb. 32: Anordnung der Schwingungstilger auf der Wand. Die fünfzehn verwendeten Tilger wurden entweder auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm (links) oder alternativ in ungeordneter Weise statistisch verteilt (rechts) auf der Wandoberfläche befestigt.

Die Messergebnisse für den Schwingungstilger Nr. 1 (mit einer Masse von 1,4 kg) auf einer Gipskartonplatte sind in Abb. 33 dargestellt. Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, ist bei Anordnung der Tilger auf einem periodischen Gitter bei einer Frequenz von 125 Hz eine merkliche Verbesserung der Schalldämmung zu verzeichnen. Bei unregelmäßiger Verteilung der Tilger vermindert sich der Effekt jedoch erheblich, was darauf hindeutet, dass die Ursache für die Verbesserung weniger in der Bedämpfung der Gipskartonplatte durch die Tilger als vielmehr in der Beschwerung der Platte durch die Tilgermasse zu suchen ist. Bei mittleren und hohen Frequenzen ist die Schalldämmung erwartungsgemäß in beiden Fällen deutlich niedriger als bei einer unbedämpften Platte mit gleicher Gesamtmasse.

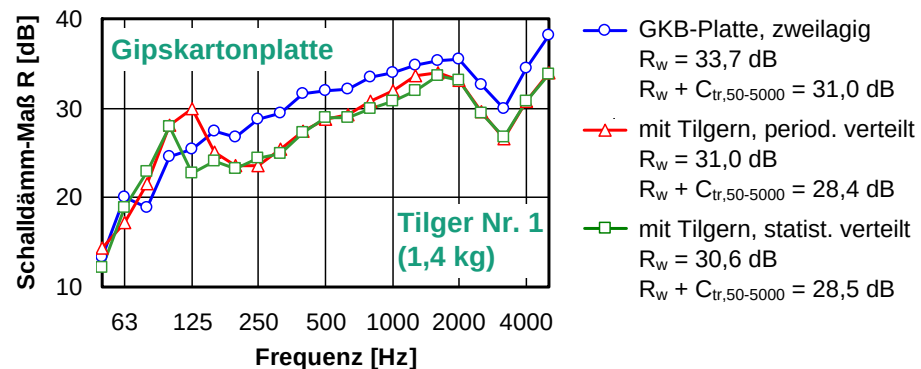


Abb. 33: Schalldämmung einer mit Schwingungstilgern versehenen Gipskartonplatte im Vergleich zu einer unbedämpften Platte mit gleicher Gesamtmasse. Die Anordnung der Tilger auf der Platte erfolgte entweder auf einem periodischen Gitter (rote Kurve) oder in Form einer statistischen Verteilung (grüne Kurve).

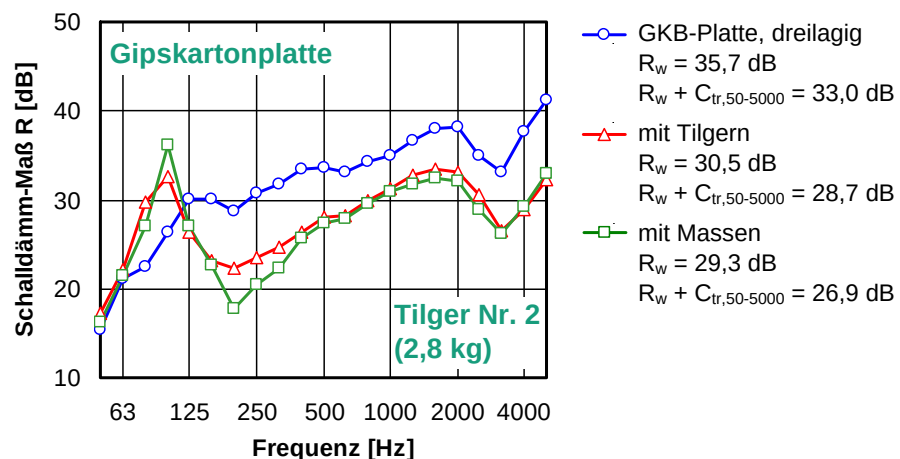


Abb. 34: Schalldämmung einer Gipskartonplatte mit Schwingungstilgern im Vergleich zu einer unbedämpften Platte mit gleicher Gesamtmasse. Die Tilger waren auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet (rote Kurve). Bei der grünen Kurve wurden die Tilger bei ansonsten gleichem Aufbau durch starre Massen mit gleichem Gewicht ersetzt.

Ein ähnliches Verhalten wie in Abb. 33 ist auch aus den in Abb. 34 dargestellten Ergebnissen, die für den Schwingungstilger Nr. 2 (Masse ca. 2,8 kg) ermittelt wurden, ersichtlich. Wegen der größeren Tilgermasse sind die akustischen Effekte hier stärker ausgeprägt als beim Tilger Nr. 1. Außerdem setzt die Verbesserung der Schalldämmung bereits eine Terz früher ein. Ersetzt man die Tilger durch gleich schwere Massen, so bleibt die Verbesserung nicht nur erhalten, sondern steigt – zumindest im Bereich des Dämmungsmaximums – sogar noch leicht an. Auch hier scheint die Bedämpfung der Platte durch die Tilger akustisch von eher untergeordneter Bedeutung zu sein.

Gleiches gilt auch bei Anbringung der Schwingungstilger an einer Ständerwand (siehe Abb. 35). Insgesamt gesehen ergibt sich für die Tilger hier jedoch eine bessere akustische Bilanz, da die Verschlechterung der Schalldämmung bei mittleren und hohen Frequenzen, die bei einschaligen Platten sehr deutlich zutage tritt, bei zweischaliger Bauweise sehr viel geringer ausfällt. Offenbar wird der Effekt durch die rückseitige Beplankung der Ständerwand, an der sich keine Tilger befinden, weitgehend kompensiert. Werden auch an der Rückseite der Wand Tilger oder Massen angebracht, so kommt es den vorliegenden Messergebnissen zufolge auch hier – bezogen auf eine herkömmliche Ständerwand mit gleicher Masse der Beplankung – zu einer deutlichen Verschlechterung der Schalldämmung.

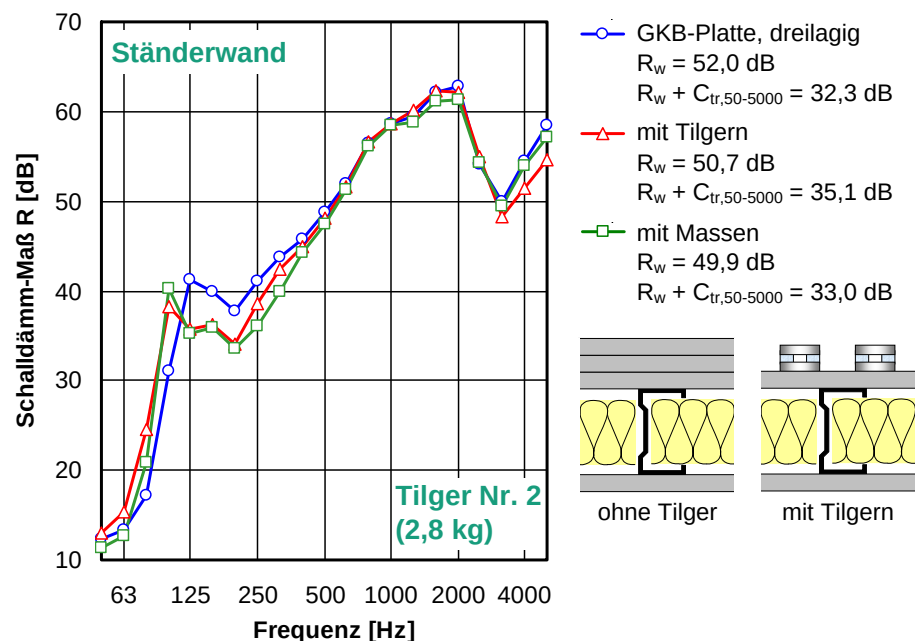


Abb. 35: Schalldämmung einer Gipskarton-Ständerwand (CW 75, beidseitig einlagig beplankt), auf deren Vorderseite Schwingungstilger bzw. gleich schwere Massen angebracht waren. Tilger und Massen waren auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet. Bei der blauen Kurve bestand die Vorderseite der Wand aus drei Lagen von Gipskartonplatten, die die gleiche Gesamtmasse wie die mit Tilgern versehene Wandschale aufwiesen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Schalldämmung von Gipskarton-Ständerwänden durch die Bedämpfung der Wandschalen mit Schwingungstilgern bei

tiefen Frequenzen nur verhältnismäßig wenig verbessern lässt. Günstiger ist es, die Wände zu beschweren, indem kleinflächige Zusatzmassen auf einem periodischen Gitter an den Wandschalen angebracht werden. Die weiteren Untersuchungen konzentrieren sich deshalb auf die letztgenannte Maßnahme. Schwingungstilger können möglicherweise in Kombination mit der Beschwerung der Wandschalen eingesetzt werden, um Dämmungseinbrüche abzumildern oder die Schalldämmung – wenn auch nur in geringem Maße – noch weiter anzuheben.

7 Ergebnisse Teil 2 – Periodische Beschwerung

Durch die Beschwerung plattenförmiger Bauteile mit kleinflächigen Zusatzmassen, die auf einem periodischen Gitter angeordnet sind (im folgenden kurz als periodische Beschwerung bezeichnet), lässt sich in einem begrenzten Frequenzbereich eine starke Verbesserung der Schalldämmung erreichen. Die theoretischen Grundlagen für diesen Effekt sind zwar schon längere Zeit bekannt, bislang fehlte es jedoch – abgesehen von Modellmessungen an Folienkonstruktionen – an der Umsetzung in die bauliche Praxis. Aus den vorliegenden Erkenntnissen lässt sich schließen, dass sich die periodische Beschwerung auch dazu eignet, um die Schalldämmung von Gipskartonplatten bei tiefen Frequenzen zu verbessern. Werden derart beschwerte Platten zur Beplankung von Ständerwänden eingesetzt, tritt natürlich auch dort eine Erhöhung der Schalldämmung ein. Nachfolgend wird deshalb untersucht, welche Einsatzmöglichkeiten und welches Verbesserungspotenzial die periodischen Beschwerung von Gipskartonplatten in der Praxis bietet.

Zunächst wird in kurzer Form die akustische Wirkungsweise der periodischen Beschwerung sowie ihr Einfluss auf die Schalldämmung des beschwerten Bauteils erläutert. Da die Beschwerung in unterschiedlicher Weise erfolgen kann, schließt sich eine Darstellung der untersuchten Konstruktionsvarianten an, aus der sich auch die zugehörigen technischen Daten entnehmen lassen. Die durchgeführten Berechnungen dienen zum einen dazu, den Einfluss der verschiedenen Konstruktionsparameter, wie z. B. Fläche und Abstand der Zusatzmassen, auf die Schalldämmung zu ermitteln. Zum anderen lässt sich die Resonanzfrequenz berechnen, bei der die Schalldämmung der beschwerten Platte ihr Maximum durchläuft. Dies ermöglicht es, die Beschwerung in der Planungsphase so auszulegen, dass die Verbesserung der Schalldämmung im gewünschten Frequenzbereich erfolgt.

Da die periodische Beschwerung am besten wirkt, wenn die Zusatzmassen kleine Abmessungen und ein hohes Gewicht aufweisen, wurden bei den meisten Messungen Stahlplatten zur Beschwerung der Wände verwendet. Für den Einsatz in der Praxis ist Stahl schon aus Kostengründen allerdings nur bedingt geeignet. Deshalb bildete auch die Suche nach alternativen Konstruktionen mit besserer Praxistauglichkeit einen wichtigen Bestandteil des Forschungsvorhabens. Dabei wurden nicht nur andere Baustoffe, sondern auch Konstruktionsvarianten mit anderer Geometrie (wie z. B. streifenförmige Beschwerungen) betrachtet.

7.1 Grundlagen der periodischen Beschwerung

Bei der periodischen Beschwerung einer Platte bilden die Zusatzmassen und die dazwischen liegenden Plattenbereiche ein zweidimensionales Masse-Feder-System. Im Resonanzbereich des Systems schwingen die benachbarten Elemente mit einer Phasenverschiebung von 180° . Das hat zur Folge, dass sich bei Mittelung der Schwingungsgeschwindigkeit über die gesamte Bauteiloberfläche ein Wert von Null ergibt, so dass sich die von den einzelnen Teilelementen erzeugten Schallanteile gegenseitig auslöschen. Da kein Schall abgestrahlt wird, wird die Schalldämmung - zumindest theoretisch - unendlich hoch. In der Praxis wird das Dämmungsmaximum aufgrund der in allen Bauteilen vorhandenen Dämpfung (innere Verluste des Plattenmaterials und Energieableitung an den Bauteilrändern) allerdings erheblich abgeschwächt.

Oberhalb der Resonanz schwingen die Zusatzmassen mit zunehmender Frequenz im Verhältnis zur restlichen Platte immer weniger stark. Die Bewegung der Zusatzmassen reicht dann nicht mehr aus, um die Schallabstrahlung der unbeschwerten Bereiche zu kompensieren, so dass die Schalldämmkurve ein Minimum durchläuft. Steigt die Frequenz noch weiter an, bewegen sich die Zusatzmassen schließlich praktisch gar nicht mehr. Die Schallübertragung erfolgt dann nur noch über die zwischen den Massen befindlichen Plattenbereiche, weshalb sich bei hohen Frequenzen in etwa die gleiche Schalldämmung wie für die unbeschwerte Platte ergibt.

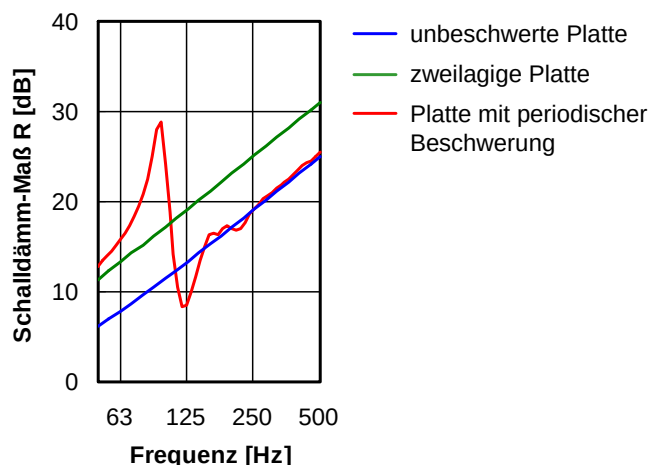


Abb. 36 Beispiel für die Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte. Die Kurven wurden mit dem Programm HYPERAKUS [76] für diffusen Schalleinfall berechnet. Die Beschwerung bestand aus $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ großen Platten mit einem Gewicht von je $1,4\text{ kg}$, die mit 40 cm Abstand auf einem quadratischen Gitter angeordnet waren. Die Gesamtmasse der Beschwerung betrug $8,75\text{ kg/m}^2$ und war damit etwa ebenso groß wie die flächenbezogene Masse der unbeschwerten Platte.

Die Schalldämmkurve einer periodisch beschwerten Platte folgt den vorangehenden Ausführungen zufolge im Prinzip immer einem ähnlichen Verlauf: auf ein Dämmungsmaximum im Resonanzbereich folgt zunächst mit ansteigender Frequenz ein Bereich mit verringerter Schalldämmung. Bei noch höheren Frequenzen verhält sich die Be-

schwerung dann akustisch weitgehend neutral, d. h. sie wirkt sich kaum noch auf die Schalldämmung aus. Frequenz und Breite des Dämmungsmaximums lassen sich über die technischen Parameter der Konstruktion (Abstand, Fläche und Gewicht der Zusatzmassen) gezielt verändern und so an die jeweiligen akustischen Anforderungen anpassen.

Ein typisches Beispiel für die Schalldämmung einer periodisch beschwerten Platte ist in Abb. 36 dargestellt. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, lässt sich die Schalldämmkurve in vier Frequenzbereiche unterteilen:

- a) In ausreichendem Abstand unterhalb der Resonanzfrequenz schwingen die Zusatzmassen und die unbeschwerten Bereiche der Platte in Phase. Die Schalldämmung folgt dem Massegesetz und entspricht einer einschaligen Platte, deren flächenbezogene Masse sich aus der Gesamtmasse von Beschwerung und unbeschwerter Platte ergibt.
- b) Im Resonanzbereich erfolgt ein starker Anstieg der Schalldämmung. Das Dämmungsmaximum übersteigt deutlich die Schalldämmung, die für eine homogene Platte mit der Gesamtmasse von unbeschwerter Platte und Beschwerung nach dem Massegesetz zu erwarten wäre (grüne Kurve).
- c) An den Resonanzbereich schließt sich ein Einbruch im Verlauf der Schalldämmungskurve an. Im Bereich des Dämmungsminimums sinkt die Schalldämmung unter das Schalldämm-Maß der unbeschwerten Platte (blaue Kurve) ab.
- d) Oberhalb des Dämmungseinbruchs nähert sich die Schalldämmkurve der beschwerten Platte an die unbeschwerte Platte an, bis bei etwas höheren Frequenzen beide Kurven übereinstimmen.

Im Prinzip sind sowohl für die Massen als auch für das Gitter unterschiedliche Geometrien möglich. So können sich die Abstände der Massen in horizontaler und vertikaler Richtung z. B. durchaus voneinander unterscheiden. Im vorliegenden Fall wird zur Vereinfachung der Darstellung jedoch sowohl bei den Massen als auch beim Gitter immer eine quadratische Geometrie verwendet. Da dies auch in der Praxis die häufigste Bauweise darstellen dürfte, ist die quadratische Geometrie als wichtigste Konstruktionsvariante für periodische Beschwerungen anzusehen.

Die akustischen Eigenschaften von periodischen Beschwerungen hängen – neben Masse und Biegesteife der unbeschwerten Platte – vor allem von drei Parametern ab: dem Abstand zwischen den einzelnen Massen sowie ihrem Gewicht und ihren Abmessungen. Die Kenntnis der entsprechenden Werte bildet die wichtigste Voraussetzung, um die Schalldämmung periodisch beschwerter Platten zu berechnen. Auf die durchgeführten Berechnungen, die mit dem im IBP entwickelten Programm HYPERAKUS erfolgten, wird später noch ausführlich eingegangen. Die für die Eingabe in das Berechnungsmodell benötigten geometrischen Angaben werden in der nachfolgenden Abbildung definiert und erläutert:

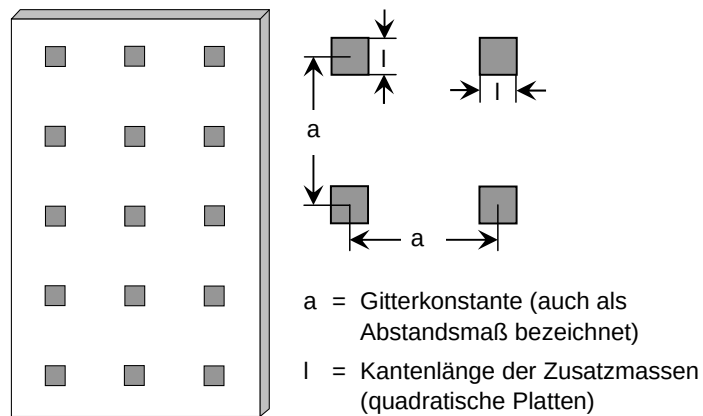


Abb. 37: Beispiel für die periodische Beschwerung eines plattenförmigen Bauteils mit Zusatzmassen in Form quadratischer Platten. Für die Gesamtmasse der Beschwerung je Flächeneinheit ergibt sich die Beziehung $m''_+ = m_+/a^2$, wobei m_+ das Gewicht einer einzelnen Zusatzmasse bezeichnet.

7.2 Untersuchte Konstruktionsvarianten

Alle periodischen Beschwerungen, an denen Messungen durchgeführt wurden, waren an einschaligen Platten aus Gipskarton befestigt. Die beschwerten Platten dienten entweder selbst als Prüfobjekt oder wurden in unterschiedlicher Kombination zur ein- oder beidseitigen Beplankung von Ständerwänden verwendet. Der Grundaufbau (d. h. Gipskartonplatte mit periodischer Beschwerung) war jedoch immer gleich und ist in Tab. 2 für die verschiedenen Varianten der Beschwerung dargestellt:

Nr.	Gitter-konst. a	Material	Zusatzmassen			
			Abmessungen L x B x H	m_+ [kg]	m''_+ [kg/m ²]	Kontaktfläche L x B
1	400	Stahl	100 x 100 x 18	1,40	8,42	100 x 100
2	400	Stahl	100 x 100 x 36	2,81	16,85	100 x 100
3	300	Stahl	100 x 100 x 10	0,78	7,49	100 x 100
4	300	Stahl	100 x 100 x 20	1,56	14,98	100 x 100
5	400	Silentboard	200 x 200 x 25	1,40	8,40	200 x 200
6	400	Silentboard	200 x 200 x 25	1,40	8,40	50 x 50

Tab. 2: Aufbau der untersuchten periodischen Beschwerungen (alle Maße in mm). Neben dem Gewicht der einzelnen Massen, m_+ , ist auch die Gesamtmasse der Beschwerung je Flächeneinheit, m''_+ , mit angegeben. Bei Silentboard handelt es sich um spezielle Gipskartonplatten mit einer erhöhten Rohdichte von ca. 1400 kg/m³ [26].

Normalerweise wurden die Zusatzmassen vollflächig starr auf die Vorderseite der Gipskartonplatten aufgeklebt, so dass die Kontaktfläche zwischen Masse und Plattenoberfläche (letzte Spalte in obiger Tabelle) mit der Fläche der Massen übereinstimmte. Eine

Ausnahme hiervon bildet nur die in der untersten Tabellenzeile beschriebene Beschwerung, bei der die Zusatzmassen nur in ihrem zentralen Bereich (mit einer Klebefläche von 50 mm x 50 mm) Kontakt mit der Plattenoberfläche hatten. Da die Messungen an Wänden mit einer Fläche von 2,5 m² durchgeführt wurden, fluchtete das Massengitter zumeist nicht genau mit den Wandbegrenzungen, so dass die in der Tabelle angegebene flächenbezogene Gesamtmasse der Beschwerung, die sich auf 2,5 m² Wandfläche bezieht, etwas von dem nach der Beziehung $m''_+ = m_+/a^2$ ermittelten Wert, der sich für eine unendlich ausgedehnte Wand ergeben würde, abweicht (die Abweichung beträgt maximal etwa 13 %).

Einige typische Beispiele für die untersuchten periodischen Beschwerungen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die Beschwerungen wurden so eingebaut, dass zwischen den Massen und den Rändern der Gipskartonplatte ein Mindestabstand verblieb, der nach Möglichkeit etwa dem halben Rastermaß des Gitters entsprach. Allerdings war dies nicht bei allen Aufbauten in gleicher Weise möglich.



Abb. 38: Fotos unterschiedlicher Varianten periodischer Beschwerungen.

- links: 15 Stahlplatten mit 10 cm Kantenlänge auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm, flächenbezogene Masse $m''_+ = 8,42 \text{ kg/m}^2$,
- Mitte: 24 Stahlplatten mit 10 cm Kantenlänge auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 30 cm, flächenbezogene Masse $m''_+ = 7,49 \text{ kg/m}^2$,
- rechts: 15 Platten aus Silentboard mit 20 cm Kantenlänge auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm, flächenbezogene Masse $m''_+ = 8,40 \text{ kg/m}^2$.

7.3 Berechnung der Schalldämmung mit HYPERAKUS

Wenn die Abmessungen der Zusatzmassen sehr viel kleiner als das Rastermaß des Gitters sind, lässt sich die Schalldämmung periodisch beschwerter Platten näherungsweise analytisch berechnen. Bei den untersuchten Gipskartonplatten ist diese Bedingung – im Gegensatz zu vielen Folien – jedoch nicht erfüllt, so dass hier eine numerische Berechnung erforderlich ist. Im vorliegenden Fall wird dazu das im IBP entwickelte Programm HYPERAKUS [76] eingesetzt, mit dem sich die Schalldämmung periodisch strukturierter Wände berechnen lässt, sofern es sich um einschalige Bauteile mit unendlicher Ausdehnung (also ohne störende Einflüsse der Bauteilränder) handelt. Da die unter-

suchten Platten eine verhältnismäßig kleine Fläche von nur $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ aufwiesen, ist eine genaue Berechnung mit HYPERAKUS natürlich nicht möglich, weshalb man hinsichtlich der Übereinstimmung von Messung und Rechnung keine allzu hohen Erwartungen hegen sollte. Die Berechnungen eignen sich jedoch gut, um den Frequenzverlauf der Schalldämmkurve und den akustischen Einfluss der verschiedenen Konstruktionsparameter zu untersuchen.

Bei der Modellierung von Wänden mit HYPERAKUS definieren zwei Basisvektoren ein zweidimensionales periodisches Punktgitter. Hervorzuheben ist, dass die Basisvektoren nicht orthogonal sein müssen, was auch die Untersuchung hexagonaler und anderer schiefwinkliger Strukturen erlaubt. Jedem Punkt des Gitters ist eine rechteckige Einheitszelle, in der die Platteneigenschaften festgelegt werden, zugeordnet. Damit ist die periodische Struktur einer Platte vollständig beschrieben.

Es wird vorausgesetzt, dass die Platte eben und – im akustischen Sinne – dünn ist, und zwar überall gleich dünn. Die für die Schalldämmung wesentlichen Eigenschaften einer solchen Platte sind die Masse pro Flächeneinheit und die Biegesteife, die räumlich periodisch variieren können. Eine Materialdämpfung kann durch Imaginärteile dieser Größen berücksichtigt werden. HYPERAKUS bietet die Möglichkeit, die periodische Struktur aus einer gewissen Anzahl elastisch isotroper, kubischer oder orthotroper Materialien aufzubauen. Dabei werden in der Einheitszelle rechteckige Bereiche vorgegeben, denen jeweils ein (homogenes) Material zugewiesen wird. (Rechteckbereiche erlauben eine einfache Berechnung der Fourier-Komponenten der Eigenschaften. Eine kontinuierliche Variation ist nicht vorgesehen.) Trotz der Einschränkung auf rechteckige Bereiche bietet HYPERAKUS eine große Vielfalt an möglichen Strukturen, zumal nicht-rechteckige Geometrien durch Rechtecke angenähert werden können.

Die periodische Platte teilt den dreidimensionalen Raum in zwei Halbräume, die mit einem (homogenen, ungedämpften) Fluid – im Normalfall Luft – gefüllt sind. Die Fluide dies- und jenseits der Platte dürfen auch verschieden sein, z. B. Luft und Wasser. Die Anregung der Platte erfolgt durch eine einzelne ebene Welle, deren Einfallrichtung durch zwei Winkel festgelegt wird. Es ist mit HYPERAKUS auch möglich, über die Einfallrichtung zu mitteln, um auf diese Weise einen diffusen Schalleinfall nachzubilden. Da die Mittelung jedoch über zwei Winkel erfolgen muss, ist sie relativ rechenintensiv. (Nur bei homogenen, elastisch isotropen Platten genügt die Mittelung über den Winkel zur Plattennormalen.)

Eine einfallende Luftschallwelle verursacht beim Auftreffen auf eine homogene, also nicht periodisch strukturierte Platte auf der Sendeseite eine reflektierte Welle sowie auf der Empfangsseite eine transmittierte Welle. Ist die Platte dagegen periodisch strukturiert, wirkt sie wie ein akustisches Beugungsgitter, das unendlich viele zusätzliche Wellen erzeugt [77]. Bei numerischen Berechnungen muss man sich natürlich auf eine endliche Anzahl gebeugter Wellen beschränken. Daher sind Ergebnisse von HYPERAKUS für periodische Platten prinzipiell nicht exakt, sondern approximativ. Bei den bisherigen Anwendungen ließen sich allerdings bereits mit moderatem numerischen Aufwand ziemlich gute Genauigkeiten erreichen.

Unterhalb einer bestimmten Frequenz, die von der räumlichen Periodizität abhängt, können sich diese zusätzlichen, gebeugten Wellen nicht ausbreiten und tragen deshalb nicht zur Schalltransmission bei. Sie "verkümmern" gleichsam zu Nahfeldern, die dafür sorgen, dass die wegen der Periodizität komplizierten Randbedingungen an der Plattenoberfläche auch bei tiefen Frequenzen erfüllt sind. Mit wachsender Frequenz breiten sich immer mehr gebeugte Wellen aus und liefern Beiträge zum Schalldurchgang, erniedrigen also die Schalldämmung. Die Schalldämmkurven können daher bei höheren Frequenzen recht starke Schwankungen aufweisen.

Die theoretischen Grundlagen für die Software HYPERAKUS sowie einige Ergebnisse sind ausführlich in [78] dargestellt. Ein mit Hilfe von HYPERAKUS erstelltes Video [79] bietet einen anschaulichen Zugang zur Schalldämmung periodisch strukturierter Platten.

7.3.1 Eingabewerte und Anwendungsbereich

Zur Berechnung der Schalldämmung mit HYPERAKUS werden als wichtigste Eingabewerte die flächenbezogene Masse und die Biegesteife der unbeschwerten und der beschwerten Bereiche der Gipskartonplatte benötigt. Für die unbeschwerten Bereiche kann auf die in Abschnitt 5.1 aufgeführten Angaben für die verwendeten Gipskartonplatten zurückgegriffen werden ($m'' = 8,5 \text{ kg/m}^2$ und $B' = 270 \text{ Nm}$). Deutlich schwieriger ist es hingegen bei den beschwerten Bereichen der Platte. Zwar lässt sich die flächenbezogene Masse leicht ermitteln, indem man die Massen der Gipskartonplatte und der Beschwerung addiert. Zur Bestimmung der Biegesteife ist jedoch der resultierende Elastizitätsmodul erforderlich, zu dessen Berechnung im vorliegenden Fall die nötigen Angaben fehlen (vor allem deshalb, weil über den mechanischen Verbund zwischen Beschwerung und Gipskartonplatte, der über die Deckschicht aus Karton erfolgt, nur wenig bekannt ist). Aus diesem Grund wird bei der Berechnung für die Biegesteife der beschwerten Bereiche vereinfachend der gleiche Wert wie für die unbeschwerten Bereiche herangezogen (da Stahl einen erheblich höheren Elastizitätsmodul als eine Gipskartonplatte aufweist, handelt es sich bei dieser Näherung gewissermaßen um den weichsten Grenzfall). Für die Poissonzahl wird einheitlich ein Wert von $\mu = 0,3$ verwendet.

Weitere Vereinfachungen bei der Berechnung mit HYPERAKUS sind:

- Da über die Bedämpfung der Gipskartonplatte keine Angaben vorliegen, wird vereinfachend mit einem Verlustfaktor von 0,1 (Erfahrungswert) gerechnet. Dies erfolgt, indem der Imaginärteil des E-Moduls auf 10 % des Realteils gesetzt wird.
- Eine Berechnung für diffusen Schalleinfall würde eine Integration über den Schalleinfallswinkel θ (Winkel zwischen der Schalleinfallsrichtung und der Flächennormalen) erfordern. Da dies zu viel Rechenzeit beanspruchen würde, wird statt dessen für einen festen Winkel gerechnet. Im Gegensatz zum sonst üblichen Wert von $\theta = 45^\circ$ wird hierzu ein Winkel von $\theta = 56^\circ$ verwendet, da sich hierfür bei Voruntersuchungen eine bessere Übereinstimmung mit der Schalldämmung bei diffusem Schalleinfall ergab [80].

- Bei periodischen Beschwerungen hängt die Schalldämmung neben dem Einfallswinkel bis zu einem gewissen Grad auch vom Azimutwinkel ab (der Azimutwinkel ϕ bezeichnet den Winkel zwischen der Gitterachse und der Projektion des Schallstrahls auf die Plattenoberfläche). Die Berechnungen erfolgen für einen Azimutwinkel von $\phi = 0^\circ$. Die Berechnungsgenauigkeit wird hierdurch kaum beeinträchtigt, da der Azimutwinkel – wie später noch gezeigt wird – nur geringen Einfluss auf die Schalldämmung hat.
- Bei den Berechnungen mit HYPERAKUS wird wie schon erwähnt eine unendlich ausgedehnte Platte betrachtet, so dass der Einfluss der Plattenränder auf die Schalldämmung unberücksichtigt bleibt. Außerdem wird mit einer einheitlichen Plattendicke gerechnet, indem die Beschwerung durch eine entsprechend erhöhte Rohdichte des Plattenmaterials nachgebildet wird.

Um den Berechnungsaufwand zu begrenzen, wird der betrachtete Frequenzbereich auf die Frequenzen von 50 - 500 Hz beschränkt. Dies ist völlig ausreichend, da alle maßgebenden akustischen Effekte, die durch die periodische Beschwerung hervorgerufen werden, bei den untersuchten Aufbauten deutlich unterhalb von 500 Hz erfolgen. Im Sinne einer einheitlichen Darstellungsweise und einer guten Vergleichbarkeit der dargestellten Kurven, werden die berechneten Schalldämmkurven in den Diagrammen trotz des verkleinerten Frequenzbereichs im üblichen, genormten Standardmaßstab (15 mm pro Oktave auf der Abszissen- und 20 mm pro Dekade auf der Ordinatenachse) aufgetragen.

Da das verwendete Berechnungsmodell zwangsläufig zahlreiche Vereinfachung enthält, bleibt abzuwarten, wie gut Messung und Rechnung übereinstimmen. Die Berechnungsgenauigkeit wird später an einigen repräsentativen Beispielen überprüft.

7.3.2 Einfluss der Konstruktionsparameter

Die Schalldämmung periodisch beschwerter Platten hängt in starkem Maße von den Konstruktionsparametern der Beschwerung ab. Um dies zu untersuchen, wurden mit dem Programm HYPERAKUS entsprechende Berechnungen durchgeführt, wobei jeweils einer der Parameter variiert und die übrigen konstant gehalten wurden. Aus den in den Abbildungen 39 bis 41 dargestellten Berechnungsergebnissen ergeben sich folgende Aussagen:

- Wird das Gewicht der Zusatzmassen erhöht, verschiebt sich die Resonanzfrequenz und damit auch das Maximum in der Schalldämmkurve von periodisch beschwerten Platten in Richtung tieferer Frequenzen (bei Verdoppelung der Masse im Mittel um etwas mehr als eine Terz).
- Auch bei Vergrößerung des Rastermaßes des Gitters ist eine Verschiebung des Dämmungsmaximums zu tieferen Frequenzen hin zu verzeichnen. Bei Abstandsverdopplung beträgt die Verschiebung etwa 3 - 4 Terzen.
- Eine Vergrößerung der Kantenlänge der Zusatzmassen hat nur geringen Einfluss auf die Resonanzfrequenz, bewirkt aber eine deutliche Absenkung des Dämmungsmaximums.

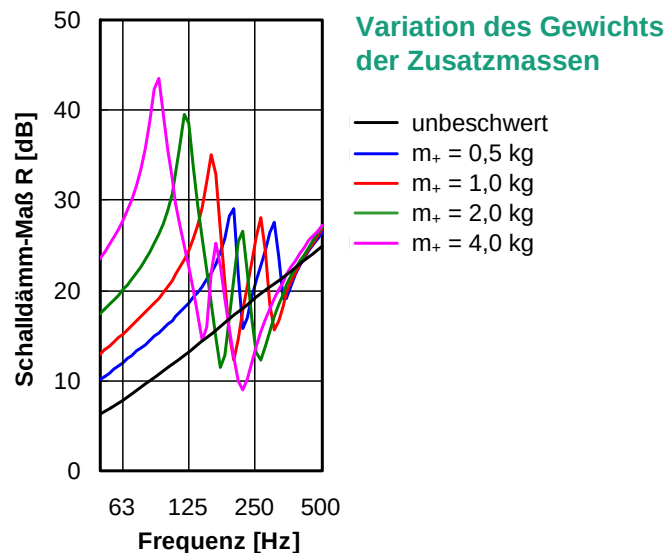


Abb. 39: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte bei Veränderung des Gewichts der Zusatzmassen. Die Berechnung erfolgte für ein Rastermaß von $a = 30 \text{ cm}$ und Massen mit einer Kantenlänge von $l = 10 \text{ cm}$. Mit zunehmendem Gewicht der Massen verschiebt sich das Dämmungsmaximum erwartungsgemäß zu tiefen Frequenzen hin. Wegen der Zunahme der Gesamtmasse ist gleichzeitig eine Erhöhung der Schalldämmung zu verzeichnen.

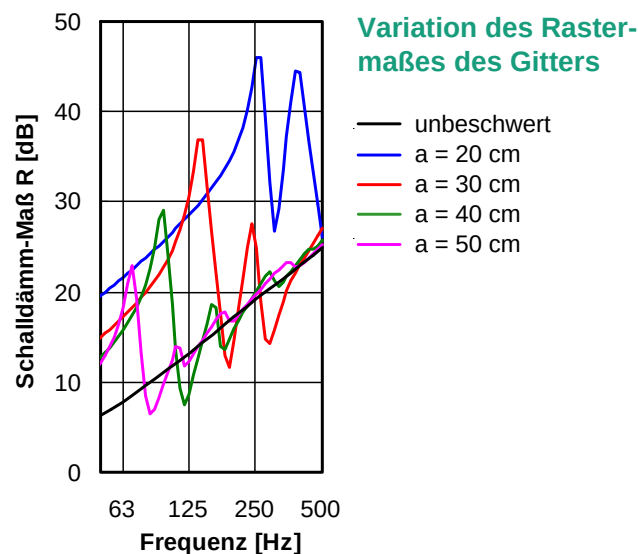


Abb. 40: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte bei Veränderung des Rastermaßes des Gitters. Die Berechnung erfolgte für Zusatzmassen mit einem Gewicht von $m_+ = 1,4 \text{ kg}$ und einer Kantenlänge von $l = 10 \text{ cm}$. Bei Vergrößerung des Rastermaßes verschiebt sich das Dämmungsmaximum in Richtung tieferer Frequenzen. Gleichzeitig nimmt die Schalldämmung ab, da ein größerer Abstand zwischen den Massen mit einer Verminderung der Gesamtmasse je Flächeneinheit einhergeht.

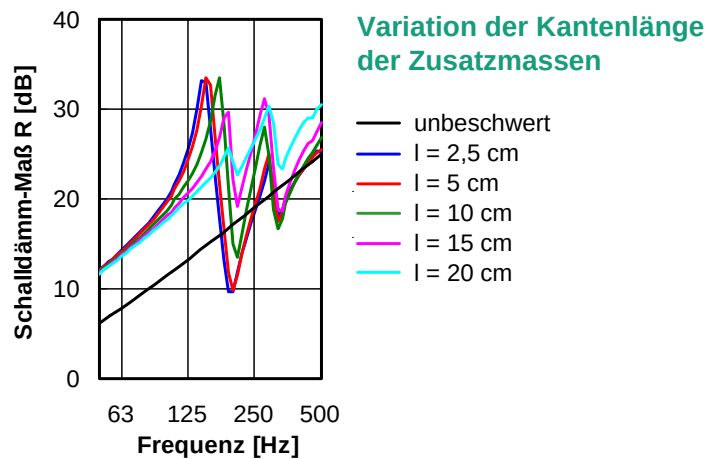


Abb. 41: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte bei Veränderung der Kantenlänge der Zusatzmassen. Die Berechnung erfolgte für Zusatzmassen mit einem Gewicht von $m_+ = 0,8 \text{ kg}$ und einem Rastermaß von $a = 30 \text{ cm}$. Bei Vergrößerung der Kantenlänge ist eine merkliche Stauchung des Dämmungsmaximums zu verzeichnen. Der Einfluss der Kantenlänge auf die Resonanzfrequenz ist hingegen verhältnismäßig gering.

7.3.3 Einfluss des Schalleinfallswinkels

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.1 erfolgten die akustischen Berechnungen mit HYPERAKUS unter vereinfachten Bedingungen. Eine wesentliche Vereinfachung bestand darin, dass keine Winkelintegration zur Nachbildung eines diffusen Schallfeldes durchgeführt, sondern stattdessen für einen festen Schalleinfallswinkel von $\theta = 56^\circ$ gerechnet wurde. Um zu überprüfen, wie sich dies auf das Berechnungsergebnis auswirkt, wurden die beiden Verfahren am Beispiel eines typischen Messaufbaus miteinander verglichen.

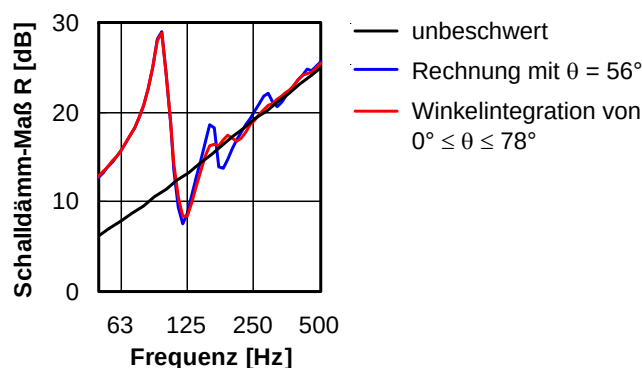


Abb. 42: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte bei Berechnung mit einem Schalleinfallswinkel von $\theta = 56^\circ$ und bei Winkelintegration im Bereich von $0^\circ \leq \theta \leq 78^\circ$. Die Berechnung erfolgte für Zusatzmassen mit einem Gewicht von $m_+ = 1,4 \text{ kg}$, einer Kantenlänge von $l = 10 \text{ cm}$ und einem Rastermaß von $a = 40 \text{ cm}$.

Wie sich aus den in Abb. 42 dargestellten Ergebnissen entnehmen lässt, unterscheiden sich die mit Winkelintegration und mit festem Einfallswinkel berechneten Kurven nur verhältnismäßig wenig voneinander. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Schalldämmkurve bei der Berechnung mit $\theta = 56^\circ$ oberhalb des Dämmungsminimums deutlich sichtbare Schwankungen aufweist, die bei Integration über den Einfallswinkel infolge der resultierenden Mittelung und Glättung der Werte weitgehend verschwinden. Für die Beurteilung der Berechnungsergebnisse ist dies von untergeordneter Bedeutung, da der Kurvenverlauf im Bereich des Dämmungsminimums und -maximums recht gut übereinstimmt. Somit ist gegen die Berechnung der Schalldämmung mit einem festen Schalleinfallswinkel von $\theta = 56^\circ$ im vorliegenden Fall nichts einzuwenden.

Eine weitere Vereinfachung in den durchgeführten Berechnungen betrifft den Azimuthwinkel. Anstatt einer Winkelintegration wird auch hier mit einem festen Winkel gerechnet, der in diesem Fall $\phi = 0^\circ$ beträgt. Führt man die Berechnung versuchsweise für andere Winkel durch, so zeigt sich, dass der Einfluss des Azimuthwinkels auf die berechnete Schalldämmung nur sehr gering ist (siehe Ergebnisse in Abb. 43). Die Berechnung mit festem Winkel ist also auch hier gerechtfertigt.

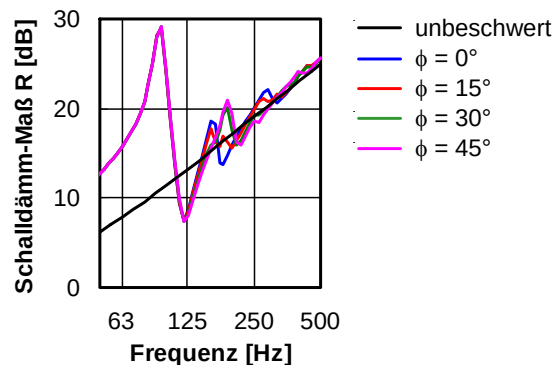


Abb. 43: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte bei Variation des Azimuthwinkels ϕ . Die Berechnung erfolgte für Zusatzmassen mit einem Gewicht von $m_+ = 1,4$ kg, einer Kantenlänge von $l = 10$ cm und einem Rastermaß von $a = 40$ cm für einen Schalleinfallswinkel von $\theta = 56^\circ$.

7.3.4 Vergleich von Rechnung und Messung

Um zu überprüfen, wie gut sich das akustische Verhalten der untersuchten Bauteile mit dem verwendeten Berechnungsverfahren nachbilden lässt, wurden Rechnung und Messung an vier verschiedenen Aufbauten miteinander verglichen. Zwei der Bauteile verfügten über eine periodische Beschwerung aus Stahlplatten (die zugehörigen Ergebnisse sind in Abb. 44 dargestellt), bei den beiden anderen kamen Silentboard-Platten zum Einsatz (siehe Abb. 45).

Bei der Beschwerung mit Stahlplatten stimmen die berechneten und gemessenen Schalldämmkurven zwar in ihren wichtigsten Merkmalen überein. Die Höhe der Schalldämmung unterscheidet sich jedoch – vor allem im Bereich des Dämmungsminimums und -maximums – zum Teil beträchtlich voneinander. Außerdem ist der berechnete

Kurvenverlauf gegenüber den gemessenen Werten um etwa ein bis eineinhalb Terzen zu tiefen Frequenzen hin verschoben.

Für die Silentboard-Platten mit 5 cm Kantenlänge ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei der Beschwerung mit Stahlplatten. Erreicht die Kantenlänge einen Wert von 20 cm, treten hingegen große Abweichungen zwischen Rechnung und Messungen auf. Anscheinend nimmt die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens ab, wenn sich die Kantenlänge der Massen dem Rastermaß des Gitters nähert.

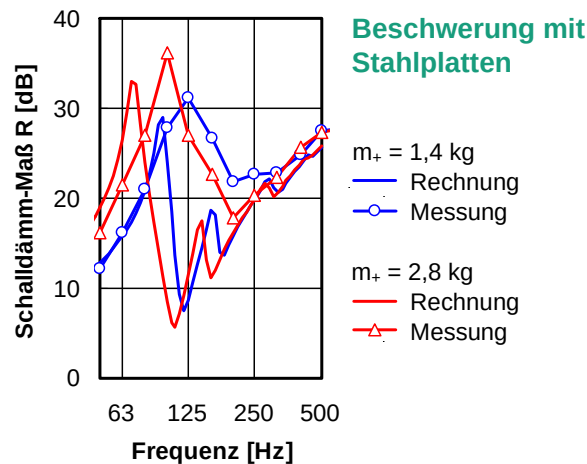


Abb. 44: Berechnete und gemessene Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte. Die Beschwerung erfolgte auf zwei unterschiedliche Arten, die sich jedoch lediglich im Hinblick auf das Gewicht der Zusatzmassen voneinander unterschieden. Alle übrigen Parameter (Rastermaß $a = 40$ cm und Kantenlänge der Massen $l = 10$ cm) stimmten überein.

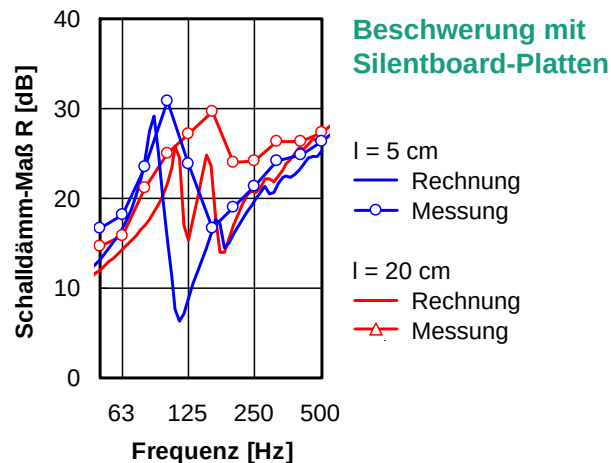


Abb. 45: Berechnete und gemessene Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte. Die Beschwerung erfolgte auf zwei unterschiedliche Arten, die sich jedoch lediglich im Hinblick auf die Kantenlänge der Zusatzmassen voneinander unterschieden. Alle übrigen Parameter (Rastermaß $a = 40$ cm und Gewicht der Massen $m_+ = 1,4$ kg) stimmten überein.

Insgesamt gesehen ist festzustellen, dass sich Rechnung und Messung im Detail erheblich voneinander unterscheiden können, die maßgebenden Effekte von dem Berechnungsmodell jedoch korrekt abgebildet werden. Allerdings sind die berechneten Schalldämmkurven systematisch zu tiefen Frequenzen hin verschoben, was bei der Anwendung der Ergebnisse entsprechend zu berücksichtigen ist.

7.4 Berechnung der Resonanzfrequenz

Die Schalldämmung periodisch beschwerter Gipskartonplatten lässt sich nur mit Hilfe spezieller Software, wie z. B. dem verwendeten Programm HYPERAKUS, berechnen. Zur Auslegung der Konstruktionsparameter im Rahmen der baulichen Schallschutzplanung ist aber vielfach bereits die Kenntnis der Resonanzfrequenz der beschwerten Platte ausreichend. Deshalb wurde eine Formel entwickelt, mit der sich die Resonanzfrequenz näherungsweise aus den Konstruktionsparametern berechnen lässt. Da die Schalldämmung im Resonanzbereich ihren maximalen Wert erreicht, wird die Resonanzfrequenz nachfolgend als $f_{\max}$ bezeichnet. Die Frequenz, bei der die Schalldämmkurve im Anschluss ihr Minimum durchläuft, trägt die Bezeichnung $f_{\min}$.

Bei der Herleitung der nachfolgenden Formel zur Berechnung der Resonanzfrequenz wurde vereinfachend vorausgesetzt, dass die Beziehung $l \ll a$ erfüllt ist, d. h. dass die Kantenlänge der Zusatzmassen l sehr viel kleiner als das Rastermaß des Gitters a ist. In allgemeiner Form, in der sie auch für leichte Folien mit äußerer Vorspannung anwendbar ist, ergibt sich für die Formel der Ausdruck

$$f_{\max} = \frac{1}{a^2} \sqrt{\frac{4\pi^2 B' + a^2 S}{m''_0}} \sqrt{\frac{1}{1+4\beta}} \sqrt{1 + \frac{\rho_L a}{\pi(1+4\beta) m''_0}}, \quad (12)$$

$$f_{\min} = \frac{1}{a^2} \sqrt{\frac{4\pi^2 B' + a^2 S}{m''_0}} \sqrt{\frac{1+\beta}{1+5\beta}} \sqrt{1 + \frac{\rho_L a (1+\beta)}{\pi(1+5\beta) m''_0}} \quad (13)$$

- mit a = Gitterkonstante der periodischen Beschwerung [m],
 B' = Biegesteife der Platte je Breite ($B' = E d^3 / [12(1-\mu^2)]$) [Nm],
 S = Vorspannung der Platte [N/m],
 β = Massenverhältnis m''_+ / m''_0 (Masse der Beschwerung dividiert durch Plattenmasse) [-],
 m''_+ = flächenbezogene Masse der Beschwerung (Gesamtmasse der Beschwerung dividiert durch die Plattenfläche) [kg/m²],
 m''_0 = flächenbezogene Masse der unbeschwerten Platte [kg/m²],
 ρ_L = Dichte der Luft (ca. 1,23 kg/m³) [kg/m³],
 E = Elastizitätsmodul der Platte [N/m²],
 d = Plattendicke [m],
 μ = Poissonzahl (ca. 0,3) [-].

Die Wurzel auf der rechten Seite der beiden obigen Gleichungen beschreibt jeweils den akustischen Einfluss der an der Plattenoberfläche mitbewegten Luft. Für Gipskartonplatten ist dieser Einfluss in der Praxis weitgehend vernachlässigbar. Dies kommt darin zum Ausdruck, dass sich für die Wurzel hier näherungsweise ein Wert von 1 ergibt (für

die betrachteten Konstruktionen beträgt die Abweichung maximal etwa 0,4 %). Für die Anwendung in der Praxis kann man die Wurzel daher aus der Gleichung streichen. Da bei Gipskartonplatten (im Gegensatz zu vielen Konstruktionen aus Folien und Membranen) keine Vorspannung vorhanden ist, gilt außerdem $S = 0$, so dass sich für die Frequenz des Dämmungsmaximums und -minimums die folgenden vereinfachten Beziehungen ergeben:

$$f_{\max} = \frac{2\pi}{a^2} \sqrt{\frac{B'}{m''_0}} \sqrt{\frac{1}{1+4\beta}}, \quad (14)$$

$$f_{\min} = f_{\max} \sqrt{1 + \frac{4\beta^2}{1+5\beta}}. \quad (15)$$

Die in Gl. (14) enthaltene Biegesteife B' lässt sich mit Gl. (6) aus dem Elastizitätsmodul der Platte und der Plattendicke berechnen. Da sich das Massenverhältnis β für die untersuchten Konstruktionen im Bereich von $1 \leq \beta \leq 2$ bewegt, ergibt sich für die Wurzel in Gl. (15) ein Wert zwischen 1,29 und 1,57. Dies bedeutet, dass das Dämmungsminimum theoretisch etwa ein bis zwei Terzen über dem Maximum liegt.

Mit Hilfe der obigen Gleichungen lässt sich veranschaulichen, welcher Zusammenhang zwischen den Konstruktionsparametern und der Resonanzfrequenz einer periodisch beschwerten Platte besteht. In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist dieser Zusammenhang für die beiden wichtigsten Parameter – das Rastermaß a und die flächenbezogene Masse der Beschwerung m''_+ – grafisch dargestellt.

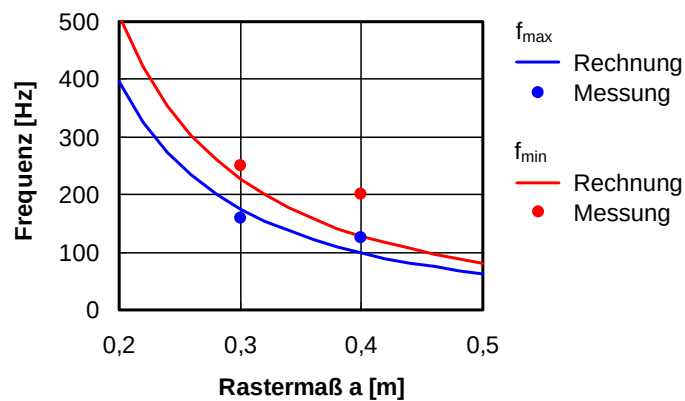


Abb. 46: Frequenz von Dämmungsmaximum und -minimum, $f_{\max}$ und $f_{\min}$, einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte in Abhängigkeit vom Rastermaß des Gitters a . Die Berechnung erfolgte mit Gl. (14) und Gl. (15) für Zusatzmassen mit einem Gesamtgewicht je Flächeneinheit von $m''_+ = 8,5 \text{ kg/m}^2$. Die Kantenlänge der Massen geht nicht in die Berechnungsformel ein.

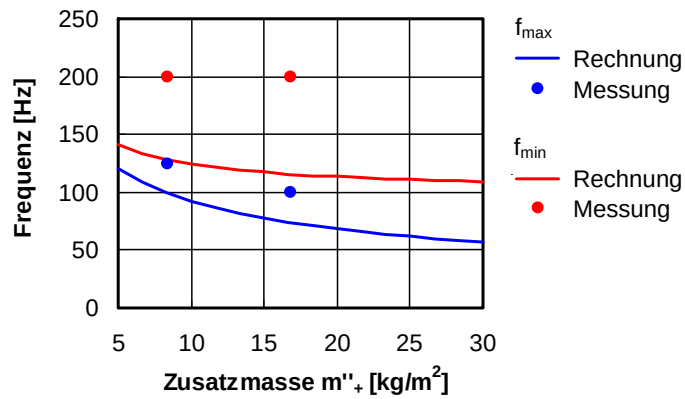


Abb. 47: Frequenz von Dämpfungsmaximum und -minimum, $f_{\max}$ und $f_{\min}$, einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der Zusatzmassen je Flächeneinheit m''_+ . Die Berechnung erfolgte mit Gl. (14) und Gl. (15) für ein Gitter mit einem Rastermaß von $a = 0,4$ m. Die Kantenlänge der Massen geht nicht in die Berechnungsformel ein.

Neben den berechneten Kurven sind in den Diagrammen zum Vergleich auch Messwerte aufgetragen. Wie zu erkennen ist, liegt die gemessene Resonanzfrequenz mit nur einer Ausnahme immer deutlich über den berechneten Werten. Um die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung zu verbessern, wurden daher Korrekturwerte bestimmt, die in Form von Vorfaktoren in den Formeln eine Erhöhung der berechneten Resonanzfrequenz bewirken. Die Festlegung der Korrekturwerte erfolgte separat für $f_{\max}$ und $f_{\min}$, wobei so vorgegangen wurde, dass die Abweichung zwischen Messung und Rechnung – bezogen auf sämtliche vorhandenen Messdaten – im Mittel so klein wie möglich wird. Unter Berücksichtigung der Korrekturwerte gehen Gl. (14) und Gl. (15) in die folgenden Ausdrücke über:

$$f_{\max} = 1,18 \frac{2\pi}{a^2} \sqrt{\frac{B'}{m''_0}} \sqrt{\frac{1}{1+4\beta}}, \quad (16)$$

$$f_{\min} = 1,28 f_{\max} \sqrt{1 + \frac{4\beta^2}{1+5\beta}}. \quad (17)$$

Die obigen Gleichungen beziehen sich speziell auf periodisch beschwerte Gipskartonplatten. Da insgesamt nur sechs Messkurven zur Verfügung standen, um Rechnung und Messung aneinander anzugleichen, sind Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Formeln begrenzt. Sie sind zur Abschätzung der Lage des Resonanzbereichs bestimmt, jedoch nicht für genaue Berechnungen geeignet.

7.5 Beschwerung von Gipskartonplatten

Bei der periodischen Beschwerung von Gipskarton-Ständerwänden wird die Beplanung auf der Vorder- und / oder Rückseite der Wand durch entsprechend modifizierte Platten ersetzt. Den Ausgangspunkt für die untersuchten Verbesserungsmaßnahmen bilden deshalb immer Gipskartonplatten, die über eine periodischen Beschwerung ver-

fügen und in unterschiedlicher Kombination zur Herstellung von Ständerwänden eingesetzt werden können.

Im folgenden werden deshalb zunächst einzelne Gipskartonplatten betrachtet, bevor die Untersuchungen im nächsten Schritt auf Ständerwände ausgedehnt werden. Als Grundbauteil dient immer eine einschalige Platte aus Gipskarton, die so beschwert wird, dass das Gesamtgewicht der Beschwerung in etwa der Masse der unbeschwerten Platte (im vorliegenden Fall $8,5 \text{ kg/m}^2$) bzw. einem ganzzahligen Vielfachen davon entspricht. Auf diese Weise wird erreicht, dass stets ein geeigneter Vergleichswert für die akustische Wirkung der Beschwerung zur Verfügung steht, indem das Messergebnis mit dem Schalldämm-Maß einer ein-, zwei- oder dreilagigen Wandschale aus Gipskartonplatten verglichen wird.

Damit die periodische Beschwerung die gewünschte Wirkung entfaltet, darf die Fläche der einzelnen Massen nicht zu groß sein. Gleichzeitig ist auch ihre Dicke begrenzt, da die Massen im Wandhohlraum Platz finden müssen. Zur Herstellung periodischer Beschwerungen sind deshalb vor allem Materialien mit hoher Rohdichte geeignet. Aus diesem Grund bestehen alle in den nachfolgenden Abschnitten betrachteten Beschwerungen aus $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ großen Stahlplatten. Weitere Materialien werden im Anschluss daran betrachtet.

Zur Beschwerung der Gipskartonplatten wurde zunächst eine zusätzliche Masse von insgesamt etwa $8,5 \text{ kg/m}^2$ auf die Platten aufgebracht. Die einzelnen Massen waren dabei auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 30 cm bzw. 40 cm angeordnet. Zum Vergleich wurde außerdem eine Beschwerung mit regelloser Verteilung der Massen betrachtet. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse sind Abb. 48 (Fotos) und Abb. 49 (Messwerte) zu entnehmen. Um die akustische Wirkung zu verstärken, wurde die Masse der Beschwerung anschließend auf 17 kg/m^2 erhöht. Außerdem wurde zum Vergleich ein Aufbau hergestellt, bei dem sich die Masse der Beschwerung auf nur zwei Stellen konzentrierte. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen sind in Abb. 48 und 49 beschrieben.

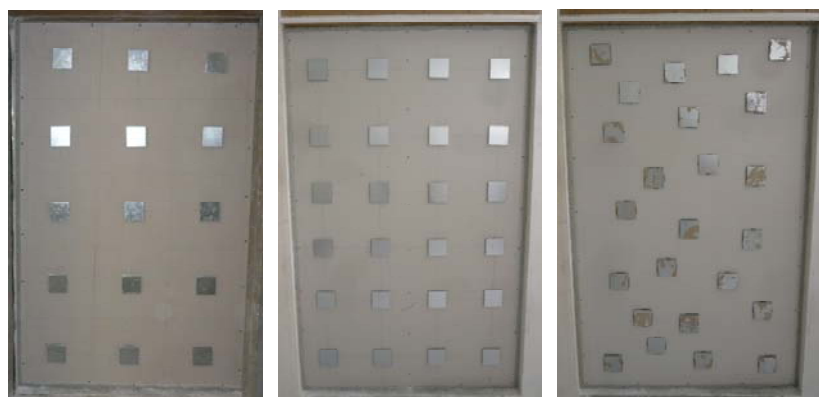


Abb. 48: Beschwerungen mit einer Gesamtmasse von etwa $8,5 \text{ kg/m}^2$. Die Massen waren auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm (links) bzw. 30 cm (Mitte) angeordnet oder zufällig auf der Plattenoberfläche verteilt (rechts). Die zugehörigen Messwerte sind in Abb. 49 dargestellt.

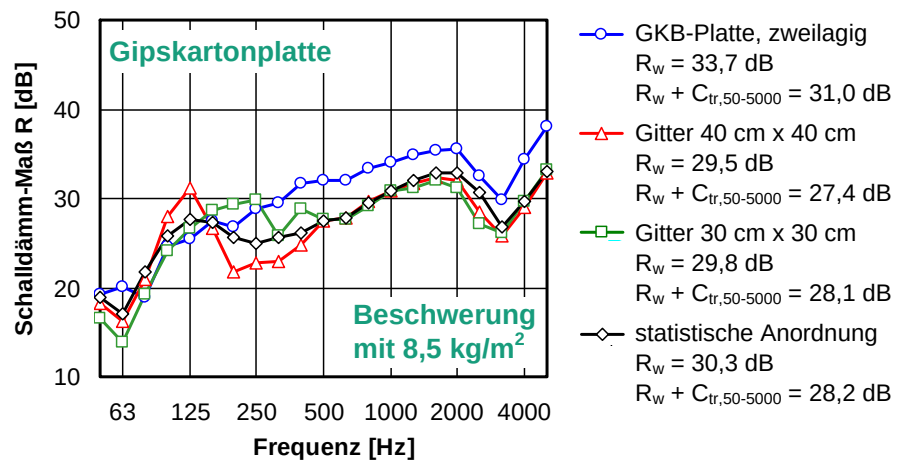


Abb. 49: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte. Die Gesamtmasse der Beschwerung betrug jeweils etwa 8,5 kg/m². Die untersuchten Aufbauten sind in Abb. 48 dargestellt.



Abb. 50: Beschwerungen mit einer Gesamtmasse von etwa 17 kg/m². Die Massen waren auf einem Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet (links) oder an zwei Stellen der Plattenoberfläche konzentriert (rechts). Die zugehörigen Messergebnisse sind in Abb. 51 dargestellt.

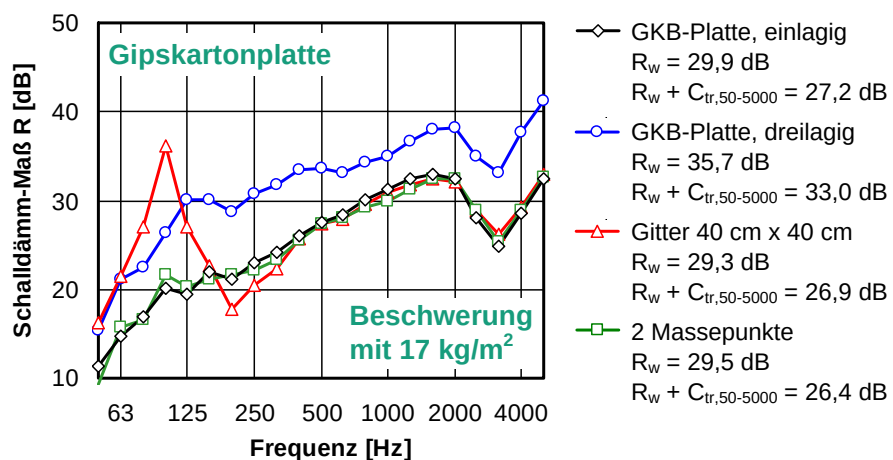


Abb. 51: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Gipskartonplatte. Die Gesamtmasse der Beschwerung betrug jeweils etwa 17 kg/m². Die untersuchten

ten Aufbauten sind in Abb. 50 dargestellt.

Die ermittelten Messergebnisse entsprechen im Wesentlichen dem akustischen Verhalten, das den vorangehenden Berechnungen zufolge für derart beschwerte Bauteile zu erwarten ist. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind:

- Bei der Beschwerung von Platten lässt sich die zusätzliche Masse in unterschiedlicher Weise auf der Plattenoberfläche verteilen. Üblicherweise fügt man zur Grundplatte einfach noch eine weitere Platte hinzu, wodurch eine gleichmäßige Verteilung der Masse über die gesamte Oberfläche erfolgt. Im Normalfall ist dies auch die akustisch günstigste Bauweise, weil bei allen Frequenzen eine Verbesserung der Schalldämmung erfolgt. Wird die Masse hingegen in Teilbereichen der Plattenoberfläche gebündelt, nimmt die akustische Wirkung ab und zwar um so mehr, je kleiner die beschwerten Bereiche sind. Bei Konzentration der Masse auf einen einzigen Punkt verschwindet die Wirkung fast völlig. Eine Ausnahme hiervon bilden lediglich Beschwerungen, bei denen die Bereiche mit erhöhter Masse auf einem periodischen Gitter liegen. Bei mittleren und hohen Frequenzen ist zwar auch hier keine Wirkung vorhanden, im Resonanzbereich bei tiefen Frequenzen erreicht die Schalldämmung jedoch Werte, die – bei gleicher Gesamtmasse – deutlich höher ausfallen, als wenn die zusätzliche Masse gleichmäßig über die Oberfläche verteilt wäre.
- Wie bei den meisten anderen Maßnahmen steigt auch bei periodischen Beschwerungen die akustische Wirkung mit zunehmender Masse deutlich an. Um eine ausreichende Verbesserung der Schalldämmung zu erreichen, sollte die Masse der Beschwerung mindestens ein- bis zweimal so groß wie die des Grundbauteils sein.
- Die Verbesserung der Schalldämmung beschränkt sich bei periodischen Beschwerungen wie schon erwähnt auf einen verhältnismäßig schmalen Bereich bei tiefen Frequenzen. Beim bewerteten Schalldämm-Maß R_w sowie auch bei $R_w + C_{tr,50-5000}$ tritt hingegen eine deutliche Verschlechterung ein. Dies ist bei Gipskartonplatten auch nicht anders zu erwarten, da sie als einschalige Bauteile bei tiefen Frequenzen bereits eine verhältnismäßig hohe Schalldämmung aufweisen, so dass sich eine weitere Verbesserung in diesem Bereich kaum auf die Einzahlangaben auswirkt. Bei Ständerwänden sind demgegenüber bei geeigneter Auslegung der Beschwerung auch für $R_w + C_{tr,50-5000}$ Verbesserungen möglich.

7.6 Ständerwände mit einseitiger Beschwerung

Nach den Messungen an Gipskartonplatten wurde im nächsten Arbeitsschritt die Beplankung von Gipskarton-Ständerwänden auf der Vorderseite durch eine periodisch beschwerte Gipskartonplatte ersetzt, während die Rückseite zunächst unverändert blieb. Als Vergleichswert für die erzielte akustische Verbesserung diente die Schalldämmung einer herkömmlichen Ständerwand mit beidseitig gleicher Beplankungsmasse wie die beschwerte Wand. Aus den in den Abbildungen 52 bis 54 dargestellten Messergebnissen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Wirkung periodischen Beschwerungen hängt in starkem Maße von ihrer Masse ab. Bei einer Masse von $8,5 \text{ kg/m}^2$ ist die Wirkung so gering, dass – im Vergleich zu einer herkömmlichen Gipskarton-Ständerwand mit gleich schwerer Beplankung – im Rahmen der Messgenauigkeit kaum Unterschiede festzustellen sind. Um eine merkliche Verbesserung der Schalldämmung zu erreichen, sollte die Beschwerung daher mindestens die doppelte Masse, d. h. etwa 17 kg/m^2 , aufweisen.
- Bei einer Masse von 17 kg/m^2 ist der akustische Einfluss der Beschwerung bereits recht deutlich erkennbar. Ähnlich wie bei einschaligen Platten äußert er sich auch bei Ständerwänden in einer Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen und in einer Verschlechterung bei mittleren und hohen Frequenzen. Dieses akustische Verhalten kommt auch in den zugehörigen Einzulangaben zum Ausdruck: während sich R_w um etwa 2 dB vermindert, steigt $R_w + C_{tr,50-5000}$ geringfügig an. Obgleich der Anstieg nur 0,7 dB beträgt, ist er doch als Merkmal für die verbesserte Schallschutzwirkung bei tieffrequenten Geräuschen anzusehen.
- Bei der periodischen Beschwerung einschaliger Platten ist gegenüber gleich schweren homogenen Bauteilen bei mittleren und hohen Frequenzen eine starke Verschlechterung der Schalldämmung zu verzeichnen. Die in Abb. 49 und Abb. 51 dargestellten Messkurven zeigen dies sehr deutlich. Bei den untersuchten Ständerwänden ist zwar ebenfalls eine Verschlechterung vorhanden, sie ist aber sehr viel schwächer ausgeprägt. Offenbar werden die negativen akustischen Auswirkungen der Beschwerung bei mittleren und hohen Frequenzen durch die rückseitige Beplankung der Wand, an der sich keine Beschwerung befindet, weitgehend kompensiert. Die unerwünschten Begleiterscheinungen periodischer Beschwerungen fallen bei Ständerwänden somit weit weniger stark ins Gewicht als bei einschaligen Bauteilen.

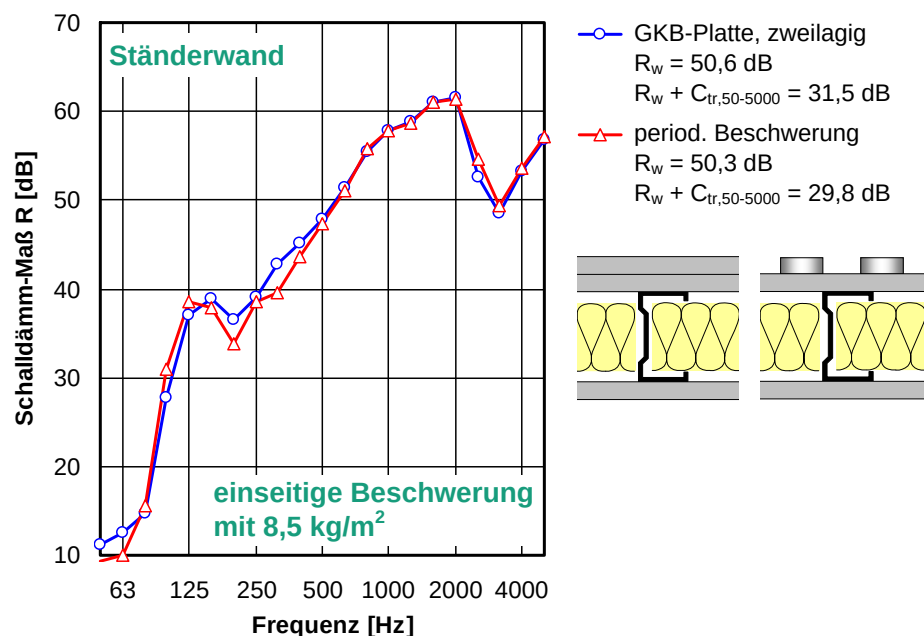


Abb. 52: Schalldämmung einer einseitig periodisch beschwerten Gipskarton-Ständerwand. Die Beschwerung bestand aus Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von etwa $8,5 \text{ kg/m}^2$. Das Rastermaß des Gitters betrug 40 cm.

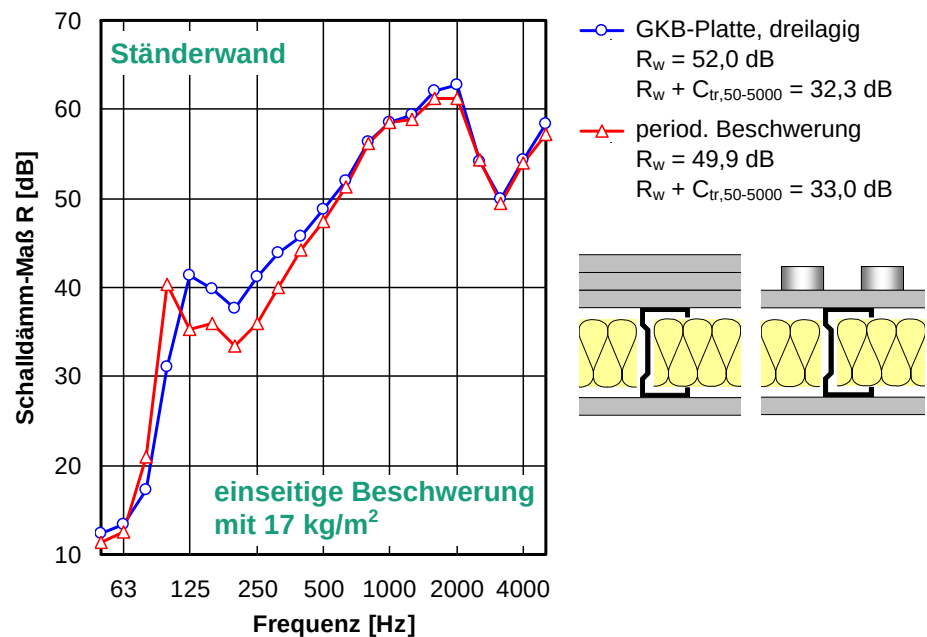


Abb. 53: Schalldämmung einer einseitig periodisch beschwerten Gipskarton-Ständerwand. Die Beschwerung bestand aus Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von etwa 17 kg/m^2 . Das Rastermaß des Gitters betrug 40 cm .

7.7 Ständerwände mit beidseitiger Beschwerung

Bei Ständerwänden mit einseitiger periodischer Beschwerung war bei tiefen Frequenzen bereits eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung zu erkennen. Wird auch die andere Seite der Wand mit einer periodischen Beschwerung versehen, so ist eine weitere Verstärkung der akustischen Wirkung zu erwarten. Dies wird durch die in den beiden nachfolgenden Diagrammen dargestellten Messergebnisse bestätigt:

- Schon mit einer zusätzlichen Masse von nur $8,5 \text{ kg/m}^2$ (auf jeder Seite der Wand) verbessert sich die Schalldämmung beidseitig beschwerter Ständerwände bei tiefen Frequenzen beträchtlich. Mit 17 kg/m^2 wird eine sehr gute Verbesserung erreicht.
- Bezogen auf eine herkömmliche Ständerwand mit gleicher Masse bewirkt die beidseitige Beschwerung mit je 17 kg/m^2 eine Erhöhung von $R_w + C_{tr,50-5000}$ um mehr als 6 dB . Zwar vermindert sich R_w gleichzeitig um fast 5 dB , wegen der vergleichsweise hohen Schalldämmung im Ausgangszustand ist dies aber in der Praxis zumeist nicht allzu problematisch.
- Im Vergleich zu einseitig beschwerten Wänden ist die Verschlechterung der Schalldämmung im mittleren und hohen Frequenzbereich bei beidseitiger Beschwerung merklich stärker ausgeprägt. Der Grund dafür besteht vermutlich darin, dass beide Seiten der Wand dem negativen akustischen Einfluss der periodischen Beschwerung unterliegen, so dass eine Kompensation des Effekts im Gegensatz zur einer einseitig beschwerten Wand hier nur teilweise möglich ist.

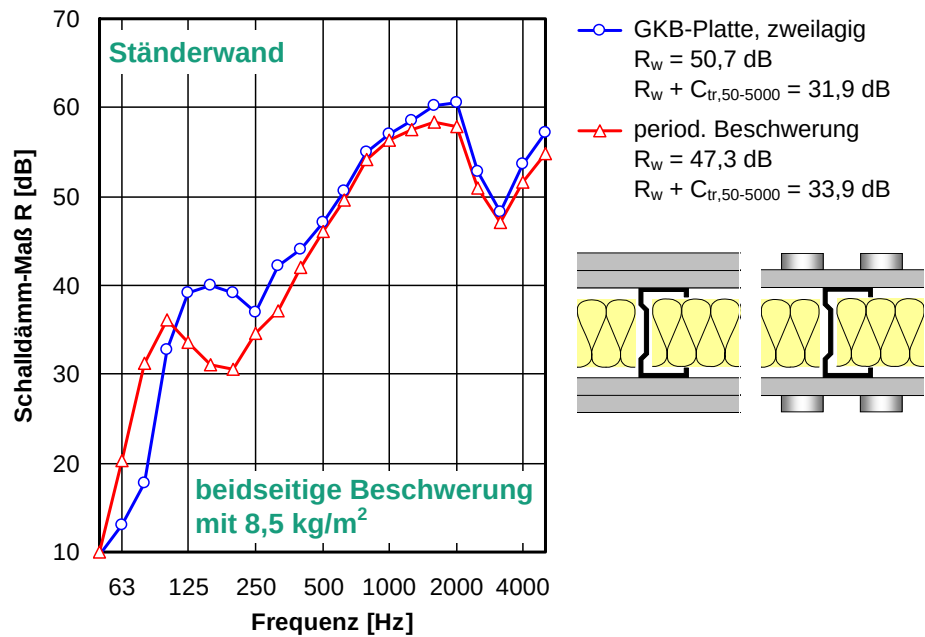


Abb. 54: Schalldämmung einer beidseitig periodisch beschwerten Gipskarton-Ständerwand (gleichartige Beschwerung beider Wandschalen). Die Beschwerung bestand aus Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von jeweils etwa $8,5 \text{ kg/m}^2$. Das Rastermaß des Gitters betrug 40 cm .

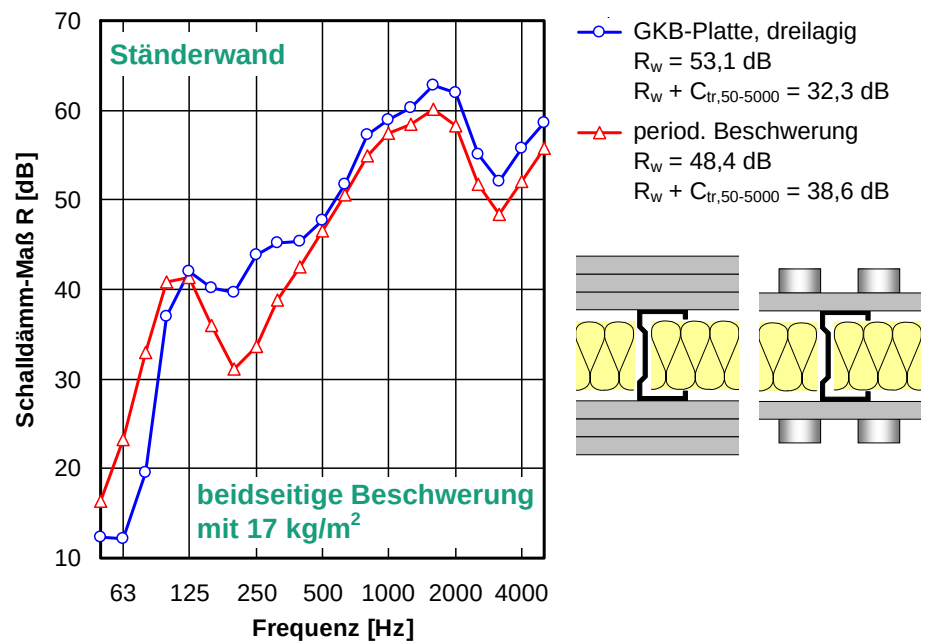


Abb. 55: Schalldämmung einer beidseitig periodisch beschwerten Gipskarton-Ständerwand (gleichartige Beschwerung beider Wandschalen). Die Beschwerung bestand aus Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von jeweils etwa 17 kg/m^2 . Das Rastermaß des Gitters betrug 40 cm .

7.8 Beschwerung im Wandhohlraum

Bei allen bislang beschriebenen Untersuchungen war die Beschwerung aufgrund der einfacheren Handhabung auf der Außenseite der Ständerwände befestigt. Dies entspricht natürlich nicht der üblichen baulichen Praxis, da man die Beschwerung im Normalfall - dem Blick entzogen - im Innenraum der Wände anordnen würde. Zwar sind zwischen außen- und innenseitiger Beschwerung an und für sich keine großen akustischen Unterschiede zu erwarten. Abweichungen sind jedoch nicht völlig auszuschließen, da sich bei Anbringung der Massen auf der Innenseite der Wand sowohl das Volumen des Wandhohlraums als auch die Menge des im Hohlraum befindlichen Schallabsorptionsmaterial vermindert.

Um den Einfluss auf die Schalldämmung zu überprüfen, wurde deshalb sicherheitshalber eine Messung durchgeführt, bei der die beiden Wandschalen mit der daran befestigten Beschwerung jeweils um 180° gedreht wurden, so dass sich die Beschwerung, die vorher auf der Außenseite angeordnet war, nun im Inneren der Wand befand. Die in Abb. 56 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass zwischen innen- und außenseitiger Anbringung der Beschwerung im Rahmen der Messgenauigkeit fast kein Unterschied besteht. Die bei den durchgeführten Untersuchungen ermittelten Ergebnisse lassen sich daher diesbezüglich unverändert in die bauliche Praxis übertragen.

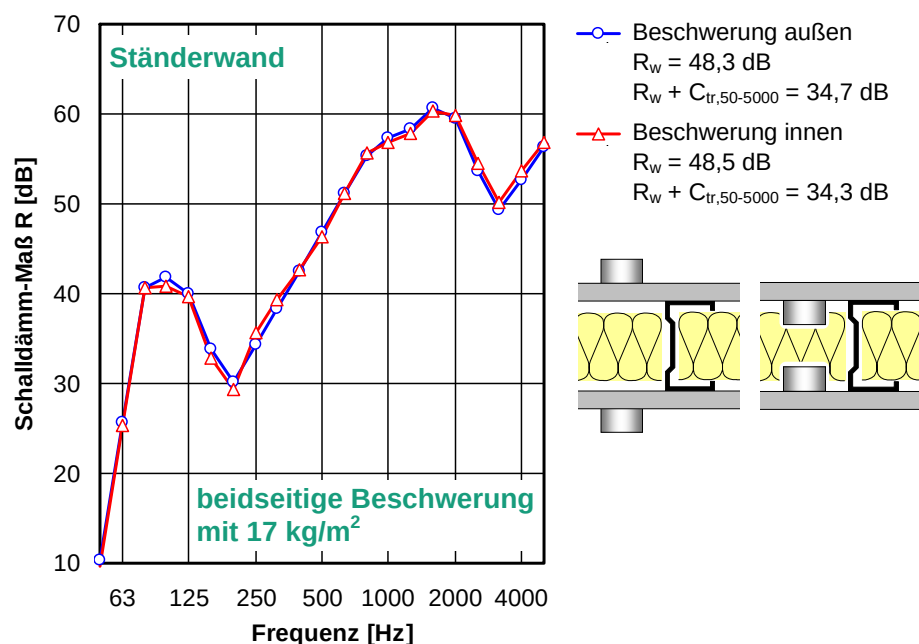


Abb. 56: Schalldämmung einer periodisch beschwerten Ständerwand bei innen- und außenseitiger Montage der Beschwerung. Die untersuchte Wand verfügte über eine beidseitige Beschwerung aus Stahlplatten mit einer Masse von jeweils etwa 17 kg/m^2 . Das Rastermaß des Gitters betrug 40 cm .

7.9 Verwendung von Silentboard statt Stahl

Die bei den Untersuchungen zur periodischen Beschwerung der Wände verwendeten Stahlplatten sind wegen ihrer hohen Rohdichte für diesen Zweck besonders gut geeignet. Für den Einsatz am Bau eignen sie sich – schon wegen der hohen Kosten und der vergleichsweise aufwändigen Verarbeitung – jedoch weniger. Deshalb wurde überlegt, welches Material in der baulichen Praxis am besten als Ersatz für Stahl infrage käme. Dabei fiel die Wahl auf Silentboard-Platten der Firma Knauf [25, 26]. Silentboard-Platten haben, wie die meisten andere Gipskartonplatten auch, eine Dicke von $d = 12,5 \text{ mm}$, verfügen aber über einen Gipskern mit erhöhter Rohdichte, so dass sie mit $m'' = 17,5 \text{ kg/m}^2$ etwa die doppelte Masse wie normale Gipskartonplatten aufweisen. Außerdem sind sie vergleichsweise kostengünstig und ermöglichen zudem eine sorten-reine Bauweise.

Trotz ihres verhältnismäßig hohen Gewichts ist die Rohdichte von Silentboard-Platten noch immer um etwa den Faktor 5,6 niedriger als bei Stahl. Bei gleichem Gesamtgewicht der Beschwerung muss man daher bei Verwendung von Silentboard-Platten die Fläche der einzelnen Massen entsprechend vergrößern. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden Massen eingesetzt, die eine Fläche von $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ aufwiesen und aus zwei vollflächig verklebten Plattenlagen (Dicke $2 \times 12,5 \text{ mm} = 25 \text{ mm}$) bestanden. Auf diese Weise ergab sich für die periodische Beschwerung aus Silentboard-Platten analog zu den verwendeten Stahlplatten eine Gesamtmasse je Flächeneinheit von ca. $8,5 \text{ kg/m}^2$.

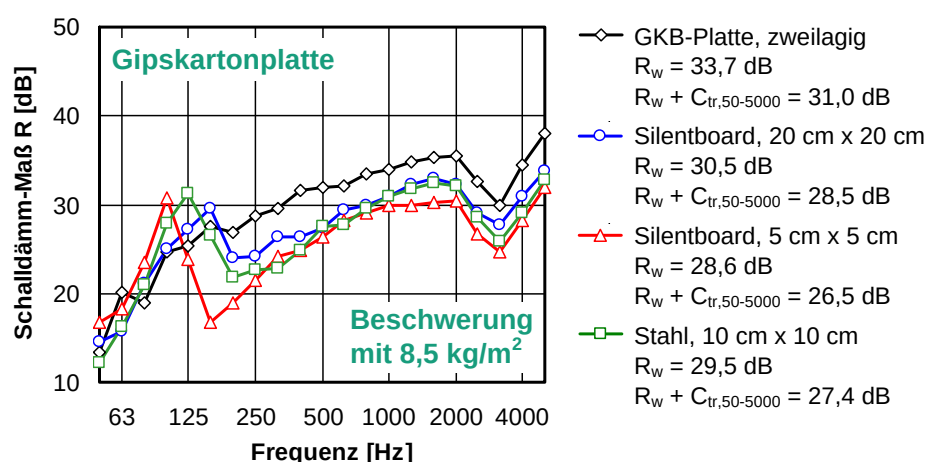


Abb. 57: Schalldämmung einer Gipskartonplatte bei periodischer Beschwerung mit Massen aus Stahl oder Silentboard. Abgesehen von der Kantenlänge der Massen (10 cm bei Stahl, 5 cm bzw. 20 cm bei Silentboard) stimmten die technischen Eigenschaften der Aufbauten überein (Gesamtmasse der Beschwerung etwa $8,5 \text{ kg/m}^2$, Rastermaß des Gitters 40 cm).

Wie sich aus Abb. 57 entnehmen lässt, weist die Beschwerung aus 20 cm x 20 cm großen Silentboard-Platten unter ansonsten gleichen Bedingungen eine deutlich geringere akustische Wirkung als beim Einsatz von Stahlplatten auf. Dies kommt nicht übera-

schend, sondern ist – wie sich aus den Berechnungen mit HYPERAKUS ergibt – auf die größere Fläche der aus Silentboard bestehenden Massen zurückzuführen.

Um Silentboard-Platten sinnvoll zur periodischen Beschwerung von Wänden nutzen zu können, ist also eine Lösung erforderlich, mit der sich die Fläche der Massen bei gleichbleibendem Gewicht verringern lässt. Natürlich könnte man dazu einfach die Dicke der Massen erhöhen. Da die Massen später im Wandhohlraum Platz finden sollen, bestehen hierbei jedoch erhebliche Beschränkungen (bei CW 75-Profilen und beidseitiger Beschwerung der Wand dürfen die Massen maximal etwa 35 mm dick sein, bei CW 50-Profilen ist es sogar noch weniger). Deshalb wurde eine Lösung erdacht, bei der die Befestigung der Massen nur im zentralen Bereich der Fläche erfolgt und ansonsten kein Kontakt zur Wand besteht. Diese Art der Befestigung, die in Abb. 58 schematisch dargestellt ist, ermöglicht es, die Kantenlänge der Kontaktfläche bei der Verwendung von Silentboard-Platten von 20 cm auf 5 cm zu reduzieren.

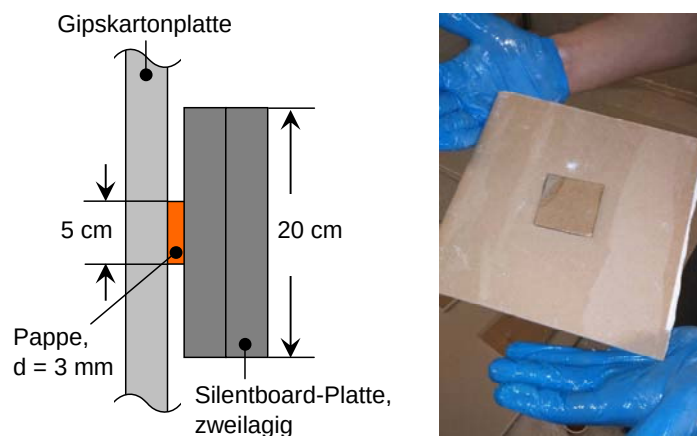


Abb. 58: Verkleinerung der akustisch wirksamen Kantenlänge der Zusatzmassen durch teilflächige Befestigung an der Bauteiloberfläche am Beispiel der verwendeten Silentboard-Platten (schematisch). Als Verbindungsglied und Abstandshalter zwischen den Zusatzmassen und der Gipskartonplatte wurden 5 cm x 5 cm große Stücke einer 3 mm dicken hochfesten Pappe eingesetzt. Die dargestellte Art der Befestigung ist selbstverständlich auch bei anderen Baustoffen anwendbar.

Durch die Verkleinerung der Kontaktfläche steigt die akustische Wirkung beträchtlich an, was in den in Abb. 57 dargestellten Messwerten klar zum Ausdruck kommt. Die akustischen Vorteile einer teilflächigen Befestigung der Massen zeigen sich natürlich nicht nur bei einschaligen Platten sondern auch bei Ständerwänden (siehe Abb. 59), so dass Silentboard-Platten unter Verwendung dieser Befestigungsweise einen vollwertigen Ersatz für Stahlplatten bilden.

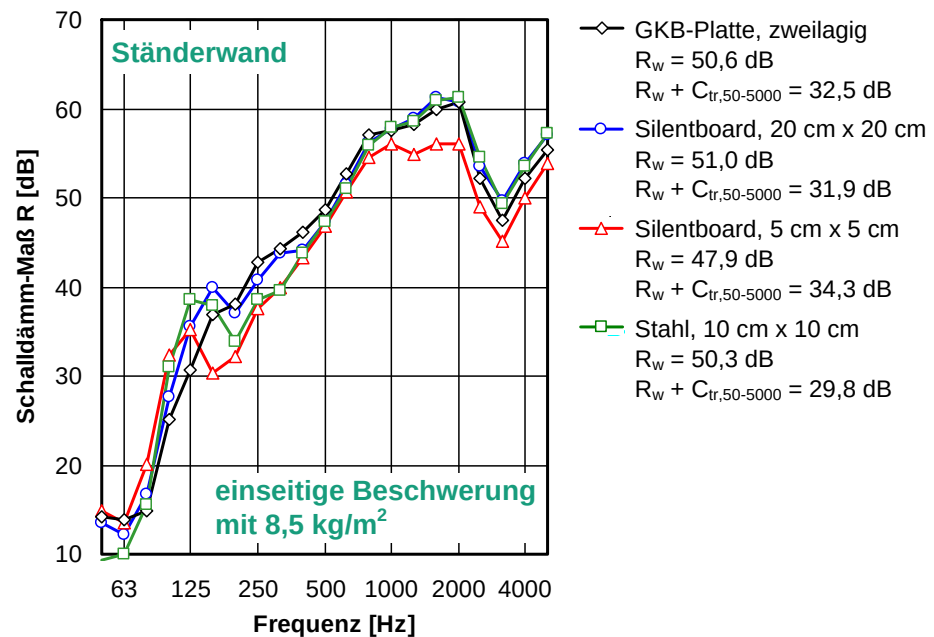


Abb. 59: Schalldämmung einer Gipskarton- Ständerwand bei einseitiger periodischer Beschwörung der Beplankung mit Silentboard-Platten (Gesamtmasse der Beschwörung etwa 8,5 kg/m², Rastermaß des Gitters 40 cm). Die Befestigung der 20 cm x 20 cm großen Silentboard-Platten erfolgte entweder vollflächig oder – gemäß der in Abb. 58 dargestellten Weise – nur im zentralen Bereich der Platten (Kontaktfläche 5 cm x 5 cm).

7.10 Streifenförmige Beschwörung

Mit der in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen periodischen Beschwörung aus kleinflächigen Zusatzmassen wurden akustisch gute Ergebnisse erzielt. Allerdings ist die Herstellung verhältnismäßig aufwändig. Einfacher wäre es, wenn man die Einzelmassen durch eine streifenförmige – natürlich gleichfalls periodische - Beschwörung ersetzen könnte. Um zu überprüfen, ob dies möglich ist, wurden versuchsweise zwei streifenförmige Beschwörungen hergestellt und akustisch untersucht.

Die beiden betrachteten Beschwörungen sind in Abb. 60 beschrieben. Sie bestanden jeweils aus 45 mm breiten Streifen aus Stahlblech, die vollflächig auf die Plattenoberfläche aufgeklebt wurden. Beschwörung Nr. 1 enthielt nur horizontale, Beschwörung Nr. 2 sowohl horizontale als auch vertikale Streifen (siehe Foto in Abb. 61). Die Dicke der beiden Streifen wurde so gewählt, dass sich eine Gesamtmasse der Beschwörung von jeweils etwa 17 kg/m² ergab. Die Beschwörungen wurden zunächst an einer Gipskartonplatte und anschließend an einer Ständerwand erprobt.

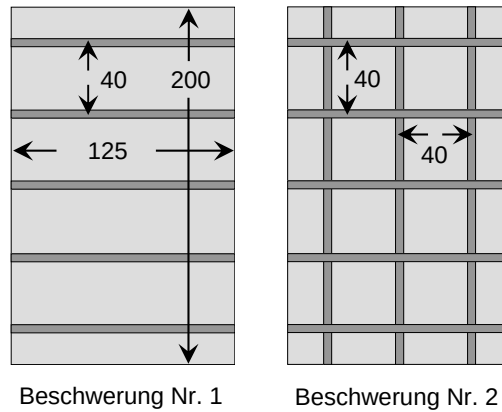


Abb. 60: Aufbau der untersuchten streifenförmigen Beschwerungen (alle Maße in cm). Die verwendeten Streifen bestanden aus Stahlblech und waren 45 mm breit. Aufgrund der unterschiedlichen Dicke der Streifen (20 mm bei Beschwerung Nr. 1 und 10 mm bei Beschwerung Nr. 2) betrug die Gesamtmasse in beiden Fällen etwa 17 kg/m^2 ($17,6 \text{ kg/m}^2$ bei Beschwerung Nr. 1 und $16,3 \text{ kg/m}^2$ bei Beschwerung Nr. 2).



Abb. 61: Foto der streifenförmigen Beschwerung Nr. 2 als Gesamtansicht der Wand (links) und im Detail (rechts).

Die in Abb. 62 dargestellten Schalldämmkurven zeigen, dass das für periodische Beschwerungen typische akustische Verhalten auch bei den streifenförmigen Aufbauten vorhanden ist. Im Vergleich zu einer aus Massepunkten bestehenden Beschwerung ist es allerdings deutlich schwächer ausgeprägt. Das gilt insbesondere für Beschwerung Nr. 1 (nur horizontale Streifen), die fast keine Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen erkennen lässt.

Ein ähnliches Ergebnis wie für die Gipskartonplatte erhält man auch für die untersuchte Ständerwand (siehe Abb. 63). Es ist zwar eine leichte Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen erkennbar. Sie ist aber so gering, dass sich der Einsatz der Streifen in der Praxis nicht lohnt.

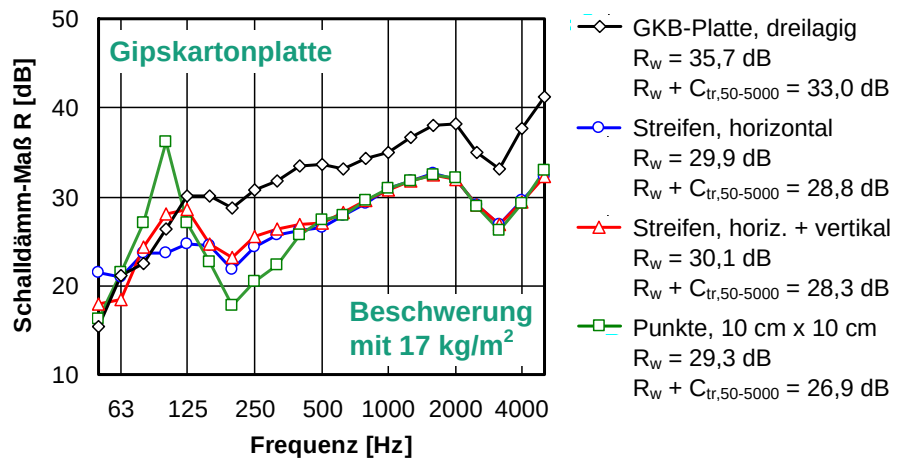


Abb. 62: Schalldämmung einer Gipskartonplatte mit streifenförmiger periodischer Beschwerung. Zum Vergleich ist außerdem eine Beschwerung mit punktförmigen Massen eingezeichnet (Stahlplatten, Kantenlänge 10 cm, Rastermaß 40 cm). Die Gesamtmasse der Beschwerung betrug jeweils etwa 17 kg/m².

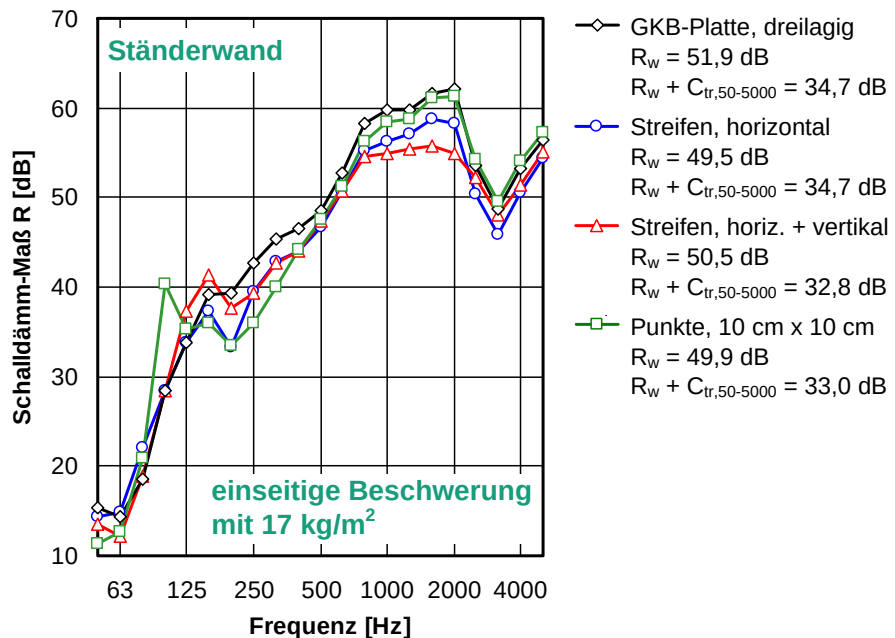


Abb. 63: Schalldämmung einer Gipskarton-Ständerwand mit streifenförmiger periodischer Beschwerung (beschwert war nur die vordere Wandschale). Zum Vergleich ist außerdem eine Beschwerung mit punktförmigen Massen eingezeichnet (Stahlplatten, Kantenlänge 10 cm, Rastermaß 40 cm). Die Gesamtmasse der Beschwerung betrug jeweils etwa 17 kg/m².

7.11 Teilflächig verklebte Gipskartonplatten

Da die im vorangehenden Abschnitt betrachtete streifenförmige Beschwerung nicht den gewünschten Erfolg erbrachte, wird nachfolgend eine weitere Idee zur Verminderung des Herstellungsaufwandes und zur Verbesserung der Anwendungstauglichkeit periodischer Beschwerungen untersucht. Die Idee beruht darauf, zwei getrennte Gipskartonplatten durch ein periodisches Gitter mechanischer Brücken miteinander zu verbinden und so das Grundprinzip der periodischen Beschwerung gewissermaßen zu invertieren. Statt einer Platte mit daran befestigten Zusatzmassen ergibt sich eine Doppelplatte, deren Schalen teilflächig periodisch miteinander verbunden sind. Der Aufbau der Doppelplatte ist in Abb. 64 dargestellt:

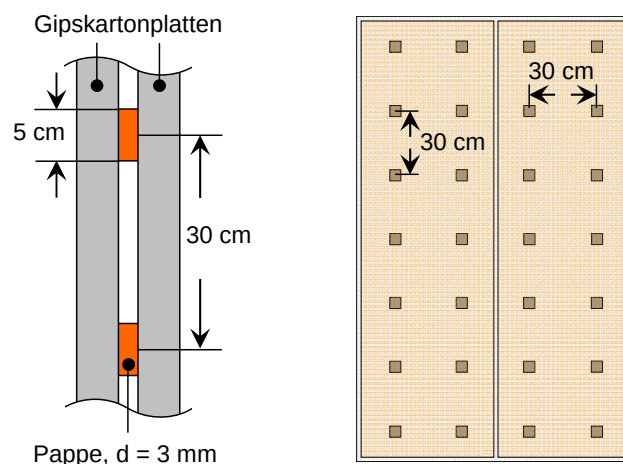


Abb. 64: Aufbau der untersuchten Gipskarton-Doppelplatte mit teilflächiger starrer Verbindung der Schalen. Schnittzeichnung der verbundenen Platten (links) und Anordnung der Verbindungsstellen auf der Bauteilfläche (rechts).

Die Kontaktstellen zwischen den Platten hatten eine Fläche von jeweils 5 cm x 5 cm und bildeten ein quadratisches Gitter mit einem Rastermaß von 30 cm. Um die Platten zu verbinden, wurde besonders harte und feste Pappe verwendet, die beidseitig mit den Gipskartonplatten verklebt wurde. Da die Pappe eine Dicke von 3 mm hatte, verblieb außerhalb der Befestigungsstellen zwischen den Platten ein 3 mm breiter Luftspalt. Um die Herstellung zu vereinfachen, wurde die äußere Platte aus zwei Teilstücken mit einer Fläche von je $B \times H = 60 \text{ cm} \times 196 \text{ cm}$ zusammengesetzt.

Bei den Schalldämm-Messungen wurde die Doppelplatte zunächst alleine betrachtet. Anschließend wurde die Platte dann in eine Ständerwand eingebaut. Aus den in Abb. 65 dargestellten Messergebnissen ist zu erkennen, dass die Schalldämmkurve der Doppelplatte trotz der periodischen inneren Struktur kein Dämmungsmaximum aufweist. Im Vergleich zu zwei Gipskartonplatten, zwischen denen ein vollflächiger Kontakt besteht, ist die Schalldämmung fast im gesamten Frequenzbereich deutlich geringer. Von daher sind auch keine akustischen Verbesserungen zu erwarten, wenn die Doppelplatte zur Beplankung einer Ständerwand verwendet wird. Wie aus Abb. 66 hervorgeht, tritt auch bei der Ständerwand erwartungsgemäß fast im gesamten Frequenzbereich eine Verschlechterung der Schalldämmung ein. Die untersuchte Gipskarton-Doppelplatte

mit teilflächiger periodischer Verbindung der Schalen stellt somit keine geeignete Maßnahme zur Verbesserung der Schalldämmung dar.

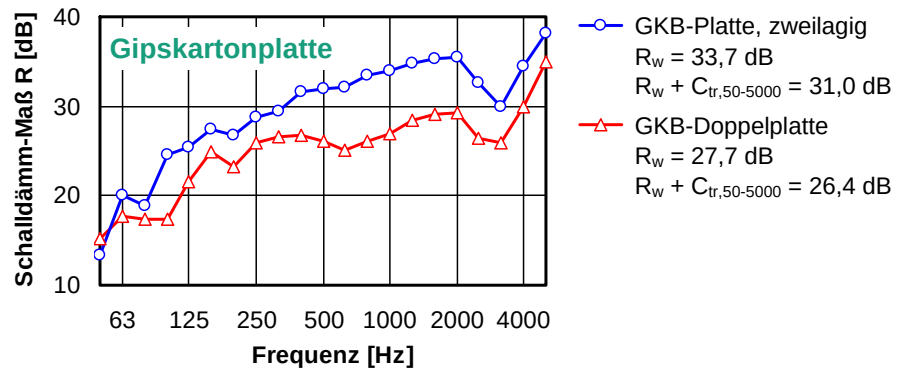


Abb. 65: Schalldämmung einer Doppelplatte aus Gipskarton mit periodisch angeordneten Verbindungselementen (Rastermaß 30 cm) im Vergleich zu einer zweilagigen Gipskartonplatte, bei der die beiden Einzelplatten in vollflächigem Kontakt miteinander standen.

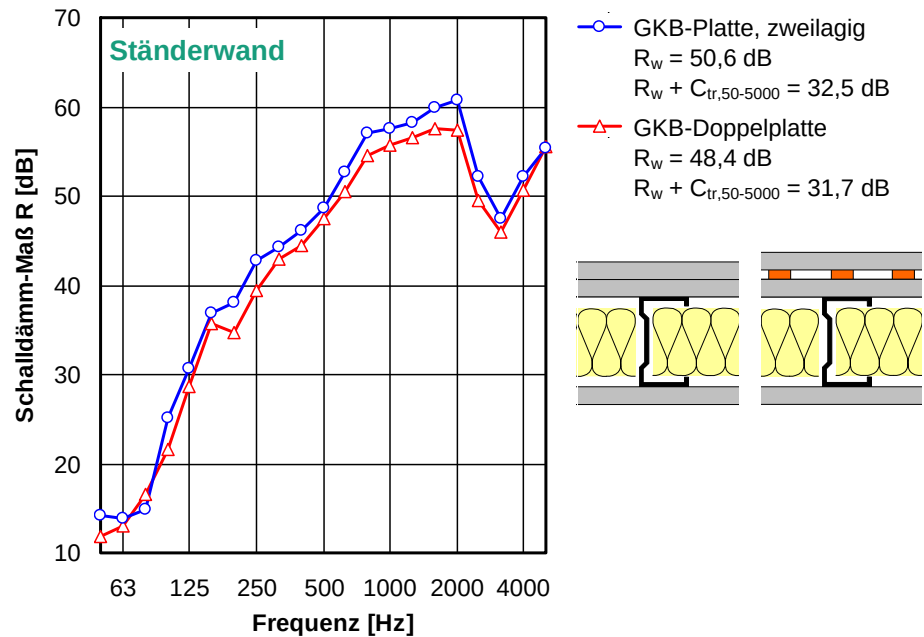


Abb. 66: Schalldämmung einer Gipskarton-Ständerwand, bei der die vorderseitige Beplankung aus einer Doppelplatte mit teilflächiger periodischer Verbindung der Schalen bestand.

7.12 Folie im Wandhohlraum

Als letzte Untersuchungsvariante wird nachfolgend ein Aufbau betrachtet, bei dem sich im Hohlraum der Ständerwand eine Folie mit einer periodischen Beschwerung aus Stahlplatten befindet. An und für sich wirkt sich das Hinzufügen einer dritten Wandschale bei gleichbleibender Gesamtmasse ungünstig auf die Schalldämmung von Ständerwänden aus [81]. Andererseits weisen Folien im Vergleich zu Gipskartonplatten je-

doch eine weitaus geringere Biegesteife auf und in der Literatur finden sich Hinweise, dass der Einbau elastischer Schalen mit periodischer Beschwerung die Schalldämmung von Ständerwänden verbessern kann [53, 54]. Deshalb wurde entschieden, einen Versuch in dieser Richtung zu unternehmen.

Für die Untersuchungen wurde eine 0,9 mm dicke Folie aus PVC verwendet (Teichfolie). Da die flächenbezogene Masse der Folie nur $1,1 \text{ kg/m}^2$ beträgt, im Vergleich zu den anderen Bauteilen also sehr gering ist, kommt ihre akustische Wirkung in erster Linie durch die periodische Beschwerung zustande. Die Beschwerung der Folie erfolgte mit $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ großen Stahlplatten, die beidseitig vis-a-vis auf die Oberfläche aufgeklebt wurden und auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet waren (siehe Abb. 67). Wie bei vielen der vorangehenden Untersuchungen betrug das Gesamtgewicht der Beschwerung auch hier 17 kg/m^2 .



Abb. 67: Folie mit und ohne Beschwerung in der Einbauöffnung des bauakustischen Prüfstands.

Der Einbau der Folie in den Wandhohlraum erfolgte mit Hilfe einer zweiteiligen Holzleiste, die an der Oberseite der Prüföffnung (im dort angebrachten U-Profil) befestigt wurde. Die Folie war in der Leiste eingeklemmt und hing, wie in Abb. 68 dargestellt, in der Mitte des Hohlraums frei herab. Die Abdichtung im Randbereich erfolgte soweit erforderlich mit Klebeband. Der Raum vor und hinter der Folie war mit Mineralwolle gefüllt, die auch die an der Folie befestigten Stahlplatten umschloss.

Ein schwerwiegendes Problem bei dem beschriebenen Aufbau besteht darin, dass periodisch beschwerte Folien eine äußere Vorspannung benötigen, damit sich ihr Dämmungsmaximum, das ansonsten weit unterhalb des menschlichen Hörbereichs liegt, in den gewünschten Frequenzbereich von etwa $100 - 125 \text{ Hz}$ verschiebt. Zunächst bestand die Hoffnung, dass die durch das Gewicht der Beschwerung auf die Folie ausgeübte Zugspannung von etwa 350 N/m hierfür ausreichen würde. Eine rechnerische Abschätzung unter Verwendung von Gl. (12) zeigte aber rasch, dass dies nicht zutrifft, sondern dass dafür im vorliegenden Fall eine erheblich höhere Spannung erforderlich wäre. Da die Herstellung einer dauerhaften äußeren Vorspannung schon im Prüfstand äußerst aufwändig und am Bau bei Ständerwänden nahezu unmöglich ist, war es gezwungenermaßen erforderlich, auf die Vorspannung zu verzichten und die Messung

stattdessen in unbelastetem Zustand durchzuführen, obgleich auf diese Weise natürlich nur mit einer äußerst geringen akustischen Wirkung der Beschwerung zu rechnen war.

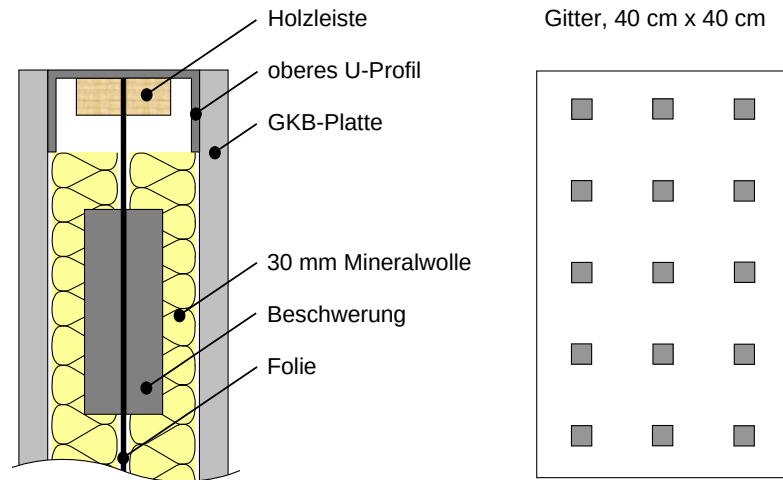


Abb. 68: Einbau der beschwerten Folie in den Hohlraum der Prüföffnung. Schnittzeichnung (links) und vorderseitige Ansicht mit Lage der Massen (rechts).

Die Schalldämmung wurde zunächst an der Folie selbst (mit und ohne Beschwerung) und anschließend an einer Ständerwand mit eingebauter Folie gemessen. Wie vorauszusehen hat die Beschwerung so gut wie keinen Einfluss auf die Schalldämmung der Folie, sondern ist – wie sich aus Abb. 69 deutlich erkennen lässt – aufgrund der fehlenden äußeren Vorspannung akustisch nahezu wirkungslos.

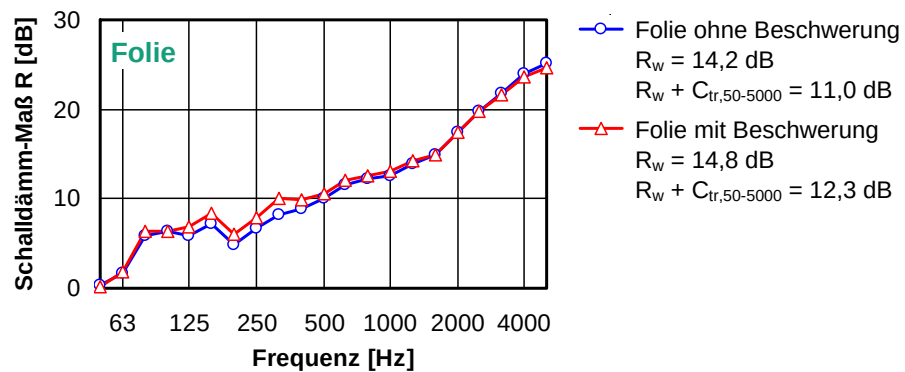


Abb. 69: Schalldämmung der verwendeten Folie mit und ohne periodische Beschwerung. Die Beschwerung bestand aus Stahlplatten mit einer Gesamtmasse von etwa 17 kg/m^2 , die auf einem quadratischen Gitter mit einem Rastermaß von 40 cm angeordnet waren.

Da bei der Folie selbst keine Verbesserung der Schalldämmung vorhanden ist, ist dies selbstverständlich auch beim Einbau in eine Ständerwand nicht zu erwarten. Sicherheitshalber wurde dennoch eine Messung durchgeführt, deren Ergebnisse in Abb. 70 aufgetragen sind. Wird die Folie – zunächst noch in unbeschwertem Zustand – in den Wandhohlraum eingebracht, so erfolgt eine leichte Verschlechterung der Schalldämmung, die vermutlich auf die veränderte Feldverteilung im Hohlraum (u. a. aufgrund

der verringerten Menge an Schallabsorptionsmaterial) zurückzuführen ist. Zwischen der Schalldämmung mit und ohne Beschwerung der Folie besteht jedoch auch bei der Ständerwand kaum ein Unterschied.

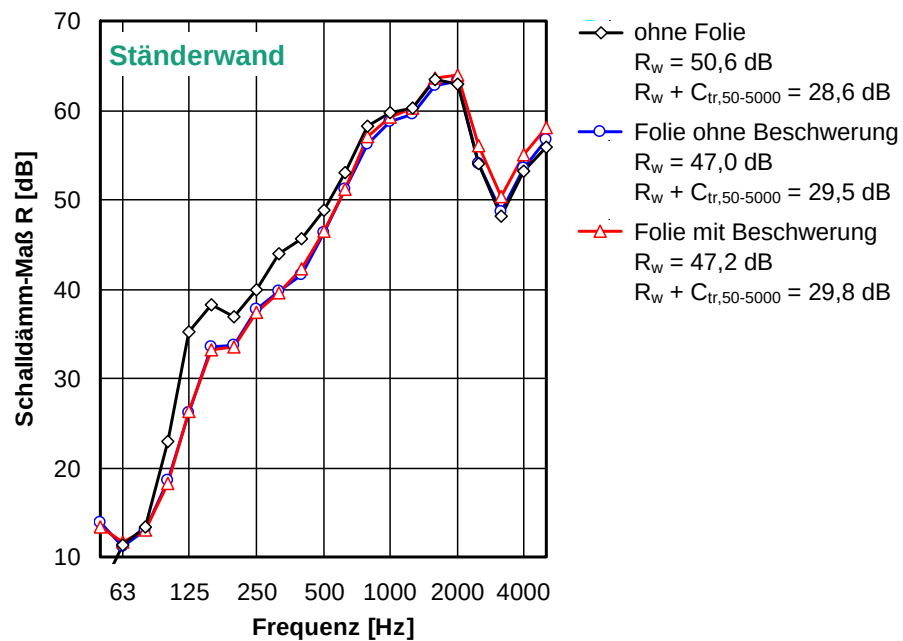


Abb. 70: Schalldämmung einer Ständerwand (CW 75, beidseitig einlagig beplankt) mit einer in den Wandhohlraum eingebauten Folie. Die Messung erfolgte sowohl mit unbeschwerter als auch mit beschwerter Folie. Die periodische Beschwerung wies eine Masse von etwa 17 kg/m² und ein Rastermaß von 40 cm auf.

Den durchgeführten Untersuchungen zufolge ist es in der baulichen Praxis nicht möglich, die Schalldämmung von Ständerwänden mit periodisch beschwerten Folien zu verbessern. Der Grund ist vor allem die fehlende mechanische Vorspannung, ohne die die Beschwerung bei Folien akustisch nicht wirksam ist.

8 Zusammenfassung

Im Vergleich zu Massivwänden mit gleichem bewerteten Schalldämm-Maß weisen Ständerwände aufgrund ihrer zweischaligen Bauweise bei tiefen Frequenzen eine erheblich geringere Schalldämmung auf. Bei wohnüblichen Geräuschen macht sich dies zwar normalerweise nicht negativ bemerkbar, bei tieffrequentem Schall, wie z. B. lauter basshaltiger Musik, kann es jedoch Probleme hervorrufen. Herkömmliche akustische Verbesserungsmaßnahmen, wie z. B. die mehrlagige Beplankung der Wände oder die Verwendung getrennter Ständer, ändern daran wenig, da die Maßnahmen ihre Wirkung vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen entfalten, wo Ständerwände ohnehin schon eine hohe Schalldämmung aufweisen.

Die durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich deshalb vor allem auf Maßnahmen, die hauptsächlich bei tiefen Frequenzen wirksam sind. Ziel des Forschungs-

vorhabens war es, verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen zu untersuchen und die Maßnahmen mit der größten akustischen Wirkung zu ermitteln. Dabei wurden vor allem solche Maßnahmen betrachtet, deren Grundprinzip bereits bekannt war, zu deren Wirkung in Verbindung mit Ständerwänden aber bislang nur wenige Erkenntnisse vorlagen. Nach Vorversuchen zur Beurteilung der akustischen Eignung wurden die besten Maßnahmen anschließend weiterentwickelt und optimiert. Dies erfolgte auf experimenteller Basis, wobei die erforderlichen Schalldämm-Messungen zur Verminderung des Herstellungsaufwandes – ohne Beeinträchtigung der Aussagefähigkeit – an Prüfaufbauten mit reduzierter Bauteilfläche vorgenommen wurden.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Maßnahmen betrachtet:

- a) Elementierung der Wandschalen durch Trennfugen,
- b) $\lambda/4$ -Resonatoren im Wandhohlraum,
- c) flächige Bedämpfung der Wandschalen mit Bitumenbelägen,
- d) Bedämpfung der Wandschalen mit Schwingungstilgern,
- e) periodische Beschwerung der Beplankungsplatten.

Im Gegensatz zu den Maßnahmen a) bis d), die sich bei tiefen Frequenzen als wenig wirksam erwiesen, erbrachte die periodische Beschwerung gute Ergebnisse und wurde deshalb genauer untersucht, wobei unterschiedliche Konstruktionsvarianten betrachtet und die technischen Eigenschaften variiert wurden. Bei der periodischen Beschwerung von Ständerwänden werden die Wandschalen mit kleinflächigen Zusatzmassen versehen, die auf einem periodischen Gitter angeordnet sind. Dabei wird die beste akustische Wirkung erzielt, wenn – wie in Abb. 71 beispielhaft dargestellt – sowohl die Vorder- als auch die Rückseite der Wand beschwert wird.

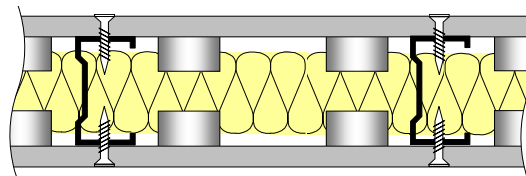


Abb. 71: Beispiel für eine Gipskarton-Ständerwand mit beidseitiger periodischer Beschwerung der Wandschalen und in den Wandhohlraum integrierten Massen. Wenn die Breite des Hohlraums nicht ausreicht, können die Massen auf der Vorder- und Rückseite der Wand auch versetzt angeordnet werden.

Die wichtigsten Ergebnisse der an periodisch beschwerten Ständerwänden durchgeführten Untersuchungen sind nachfolgend in kurzer Form beschrieben:

- Im Vergleich zu herkömmlichen Ständerwänden mit gleicher flächenbezogener Masse bewirkt die periodische Beschwerung der Wandschalen eine Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen und eine Verschlechterung bei mittleren und hohen Frequenzen. Dies hat eine Abnahme des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w bei

gleichzeitiger Zunahme von $R_w + C_{tr,50-5000}$ zur Folge, wobei Ab- und Zunahme etwa gleich groß ausfallen (bei den untersuchten Wänden bis zu etwa 5 - 6 dB). Die Verminderung von R_w stellt dabei einen unerwünschten aber unvermeidlichen Nebeneffekt dar, der wegen der verhältnismäßig hohen Schalldämmung der beschwerten Wände in der Praxis aber zumeist noch hinnehmbar ist.

- Die akustische Wirkung periodischer Beschwerungen äußert sich vor allem darin, dass die Schalldämmkurve bei tiefen Frequenzen ein Maximum durchläuft. Um die größtmögliche Verbesserung der Schalldämmung zu erreichen, sollte die Beschwerung so ausgelegt werden, dass das Dämmungsmaximum in etwa mit der Doppelschalenresonanz der Ständerwand zusammenfällt. Die in dem Forschungsvorhaben entwickelten Formeln ermöglichen es, die Lage des Dämmungsmaximums aus den Konstruktionsparametern vorherzubestimmen.
- Bei der periodischen Beschwerung von Wänden sind die Zusatzmassen wie schon erwähnt auf einem gleichmäßigen (im Normalfall quadratischen) Gitter angeordnet. Für die Gitterkonstante hat sich bei Gipskartonplatten ein Rastermaß von etwa 30 - 50 cm bewährt. Geht man als Beispiel von einem Rastermaß von 40 cm aus, so werden je Quadratmeter Wandfläche etwa sechs Massen benötigt (bei beidseitiger Beschwerung der Wand ist die doppelte Anzahl erforderlich).
- Wie bei den meisten anderen bauakustischen Maßnahmen steigt auch bei der periodischen Beschwerung von Wänden die akustische Wirkung mit zunehmender Masse an. Um eine nachhaltige Verbesserung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen zu erreichen, sollte die Masse der Beschwerung den durchgeführten Untersuchungen zufolge nach Möglichkeit mindestens doppelt so groß wie die Masse der Beplankungsplatten sein. Bei bauüblichen Gipskarton-Ständerwänden entspricht dies etwa 17 kg/m^2 auf jeder Seite der Wand.
- Um die akustische Funktion der periodischen Beschwerung zu gewährleisten, müssen die Abmessungen der Zusatzmassen klein im Verhältnis zum Rastermaß des Gitters sein, was in der Praxis oft im Widerspruch zu der Forderung nach einem ausreichenden Gewicht der einzelnen Massen steht. Die einfachste Möglichkeit zur Lösung dieses Problems besteht darin, die Massen aus einem Material mit hoher Rohdichte, wie z. B. Stahl, herzustellen. Da dies in der baulichen Praxis jedoch häufig Nachteile mit sich bringt, besteht alternativ die Möglichkeit, die Kontaktfläche zwischen den Massen und der Wand zu verkleinern, indem die Massen nur teilflächig an der Beplankung befestigt werden. Aus den durchgeführten Messungen geht hervor, dass dies die akustische Wirkung nicht beeinträchtigt.
- Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten an Wänden mit Einfachständern und einer verkleinerten Prüffläche von etwa $2,5 \text{ m}^2$. Bei Wänden normaler Größe wird die akustische Wirkung der periodischen Beschwerung voraussichtlich noch deutlicher ausfallen als bei den durchgeführten Messungen, da sich die Bauteilränder hier weniger störend auf die Gitterschwingungen auswirken. Auch bei Wänden mit getrennten Ständern ist gegenüber den ermittelten Ergebnissen eine weitere Verstärkung der akustischen Wirkung zu erwarten, da die periodische Beschwerung in erster Linie die Luftschallabstrahlung der Beplankungsplatten herabsetzt und die Schallübertragung bei getrennten Ständern ausschließlich über das Luftschallfeld erfolgt.

- Im normalen Wohnungsbau stellen herkömmliche Verbesserungsmaßnahmen, wie z. B. die mehrfache Beplankung der Ständer, zweifellos die einfachste und wirksamste Möglichkeit zur Erhöhung der Schalldämmung von Ständerwänden dar. Bei tieffrequentem Lärm kann die periodische Beschwerung der Wände die Schallschutzwirkung demgegenüber jedoch deutlich verbessern. Welche Lösung günstiger ist, hängt von der jeweiligen akustischen Situation ab und muss im Einzelfall entschieden werden.

Das durchgeführte Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass sich die Schalldämmung von Ständerwänden durch periodische Beschwerung der Wandschalen bei tiefen Frequenzen wirksam verbessern lässt. Mit den Untersuchungen wurden die wichtigsten akustischen und technischen Grundlagen für die Umsetzung in die bauliche Praxis gelegt, auch wenn zur industriellen Herstellung periodisch beschwerter Platten sicherlich noch weitere Entwicklungsarbeit erforderlich ist. Da sich die Untersuchungen auf Gipskarton-Ständerwände mit Einfachständern beschränkten, sind Aussagen für andere Arten von Wänden, wie z. B. Ständerwände in Holzrahmenbauweise, bislang nur in begrenztem Umfang möglich. Gleiches gilt auch für die Kombination verschiedener Maßnahmen, wie z. B. periodisch angeordnete Schwingungstilger oder unterschiedliche Arten der Beschwerung auf Vorder- und Rückseite der Wand. Um diese Fragen zu klären, sind bei Bedarf noch weitere Untersuchungen erforderlich.

9 Literatur

- [1] Hongisto, V., Oliva, D., Keränen, J.: Subjective and Objective Rating of Airborne Sound Insulation – Living Sounds. *Acta Acoustica united with Acustica*, Vol. 100 (2014), S. 848 - 863.
- [2] DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen (Jan. 2018)
- [3] DIN ISO 226: Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (April 2006).
- [4] Wang, J.; Lu, T. J.; Woodhouse, J.; Langley, R.S.; Evans, J.: Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling. *Journal of Sound and Vibration* 286 (2005), S. 817 - 847.
- [5] Vigran, T. E.: Sound insulation of double-leaf walls – Allowing for studs of finite stiffness in a transfer matrix scheme. *Applied Acoustics* 71 (2010), S. 616 - 621.
- [6] Craik, R. J. M.; Smith, R. S.: Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: airborne sound. *Applied Acoustics* 61 (2000), S. 223 - 245.
- [7] Craik, R. J. M.; Smith, R. S.: Sound transmission through lightweight parallel plates. Part II: structure-borne sound. *Applied Acoustics* 61 (2000), S. 247 - 269.
- [8] Craik, R. J. M.: Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis. *Applied Acoustics*, Vol. 64, H. 3 (2003), S. 325 - 341.
- [9] Arjunan, A.; Wang, C.J.; Yahiaoui, K.; Mynors, D.J.; Morgan, T.; English, M.: Finite element acoustic analysis of a steel stud based double-leaf wall. *Building and Environment*, Vol. 67 (2013), S. 202 - 210.

- [10] Diaz-Cereceda, C.; Poblet-Puig, J.; Rodriguez-Ferran, A.: The finite layer method for modelling the sound transmission through double walls. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), S. 4884 - 4900.
- [11] Hongisto, V.: Sound Insulation of Double Panels - Comparison of Existing Prediction Models. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 92 (2006), S. 61 - 78.
- [12] Tadeu, A.; António, J.; Mateus, D.: Sound insulation provided by single and double panel walls – a comparison of analytical solutions versus experimental results. *Applied Acoustics*, Vol. 65, H. 1 (2004), S. 15 - 29.
- [13] DIN 4109-33: Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Holz-, Leicht- und Trockenbau (Juli 2016).
- [14] Hongisto, V.; Lindgren, M.; Helenius, R.: Sound Insulation of Double Walls - An Experimental Parametric Study. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 88 (2002), S. 904 - 923.
- [15] Nakanishi, S.; Yairi, M.; Minemura, A.: Estimation method for parameters of construction on predicting transmission loss of double leaf dry partition. *Applied Acoustics*, Vol. 72, H. 6 (2011), S. 364 - 371.
- [16] Cambridge, J. E.: The Sound Insulation of Cavity Walls. Dissertation, University of Canterbury, Neuseeland (2012).
- [17] Koehler, M.: Die Montage macht den Dämmwert. *Trockenbau Akustik* 12 (2013), S. 30 - 35.
- [18] Reinhold, S.; Schneider, M.; Fischer, H.-M.: Measured sound insulation of double leaf plasterboard walls - influence of different construction parameters. *Inter-noise 2013, Tagungs-CD*.
- [19] Uris, A.; Sinisterra, J.; Bravo, J. M.; Llinares, J.; Estelles, H.: Influence of screw spacings on sound reduction index in lightweight partitions. *Applied Acoustics* 63 (2002), S. 813 - 818.
- [20] Muellner, H.; Plotizin, I.: Beeinträchtigung des Schallschutzes von Gipskartonständerwänden durch "sekundäre" Wanddetails und Verarbeitungsqualität. *Fortschritte der Akustik - DAGA 2002, Tagungsband*, S. 551 - 552.
- [21] Muellner, H.; Plotizin, I.: Die Details machen den Schallschutz. *Trockenbau Akustik* 2/03 (2003), S. 32 - 33.
- [22] Legault, J.; Atalla, N.: Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 324, H. 3 - 5 (2009), S. 712 - 732.
- [23] Roozen, N. B.; Muellner, H.; Labelle, L.; Rychtáriková, M.; Glorieux, C.: Influence of panel fastening on the acoustic performance of light-weight building elements: Study by sound transmission and laser scanning vibrometry. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 346 (2015), S. 100 - 116.
- [24] Weber, L.: Das Umfeld guter Vorsätze, Teil 1. *TrockenBau Akustik*, H. 8.2009 (2009), S. 28 - 31.

- [25] Knauf Silentboard-Systeme, Konstruktionen und Eigenschaften. Produktbroschüre SB01.ch/deut./02.16 der Knauf Gips KG, www.knauf.ch (2016).
- [26] Silentboard GKF - Gipsplatte mit außergewöhnlichem Schallschutz. Technisches Blatt K717.de/ger/03.17/0/TB der Knauf Gips KG, www.knauf.de (2017).
- [27] Rigips DuoTech - DIE Schallschutzlösung. Produktbroschüre der Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH, www.rigips.com (2015).
- [28] Uris, A.; Llopis, A.; Llinares, J.: Effect of the rockwool bulk density on the air-borne sound insulation of lightweight double walls. *Applied Acoustics* 58 (1999), S. 327 - 331.
- [29] Gösele, K.; Kurz, R.: Der wahre Einfluss der Mineralwolldicke. *Trockenbau* 9/02 (2002), S. 41 - 42.
- [30] Bravo, J. M.; Estelles, H.; Llinares, J.; Sinisterra, J.; Uris, A.: Technical Note: Comparison of the sound insulation of lightweight partitions with different sound absorbing infills. *Building Acoustics*, Vol. 9, H. 4 (2002), S. 303 - 309.
- [31] Yairi, M.; Sakagami, K.; Morimoto, M.; Minemura, A.; Andow, K.: Effect of acoustical damping with a porous absorptive layer in the cavity to reduce the structure-borne sound radiation from a double-leaf structure. *Applied Acoustics*, Vol. 64, H. 4 (2003), S. 365 - 384.
- [32] Stani, M. M.; Muellner, H.; Plotzlin, I.: Sound Insulation of Plasterboard Walls and Airflow resistivity: An Empirical Examination with Respect to Practical Applications. *Forum Acusticum 2005*, Tagungs-CD, S. 1987 - 1992.
- [33] Fahy, F. J.; Schofield, C.: A note on the interaction between a Helmholtz resonator and an acoustic mode of an enclosure. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 72, H. 3 (1980), S. 365 - 378.
- [34] Mason, J. M.; Fahy, F. J.: The use of acoustically tuned resonators to improve the sound transmission loss of double-panel partitions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 124, H. 2 (1988), S. 367 - 379.
- [35] Nair, S. U.; Shete, C. D.; Subramoniam, A.; Handoo, K. L.; Padmanabhan, C.: Experimental and computational investigation of coupled resonator-cavity systems. *Applied Acoustics*, Vol. 71, H. 1 (2010), S. 61 - 67.
- [36] VDI 3727 Blatt 1: Schallschutz durch Körperschalldämpfung - Physikalische Grundlagen und Abschätzungsverfahren (1984).
- [37] Green Glue - noiseproof your life. Produktbroschüre, Saint-Gobain Performance Plastics, www.greengluecompany.com (2016).
- [38] Green Glue Installation Guide. Saint-Gobain Performance Plastics, www.greengluecompany.com (2016)
- [39] Bravo, J. M.; Sinisterra, J.; Uris, A.; Llinares, J.; Estelles, H.: Influence of air layers and damping layers between gypsum boards on sound transmission. *Applied Acoustics*, Vol. 63, H. 10 (2002), S. 1051 - 1059.

- [40] Legault, J.; Atalla, N.: Sound transmission through a double panel structure periodically coupled with vibration insulators. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, H. 15 (2010), S. 3082 - 3100.
- [41] Xiao, Y.; Wen, J.; Wen, X.: Broadband locally resonant beams containing multiple periodic arrays of attached resonators. *Physics Letters A* 376 (2012), S. 1384 - 1390.
- [42] Xiao, Y.; Wen, J.; Wen, X.: Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), S. 5408 - 5423.
- [43] Hettler, S.: Vibroacoustic behaviour of sandwich structures with spatially distributed resonators. Dissertation, Universität Stuttgart (2013).
- [44] Carneal, J. P.; Fuller, C. R.: An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, H. 3-5 (2004), S. 749 - 771.
- [45] Späh, M.: Verbesselter baulicher Schallschutz durch aktive Körperschallisolation haustechnischer Anlagen. Bericht B-BA 2/2010 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBSR), Juli 2010.
- [46] Kurtze, G.: Light-weight walls with high transmission loss. *Acustica*, Vol. 9 (1959), S. 441 - 445.
- [47] Hashimoto, N.; Katsura, M.; Yasuoka, M.; Fujii, H.: Sound insulation of a rectangular thin membrane with additional weights. *Applied Acoustics*, Vol. 33, H. 1 (1991), S. 21 - 43.
- [48] Hashimoto, N.; Katsura, M.; Nishikawa, Y.; Katagihara, K.; Torii, T.; Nakata, M.: Experimental study on sound insulation of membranes with small weights for application to membrane structures. *Applied Acoustics*, Vol. 48, H. 1 (1996), S. 71 - 84.
- [49] Sakuma, T.; Iwase, T.; Yasuoka, M.: Numerical analysis of sound insulation characteristics of membranes with additional weights. *J. Archit. Plan. Environ. Eng., AIJ*, Nr. 510 (1998), S. 1 - 8.
- [50] Maysenhölder, W.: Transmission loss of inhomogeneous plates with local resonators: Methods of theoretical modelling. *Forum Acusticum 2002*, Tagungsband, Paper RBA-04-11.
- [51] Maysenhölder, W.: Bending-Wave Energy Propagation in Inhomogeneous Thin Plates and Membranes. *Internoise 2004*, Tagungsband, Paper 787.
- [52] Mehra, S.-R.; Maysenhölder, W.; Leistner, P.; Teller, P.: Abschlussbericht zum DFG-Projekt "Akustisches Verhalten von Hüllenkonstruktionen aus Folien und Membranen - AHAFUM", Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, DFG-Geschäftszeichen: GE 368/24-1 (2004).
- [53] Idrisi, K.; Johnson, M. E.; Toso, A.; Carneal, J. P.: Increase in transmission loss of a double panel system by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: A

- comparison between theory and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, H. 1-2, (2009), S. 51 - 66.
- [54] Idrisi, K.; Johnson, M. E.; Theurich, D.; Carneal, J. P.: A study on the characteristic behavior of mass inclusions added to a poro-elastic layer. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, H. 20 (2010), S. 4136 - 4148.
 - [55] Naify, C. J.; Chang, C.-M.; McKnight, G.; Nutt, S.: Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterials. *J. Appl. Phys.* 108 (2010), 114905, S. 1 - 7.
 - [56] Zhang, Y.; Wen, J.; Xiao, Y.; Wen, X.; Wang, J.: Theoretical investigation of the sound attenuation of membrane-type acoustic metamaterials. *Physics Letters A* 376 (2012), S. 1489 - 1494.
 - [57] Langfeldt, F.; Gleine, W.; von Estorff, O.: Analytical model for low-frequency transmission loss calculation of membranes loaded with arbitrarily shaped masses. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 349 (2015), S. 315 - 329.
 - [58] Langfeldt, F.; Riecken, J.; Gleine, W.; von Estorff, O.: A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 373 (2016), S. 1 - 18.
 - [59] Langfeldt, F.; Gleine, W.; von Estorff, O.: Enhancing the low-frequency noise reduction of a double wall with membrane-type acoustic metamaterials. *Internoise 2016*, Tagungs-CD, S. 7551 - 7562.
 - [60] DIN EN ISO 10140-1 bis -5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand (Dez. 2010 bis Dez. 2016).
 - [61] Cremer, L.; Heckl, M.: *Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 2. Auflage, Springer, Berlin 1996, S. 522.
 - [62] DIN EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (Juni 2013).
 - [63] Weber, L.; Koch, S.: Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten - Teil 1: Luftschalldämmung. *Bauphysik* 21 (1999), H. 4, S. 167 - 170.
 - [64] Teroson RB IX (auch bekannt als Terostat IX), Technisches Datenblatt der Henkel AG, www.loctite.de (2013).
 - [65] Wareing, R. R.; Davy, J. L.; Pearse, J. R.: Variations in measured sound transmission loss due to sample size and construction parameters. *Applied Acoustics* 89 (2015), S. 166 - 177.
 - [66] Euchner, M.: Verbesserung der Schalldämmung von Gipskarton-Ständerwänden bei tiefen Frequenzen. MSc-Thesis, Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2016).
 - [67] DIN EN 29052-1: Akustik - Bestimmung der dynamischen Steifigkeit - Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (1992).
 - [68] Weber, L.; Krämer, M.; Brandstetter, K.-D.: Den Schall-Löchern auf der Spur. *TrockenBau Akustik*, 1-2.2012 (2012), S. 28 - 32.

- [69] Jauer, A.: Neuartige Kulissenschalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonatoren. Diplomarbeit, HfT Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2002).
- [70] Brandstätter, P.; Eckoldt, D.; Jauer, A.: Schalldämpfer-Kulissen mit integrierten Resonatoren. IBP-Mitteilung 411 (2002).
- [71] Meister, M.: Dimensionierung und Simulation von Helmholtz-Resonatoren. Diplomarbeit, Technische Universität Graz (2011).
- [72] VDI 3727 Blatt 1: Schallschutz durch Körperschalldämpfung - Physikalische Grundlagen und Abschätzungsverfahren (Febr. 1984).
- [73] VDI 3727 Blatt 2: Schallschutz durch Körperschalldämpfung - Anwendungshinweise (Nov. 1984).
- [74] Übersicht Sylomer HD. Produktinformation der Getzner Werkstoffe GmbH, www.getzner.com (2015).
- [75] Sylodamp SP 30 Werkstoffdatenblatt. Produktinformation der Getzner Werkstoffe GmbH, www.getzner.com (2016).
- [76] Maysenhölder, W.: HYPERAKUS - ein Werkzeug zur Untersuchung der Schalldämmung von periodisch strukturierten Wänden. IBP-Mitteilung 330 (1998).
- [77] Maysenhölder, W.: Mauerwerk, ein akustisches Beugungsgitter? Berechnung und Visualisierung der Schalldämmung. Bauphysik 20 (1998), H. 6, S. 233 - 238.
- [78] Maysenhölder, W.: Sound transmission through periodically inhomogeneous anisotropic thin plates: Generalizations of Cremer's thin plate theory. Acustica / Acta Acustica 84 (1998), S. 668 - 680.
- [79] Maysenhölder, W.; Horvatic, B.; Lu, W.; Naßhan, K.: HYPERAKUS Video - Transmission of plane sound waves through infinite plates / Transmission von ebenen Schallwellen durch unendliche dünne Platten (je 10 Minuten). DVD, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2008).
- [80] Maysenhölder, W.: Transmission loss of a massive wall with an attached ETICS: Estimation of the influence of a metamaterial insulating layer with a COMSOL model. Präsentation beim ICON-ACME Mid-Term Meeting, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 17. Mai 2017.
- [81] Uris, A.; Bravo, J. M.; Gomez-Lozano, V.; Ramirez, P.; Llinares, J.: Sound insulation of double frame partitions with an internal gypsum board layer. Applied Acoustics 67 (2006), S. 918 - 925.

10 Danksagung

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

- den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern – der Knauf Gips KG und der Siniat GmbH – für die Bereitstellung von Baumaterial, die Unterstüt-

zung bei der Herstellung von Prüfaufbauten, die Bereitstellung von Produktinformationen und die Beratung in technischen Fragen,

- Herrn Marc Euchner und Herrn Dominik Bauer für ihre Mitwirkung bei der Herstellung der Prüfaufbauten und wertvolle Beiträge zum durchgeführten Messprogramm.