

F 3052

Mark Koehler, Lutz Weber

Schallschutz in Bauten mit innenliegender Wärmedämmung (Schallschutz Innendämmung)

F 3052

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0079-1

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/tauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

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

IBP-Bericht B-BA 1/2017

Schallschutz in Bauten mit innenliegender Wärme- dämmung (Schallschutz Innendämmung)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD 10.08.18.7-15.24). Die Verantwortung für den Bericht liegt beim Autor

Der Bericht umfasst
90 Seiten Text
8 Tabellen
48 Abbildungen

M. BP. Dipl.-Ing (FH) Mark Koehler
Dr. Lutz Weber

Stuttgart, 12. Oktober 2017

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
P. Leistner

Dr. P. Brandstätt

M.BP. Dipl.-Ing (FH)
M. Koehler

1	Einleitung	5
2	Grundlagen	9
2.1	Akustische Grundlagen: Schallübertragung, Messverfahren und Begriffe	9
2.2	Einzahlangaben	13
2.2.1	Schalldämm-Maß und Norm-Flankenpegeldifferenz	13
2.2.2	Spektrum-Anpassungswerte	14
3	Vorgehensweise	15
3.1	Messungen	16
3.2	Planungswerkzeuge	17
4	Literaturrecherche	18
4.1	Verbesserung der Schalldämmung von Wänden durch Vorsatzschalen	18
4.2	Verbesserung der Schalldämmung von Wänden durch WDVS	19
5	Versuchsaufbau	21
5.1	Prüfstand	21
5.2	Wandkonfiguration (Referenz)	22
5.3	Auswahl der Innendämmsysteme und technische Daten	25
5.3.1	Kombisysteme aus EPS und GP	29
5.3.2	Kombisysteme aus Fasern und Gipsplatten	29
5.3.3	Verputzte Fasersysteme	29
5.3.4	Verputzte mineralische Schäume	29
6	Versuchsdurchführung	30
6.1	Messung der Schalldämmung	30
6.2	Messung der Schall-Längsleitung	30
6.3	Messung der Körperschallpegel auf der Querwand	31
7	Ergänzende Untersuchungen	32
7.1	Wahl des Empfangsraumes für die Messungen der Schalldämmung	32
7.2	Art und Weise der Befestigung	33
7.3	Art und Weise der Randfugenabdichtung	35
7.4	Vergleich einseitige und beidseitige Montage der Innendämmung	36
8	Messergebnisse und Diskussion	39
8.1	Messergebnisse Schalldämm-Maß und Verbesserung	39
8.1.1	Referenzmessungen	39
8.1.2	Kombisysteme aus EPS und Gipsplatten	40

8.1.3	Kombisysteme aus Fasern und Gipsplatten	41
8.1.4	Verputzte Fasersysteme	42
8.1.5	Verputzte mineralische Schäume	43
8.1.6	Bewertetes Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$	45
8.2	Messergebnisse Norm-Flankenpegeldifferenz und Verbesserung	46
8.2.1	Referenzmessungen	46
8.2.2	Kombisysteme aus EPS und Gipsplatten	47
8.2.3	Kombisysteme aus Fasern und Gipsplatten	48
8.2.4	Verputzte Fasersysteme	49
8.2.5	Verputzte mineralische Schäume	50
8.2.6	Bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$	51
8.3	Vergleich Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes und Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz	52
8.4	Messergebnisse Körperschall auf der Wohnungstrennwand (Querwand) zur Unterscheidung der Übertragungswege F_f , F_d und D_f	52
8.5	Messung der dynamischen Steifigkeit der Dämmschichten nach DIN 29052 und Berechnung der Resonanzfrequenzen	58
9	Berechnungsmodell für die Schalldämmung	60
9.1	Resonanzfrequenz	61
9.2	Zusammenhang zwischen Längs- und Durchgangsdämmung	63
9.3	Vorhandene Berechnungsmodelle	64
9.4	Näherungsformel für die Verbesserung der Schalldämmung	66
9.5	Darstellung des entwickelten Berechnungsmodells	68
9.5.1	Erforderliche Eingangsdaten	68
9.5.2	Übersicht über die Berechnungsschritte	69
9.5.3	Berechnung der scheinbaren Resonanzfrequenz	70
9.5.4	Umrechnung der scheinbaren in die tatsächliche Resonanzfrequenz	71
9.5.5	Berechnung der Verbesserung in Durchgangsrichtung	71
9.5.6	Anpassung der Verbesserung an die Schalldämmung der Grundwand	72
9.5.7	Berechnung der Verbesserung in Längsrichtung	73
9.5.8	Anwendungsbereich und Berechnungsgenauigkeit	73
9.6	Einfluss von Spektrum-Anpassungswerten	76
9.7	Resultierende Schalldämmung am Bau	80
10	Zusammenfassung	83
11	Ausblick	86

12	Danksagung	87
13	Literaturverzeichnis	88

1 Einleitung

Die energetische Sanierung des vorhandenen Gebäudebestandes stellt eine der wichtigsten energie- und klimapolitischen Aufgaben in Deutschland dar. Ein zentrales Thema hierbei bildet die thermische Isolation der Gebäudehülle. Zur Dämmung von Außenwänden werden in Deutschland neben den üblichen außenseitig angebrachten Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) in zunehmendem Maße auch Innendämmsysteme eingesetzt. Neben ihrer thermischen Wirkung beeinflussen derartige Systeme in starkem Maße auch das akustische Verhalten der Außenwand. Abhängig vom Aufbau des Dämmsystems können dabei sowohl Verbesserungen als auch - zum Teil gravierende - Verschlechterungen der Schalldämmung eintreten.

Während die akustischen Eigenschaften von WDVS bereits mehrfach intensiv untersucht wurden und daher gut bekannt sind [1 - 5], gibt es für innenseitige Dämmsysteme bislang noch keine zuverlässigen Planungswerkzeuge. Dies gilt insbesondere für die Schall-Längsleitung entlang der Außenwand, die den Schallschutz zwischen benachbarten Räumen erheblich - in ungünstigen Fällen um bis zu 10 dB - herabsetzen kann [6]. Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, die akustischen Eigenschaften von Bauten mit innenseitiger Wärmedämmung näher zu untersuchen, ein Vorhersageverfahren für die Schallübertragung zu entwickeln und die hierfür erforderlichen schalltechnischen Eingangsdaten bereitzustellen.

Die innenseitige Wärmedämmung von Bauten wirkt sich auf zweierlei Weise auf die Schalldämmung der Außenwände aus: Zum einen ändert sich der Schalldurchgang von außen nach innen, so dass die betroffenen Bewohner u. U. einer deutlich erhöhten Belastung durch Umgebungslärm ausgesetzt sind. Zum anderen ist auch die Schall-Längsleitung entlang der Außenwand betroffen, was eine verstärkte Schallübertragung zwischen angrenzenden Räumen zur Folge haben kann. Die resultierenden Schallübertragungspfade in Längs- und Durchgangsrichtung der Wand sind in Bild 1 schematisch dargestellt.

Da für die innenseitige Wärmedämmung von Bauten keine validierten akustischen Planungswerkzeuge verfügbar sind, besteht in starkem Maße die Gefahr von Schallschutzmängeln. Dies gilt umso mehr, als die Innendämmung wegen ihrer geringen Dämmstoffdicke im Vergleich zur Außendämmung per se akustische Nachteile aufweist. Dies äußert sich vor allem in ihrer verhältnismäßig hohen Resonanzfrequenz, die die Schalldämmung besonders im Bereich mittlerer Frequenzen (dem für menschliche Sprache pegelbestimmenden Bereich) beeinträchtigt.

Da es für die Schallübertragung in Durchgangsrichtung nur eine untergeordnete Rolle spielt, ob sich die Wärmedämmung auf der Innen- oder Außenseite der Wand befindet, kann für diesen Übertragungspfad als Grundlage auf die im IBP entwickelten akustischen Berechnungsverfahren für WDVS zurückgegriffen werden [3, 7]. Diese Verfahren, die sowohl bei bauaufsichtlichen Zulassungen als auch in der Normung Verwendung finden [8, 9], haben sich in der Praxis be-

währt und liefern zuverlässige und genaue Ergebnisse. Zur Anwendung auf innenseitige Dämmsysteme sind allerdings Modifikationen der Berechnungsformeln sowie die messtechnische Bestimmung der benötigten schalltechnischen Eingangsdaten erforderlich.

Hinsichtlich der Schall-Längsleitung ist die Ausgangssituation bedeutend schwieriger. Zwar gibt es auch hierfür Berechnungsverfahren, die vor einigen Jahren im IBP für Vorsatzschalen entwickelt wurden und mittlerweile Bestandteil der akustischen Normung sind [8 - 10]. Diese Verfahren bilden die bei Innendämmsystemen vorhandene akustische Situation jedoch nur unzureichend ab und sind deshalb - wenn überhaupt - nur eingeschränkt verwendbar. Die Hauptaufgabe des Vorhabens besteht deshalb in der Entwicklung einer zuverlässigen Vorhersagemethode für die Schall-Längsleitung von innenseitigen Wärmedämmsystemen. Dies erfolgt durch Messungen an einer repräsentativen Auswahl von Dämmsystemen in einem speziellen bauakustischen Prüfstand und Abgleich der ermittelten Messergebnisse mit dem entwickelten Vorhersagemodell.

Die geplanten Untersuchungen erfolgen in enger Zusammenarbeit mit führenden Herstellern von Innendämmsystemen. Da bei den Herstellern großes Interesse an der Thematik besteht, erklärten sich alle angesprochenen Unternehmen (Knauf Aquapanel GmbH, Knauf Insulation GmbH, Saint-Gobain Rigips GmbH, Siniat GmbH und Xella Technologiegesellschaft mbH) bereit, sich an dem Vorhaben zu beteiligen. Die Beteiligung umfasst die Lieferung von Baumaterial, den Einbau der erforderlichen Wände in den Prüfstand und die Montage der verschiedenen Dämmsysteme, sowie die Beratung der Forschungsstelle.

Laut Statistik (2011) wurden etwa 76 % aller Gebäude in Deutschland vor dem Jahr 1990 (also vor Inkrafttreten der 3. Wärmeschutzverordnung am 01.01.1995) errichtet [11]. Es ist daher davon auszugehen, dass der weitaus größte Teil dieser Bauten energetisch nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Neben der Modernisierung der Heizungsanlage, dem Austausch der Fenster und der thermischen Isolation von Dachfläche / oberster Geschossdecke stellt die Wärmedämmung der Außenwände dabei die wichtigste energetische Sanierungsmaßnahme dar.

Bislang wurde bei etwa 30 % der in Deutschland vorhandenen Altbauten eine nachträgliche Wärmedämmung der Außenwände durchgeführt [12]. Dieser Anteil erhöht sich jedes Jahr um etwa 1 %, was einem jährlichen Umsatz der Bauwirtschaft in Höhe von etwa 3 Milliarden Euro entspricht [13]. Aufgrund stetig steigender Energiekosten, weiterer Verschärfung der energetischen Anforderungen und diversen öffentlichen Förderprogrammen ist für die Zukunft bei der nachträglichen Dämmung von Gebäuden mit einer weiteren Zunahme der Investitionen zu rechnen. Die Dämmung der Gebäudehülle ist daher nicht nur im Sinne einer effizienten und nachhaltigen Nutzung des vorhandenen Gebäudebestandes bedeutsam, sondern stellt zugleich auch einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar.

Sofern die Möglichkeit dazu besteht, ist die außenseitige Dämmung von Bauten der Innendämmung aus bauphysikalischen Gründen (wärmebrückenfreie Bauweise, geringere Gefahr von Feuchte- und Schimmelschäden) im allgemeinen vorzuziehen. Ist gibt jedoch auch Punkte, die für den Einsatz von Innendämmsystemen sprechen:

- Bei denkmalgeschützten Bauten stellen Innendämmsysteme zumeist die einzige Möglichkeit dar, um die Gebäudehülle thermisch zu isolieren.
- Häufig verbieten örtliche Bauvorschriften die Anbringung von außenseitigen Dämmsystemen, um Beeinträchtigungen des Stadtbildes zu vermeiden (z. B. in Gebieten mit Fachwerkbauweise oder bei Gebäuden mit historisch wertvollen Fassaden).
- Bei Grenzbebauung oder schmalen Zugangspfaden ist eine Außendämmung oft aus rechtlichen oder praktischen Gründen nicht möglich.
- Innendämmsysteme bieten gegenüber einer außenseitigen Dämmung einen Kostenvorteil, der allerdings je nach Bausituation sehr unterschiedlich ausfallen kann. In der Literatur werden Einsparungen zwischen 20 % und 70 % genannt [14, 15].

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass Innendämmsysteme - vorzugsweise im Altbau - einen festen Platz bei der energetischen Sanierung der vorhandenen Bausubstanz einnehmen. Derzeit werden etwa 15 % der Wärmedämm-Maßnahmen an Außenwänden im Altbau als Innendämmung ausgeführt [12]. In Zukunft ist voraussichtlich mit einer weiteren Erhöhung dieses Anteils zu rechnen. Als schwerwiegendes Problem hierbei erweist sich allerdings, dass für Innendämmsysteme - vor allem im Hinblick auf die Schall-Längsleitung - bislang keine zuverlässigen Planungswerkzeuge für den baulichen Schallschutz existieren. Im Bereich der Außendämmung sind derartige Werkzeuge bereits seit langem verfügbar und werden von Architekten und Planern intensiv genutzt.

Um Schallschutzmängel zu vermeiden und eine nachhaltige Bauweise nach dem aktuellen Stand der Technik sicherzustellen, sind vergleichbare akustische Planungsinstrumente daher auch für Innendämmsysteme dringend erforderlich. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, geeignete akustische Prognoseverfahren für den Massivbau bereitzustellen, um auch bei Innendämmsystemen eine ausreichende Planungssicherheit beim baulichen Schallschutz zu gewährleisten.

Zur Schall-Längsleitung von Innendämmsystemen liegen nach derzeitigem Kenntnisstand bislang nur wenige Ergebnisse vor. Die Daten stammen vor allem aus früheren Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik [16], die sich jedoch hinsichtlich der Zielsetzung und der untersuchten Konstruktionen stark vom Forschungsvorhaben unterscheiden. Die vorhandenen Ergebnisse können zwar zur Ergänzung des beantragten Vorhabens herangezogen werden, stellen aber keine ausreichende Grundlage zur Entwicklung von Planungswerkzeugen dar.

Da es sich bei Innendämmsystemen um eine spezielle Art von Vorsatzkonstruktionen handelt, können die hierzu vorliegenden Ergebnisse gleichfalls einen wichtigen Beitrag zum Forschungsvorhaben liefern. Umfangreiche Untersuchungen an Vorsatzschalen wurden im Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführt [10, 16 - 25], wobei insbesondere auch zur Schall-Längsleitung - dem für Innendämmsysteme zentralen Thema - Erfahrungen vorhanden sind. Leider sind die Ergebnisse für Vorsatzschalen zu unspezifisch, um sie in vollem Umfang für die Untersuchungen an zum großen Teil vollflächig verklebten Innendämmsystemen zu nutzen. Sie können als Ausgangspunkt für die Modellbildung dienen und wichtige Anregungen zur Formulierung der Berechnungsformeln beisteuern, müssen aber durch zusätzliche messtechnische und rechnerische Untersuchungen ergänzt werden.

Neben den bereits vorhandenen Forschungsergebnissen stellen auch die praktischen Kenntnisse und Erfahrungen der beteiligten Industriepartner einen wichtigen Beitrag zu dem Vorhaben dar. Sie beziehen sich vor allem auf Aufbau und Montage der untersuchten Dämmsysteme und sind deshalb insbesondere für die erforderlichen experimentellen Untersuchungen wesentlich. Der experimentelle Teil des Vorhabens umfasst Messungen der Schallübertragung in Längs- und Durchgangsrichtung der Außenwand und muss in einem speziellen bauakustischen Prüfstand durchgeführt werden, der die hierzu notwendigen Randbedingungen aufweist. Der im Fraunhofer-Institut für Bauphysik vorhandene Diagonalprüfstand (siehe Bild 5) besteht aus vier Räumen, die durch elastische Fugen voneinander getrennt sind. Dies ermöglicht Messungen unter realitätsnahen baulichen Randbedingungen und erlaubt es außerdem zumindest teilweise, die verschiedenen Schallübertragungspfade messtechnisch voneinander zu trennen.

Einige der im Innenbereich eingesetzten Systeme sind als akustisch kritisch einzustufen, so dass gegenüber dem ungedämmten Ausgangszustand eine Verschlechterung des baulichen Schallschutzes zu erwarten ist. Die dadurch hervorgerufenen Schallschutzmängel beeinträchtigen das Wohlbefinden der betroffenen Bewohner und verursachen zusätzliche Sanierungskosten, so dass Planungssicherheit und Bauqualität nicht mehr im erforderlichen Umfang gewährleistet sind. Als bevorzugter Anwendungsbereich von Innendämmsystemen ist der Altbau hierbei besonders gefährdet, zumal viele ältere Gebäude ohnehin bereits ein niedriges Schallschutzniveau aufweisen.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Planungswerkzeuge beseitigen die bestehenden Probleme, indem sie es Architekten und Planern ermöglichen, die akustischen Auswirkungen von Dämm-Maßnahmen in ihre Planung einzubeziehen. Bei der Außendämmung mit Wärmedämm-Verbundsystemen werden derartige Planungswerkzeuge bereits seit längerem intensiv genutzt und tragen wesentlich zur Verbesserung des baulichen Schallschutzes bei. Das Forschungsvorhaben kann daher einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Planungsfehlern und zur Sicherstellung einer nachhaltigen Bauweise leisten.

Dabei beschränken sich die Untersuchungen und alle dargestellten Messergebnisse auf die Akustik. Andere Bauphysikalische Eigenschaften der Innendämmsysteme werden nicht berücksichtigt.

2 Grundlagen

2.1 Akustische Grundlagen: Schallübertragung, Messverfahren und Begriffe

Im baulichen Schallschutz wird zwischen verschiedenen Mechanismen bei der Schallübertragung unterschieden. Die Unterschiede liegen in der Anregung, Ausbreitung und Wirkung der Geräusche.

Luftschallübertragung

Wird in einem Raum Schall z.B. durch einen Lautsprecher erzeugt, wird diese Schallenergie durch die begrenzenden Bauteile (Wände, Decken) vom sogenannten „Senderraum“ in benachbarte „Empfangsräume“ teilweise übertragen (transmittiert). Die frequenzabhängige Luftschallübertragung zwischen Räumen kann nach Norm – DIN EN ISO 10140-2 [27] im Labor oder DIN EN ISO 16283-1 [31] am Bau messtechnisch ermittelt werden.

Körperschallübertragung (bei Luftschallanregung)

Wird in einem Raum Schall zum Beispiel durch einen Lautsprecher erzeugt, regt ein Teil dieser Schallenergie die den sogenannten „Senderraum“ begrenzenden Bauteile zu Schwingungen an. Diese Schwingungen übertragen sich auf angrenzende (flankierende) Bauteile und breiten sich so im Baukörper aus. Alle schwingenden Bauteile strahlen nun ihrerseits wiederum Schallenergie in benachbarte „Empfangsräume“ ab. Der Anteil an dieser Art der Schallübertragung, der durch die direkte Trennwand zwischen zwei Räumen übertragen wird, wird der Luftschallübertragung (Transmission) zugeschrieben. Der Anteil, der über flankierende Bauteile vom Sende- in den Empfangsraum übertragen wird, wird Schall-Längsleitung genannt. In einer realen Bausituation lassen sich die Übertragungspfade meist nicht mehr trennen. Im Labor kann man die einzelnen Schallübertragungspfade messtechnisch untersuchen. Durch gezieltes Unterdrücken der anderen Übertragungspfade bestimmt allein der zu untersuchende Übertragungspfad den gemessenen Schalldruckpegel im Empfangsraum. Die verschiedenen Schallübertragungspfade werden in der Bauakustischen Planung oft getrennt betrachtet und zur Umrechnung auf eine reale Bausituation addiert. Die Kennzeichnung der Schallübertragungspfade gemäß [9] ist in Bild 1 dargestellt. Dabei steht der Buchstabe D (d) für direkt und F (f) für flankierend, jeweils der große Buchstabe für die Anregung und der kleine Buchstabe für die Abstrahlung der Bauteile.

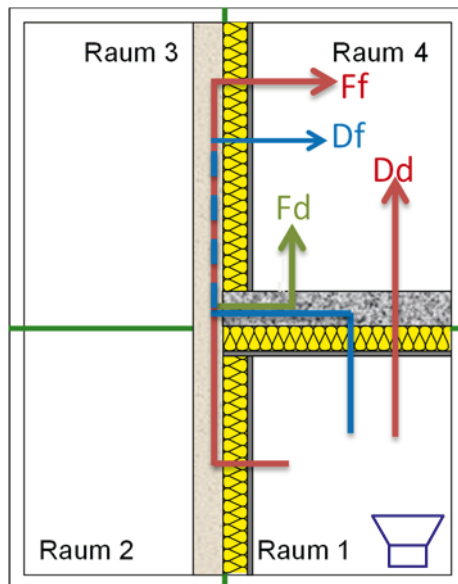


Bild 1:
Schallübertragungspfade nach [9].

(Bau-) Schalldämm-Maß R (bzw. R') [dB]

Das Schalldämm-Maß R in [dB] eines Bauteils (z.B. einer Wand) zwischen zwei Räumen ist der Widerstand den das Bauteil der Transmission von Schallenergie entgegenbringt. Man unterscheidet zwischen Schalldämm-Maß R eines Bauteils gemessen im Labor und Bau-Schalldämm-Maß R' zwischen zwei Räumen im Gebäude. Er wird in einer logarithmischen Skala in Dezibel [dB] angegeben.

$$R = L_S - L_E + 10 \lg \left(\frac{S}{A} \right) \quad (1)$$

mit: L_S = Luftschallpegel im Senderraum [dB]

L_E = Luftschallpegel im Empfangsraum [dB]

S = Fläche des Bauteils [m²]

A = Äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum [dB]

Norm-Flanken(schall)pegeldifferenz $D_{n,f}$ [dB]

Die Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f}$ in [dB] ist äquivalent zum Schalldämm-Maß jedoch wenn die Übertragung der Schallenergie ausschließlich über einen festgelegten flankierenden Pfad anstelle des direkten Trennbauteils stattfindet.

$$D_{n,f} = L_S - L_E + 10 \lg \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (2)$$

mit: L_S = Luftschallpegel im Senderraum [dB]

L_E = Luftschallpegel im Empfangsraum [dB]

A_0 = genormte Bezugsfläche [10 m²]

A = Äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum [dB]

Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche T [s] und A [m²]

Als Nachhallzeit T in [s] wird die Zeit bezeichnet, in der der Schalldruckpegel in einem Raum nach Abschalten der Schallquelle um 60 dB abnimmt. Messtechnisch wird aus praktischen Gründen in der Regel T20 bzw. T30 ermittelt, also die Zeit in der der Pegel um 20 dB beziehungsweise 30 dB abnimmt und dann auf 60 dB hochgerechnet. Moderne Schallpegelanalysatoren können die Nachhallzeit direkt messen.

Aus der Nachhallzeit wird die äquivalente Absorptionsfläche A in [m²] im Raum nach folgender Beziehung ermittelt:

$$A = 0,16 \left(\frac{V}{T} \right) \quad (3)$$

mit: V = Volumen des Raumes [m³]

T = Nachhallzeit im Raum [s]

Fremdgeräuschkorrektur

Um sicherzustellen, dass keine Störgeräusche das Messergebnis beeinflussen wird der Schalldruckpegel bei abgeschalteter Anregung, der sogenannte Störpegel oder das Fremdgeräusch, mit dem Messsignal verglichen. Ist die Differenz zwischen beiden < 15 dB und > 6 dB wird eine Korrektur nach Beziehung (4) durchgeführt. Ist die Differenz < 6 dB ist die Korrektur auf 1,3 dB festgelegt.

$$L = 10 \lg (10^{L_E} - 10^{L_S}) \quad (4)$$

mit: L = der korrigierte Schalldruckpegel [dB]

L_E = der Pegel im Empfangsraum bei eingeschalteter Anregung [dB]

L_S = der Fremdgeräuschpegel bei abgeschalteter Anregung [dB]

dynamische Steifigkeit s' [MN/m³]

Die dynamische Steifigkeit s' = [MN/m³] ist das Verhältnis zwischen einer dynamisch einwirkenden Kraft zur daraus resultierenden Auslenkung. Mit Ihrer Hilfe lässt sich z.B. die Resonanz von Masse-Feder-Masse-Systemen ermitteln. Sie kann nach DIN EN 29052-1 [32] im Labor ermittelt werden, jedoch ist das Messverfahren für Estrichdämmstoffe entwickelt worden und kann bei anderen Anwendungen zu Abweichungen im Ergebnis führen.

Masse-Feder-Masse-System und Resonanzfrequenz f₀ [Hz]

Um die akustische Wirkung von Vorsatzschalen zu ermitteln, können diese als schwingendes Masse-Feder-Masse-System betrachtet werden. Jedes solche System hat eine Resonanzfrequenz f₀ in [Hz]. Die Resonanzfrequenz lässt sich theoretisch ermitteln, sofern die schwingende Masse (z.B. die flächenbezogene Masse des Putzes m'' in [kg/m²]) und die dynamische Steifigkeit (Äquivalent für die Federwirkung) der Dämmschicht s' in [MN/m³] bekannt sind. Der Zusammenhang ergibt sich näherungsweise aus folgender Beziehung (siehe auch [9]):

$$f_0 = 160 \cdot \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_w} + \frac{1}{m''_p} \right)} \quad (5)$$

mit: s' = dynamische Steifigkeit der Feder [MN/m³]
 m''_w = flächenbezogene Masse der Wand [kg/m²]
 m''_p = flächenbezogene Masse der Innenverkleidung (z.B. Putz) der Vorsatzschale [kg/m²]

Wobei für das Ergebnis m''_w also die flächenbezogene Masse der Wand vernachlässigbar wird, sofern sie deutlich größer ist, als m''_p .

In Bild 2 ist die Verbesserung der Schalldämmung ΔR [dB] über der Frequenz dargestellt. Der farblich markierte Kurvenverlauf ist in vier Frequenzbereiche relativ zur Resonanzfrequenz eingeteilt. Unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Verbesserung nahezu gleich null. Im Resonanzbereich ist die Verbesserung negativ und oberhalb der Resonanzfrequenz steigt die Verbesserung steil an, bis sie weit oberhalb in eine Sättigung übergeht.

Vier typische Frequenzbereiche:

- 1) $f \ll f_0$ $\Delta R = 0$
- 2) $f \cong f_0$ **Resonanzbereich, $\Delta R < 0$**
- 3) $f > f_0$ $\Delta R > 0$, Anstieg mit 12 dB/Oktave
- 4) $f > f_k$ **Sättigung oder Rückgang von ΔR**

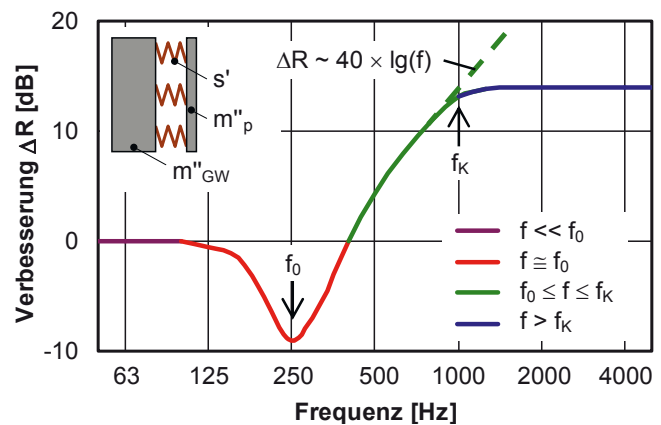


Bild 2:

Akustische Wirkung von Masse-Feder-Masse Systemen.

Koinzidenz-Grenzfrequenz f_k [Hz]

Die Grenzfrequenz f_k in [Hz] ist die Frequenz, bei der die Wellenlänge des Luftschalls mit der Länge der Biegequelle des Bauteils übereinstimmt. In diesem Frequenzbereich kommt es zu einer Spuranpassung, welche zu einer besonders effektiven Luftschallabstrahlung des Bauteils führt. Sie berechnet sich zu:

$$f_k = \frac{c^2}{1,82 \cdot h \cdot c_L} \quad (6)$$

mit f_k = Koinzidenz-Grenzfrequenz [Hz]
 c = Schallgeschwindigkeit in der Umgebungsluft [m/s]
 h = Dicke des Bauteils [m]
 c_L = Longitudinalwellengeschwindigkeit (Beton \approx 2000) [m/s]

Abgestrahlter Luftschallpegel von einer schwingenden Wand

Ist die frequenzabhängige Biegeschwingschnelle einer Wand bekannt, kann daraus der abgestrahlte Luftschallpegel in einen durch die Wand begrenzten Raum berechnet werden:

$$L_p = L_v + 10 \cdot \lg(S) + 10 \cdot \lg(\sigma) + 10 \cdot \lg\left(\frac{4}{A}\right) \quad (7)$$

mit L_p = resultierender Luftschalldruckpegel im Empfangsraum [dB]

L_v = gemessener Schnellepegel senkrecht zur Wand bezogen auf
 $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s [dB]

S = abstrahlende Bauteilfläche [m²]

A = Äquivalente Absorptionsfläche
im Empfangsraum in Terzen [dB]

σ = Abstrahlgrad der Wand

2.2 Einzahlangaben

2.2.1 Schalldämm-Maß und Norm-Flankenpegeldifferenz

Die in 2.1.1 beschriebenen Schallübertragungen sind frequenzabhängig. In der Bauakustik ist es üblich in Terzen von 100 Hz bis 3150 Hz zu messen. Der erweiterte Frequenzbereich beinhaltet zusätzlich die Frequenzen von 50 Hz bis 80 Hz und 4000 bis 5000 Hz, ist aber in Deutschland nicht rechtlich eingeführt. Ein bauakustisches Messergebnis besteht somit aus 16 einzelnen Terzwerten und ist daher für die Verwendung in der Bauplanung und Nachweisführung zu unhandlich. Aus diesem Grund werden aus den Frequenzspektren Einzahlangaben gebildet, welche es ermöglichen, Bausysteme untereinander oder mit Anforderungen auf einfache Weise zu vergleichen. Für die Luftschalldämmung wird üblicherweise das bewertete Schalldämm-Maß R_w und für die Schall-Längsleitung die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ nach DIN EN ISO 717-1 [30] gebildet. Dabei wird das durch Messung ermittelte Frequenzspektrum mit einer in der Norm festgelegten Bezugskurve verglichen. Nach einer definierten Anpassung des Niveaus der Bezugskurve an die Messkurve wird der Einzahlwert bei der Frequenz von 500 Hz abgelesen. Der Wert wird zum Vergleich von Bauteilen untereinander auf eine Nachkommastelle und zum Vergleich mit Anforderungen ganzzahlig abgerundet.

Um die akustische Wirkung einer zusätzlichen Dämmschicht auf einer Wand zu beschreiben wird jeweils das Schalldämm-Maß der Wand ohne Dämmung und mit Dämmung gemessen. Daraus lässt sich gemäß [26] die Verbesserung der Schalldämmung ΔR_w ermitteln. Nach demselben Verfahren kann auch die Verbesserung der Schall-Längsleitung $\Delta D_{n,f,w}$ ermittelt werden, auch wenn darauf in der Norm nicht explizit Bezug genommen wird. Negative Vorzeichen deuten insgesamt auf eine Verschlechterung hin, man spricht aber trotzdem von einer (negativen) Verbesserung.

2.2.2 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 Außenbauteilen, die Verkehrslärm ausgesetzt sind, liefert es keine adäquate Beschreibung der Schallschutzwirkung und korreliert nicht mit dem menschlichen Höreindruck.
- Der Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz, der für den baulichen Schallschutz in der Praxis eine wichtige Rolle spielt, wird bei der Bewertung 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 C_{tr} (für Verkehrslärm) 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.

Neben dem Frequenzbereich von 100 bis 3150 Hz können die Spektrum-Anpassungswerte – sofern entsprechende Messwerte für die Schalldämmung vorliegen - optional auch für die Bereiche von 100 bis 5000 Hz, 50 bis 3150 Hz und 50 bis 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 bis 3150 Hz gemeint.

Die Spektrum-Anpassungswerte können sowohl für das bewertete Schalldämm-Maß, als auch für die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz in gleicher Weise ermittelt werden. Für die Verbesserung des Schalldämm-Maßes und der Norm-Flankenpegeldifferenz wird jeweils zuerst die Summe aus Einzahlwert + Spektrum-Anpassungswert der jeweiligen Messung gebildet und dann von dieser Summe das Ergebnis der Referenzmessung abgezogen.

$$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) = (R_w + C_{tr,50-5000}) - (R_w + C_{tr,50-5000})_{\text{Referenz}} \quad (8)$$

Bei diesem Forschungsvorhaben wird neben den Einzahlwerten zusätzlich besonders auf die Ergebnisse mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ für tief-frequente Geräusche eingegangen. Hierzu existieren in Deutschland keine Mindestanforderungen. Trotzdem werden diese Geräusche in der Praxis von betroffenen üblicherweise als besonders lästig eingestuft.

3 Vorgehensweise

Die Durchführung des Forschungsvorhabens erfolgt in mehreren Schritten, die im Folgenden in kurzer Form beschrieben werden:

- Am Beginn steht eine Literatur- und Produktrecherche über Innendämmsysteme. Sie dient dazu, einen Überblick über die marktüblichen Konstruktionen zu gewinnen und geeignete Beispiele für die Untersuchungen auszuwählen. Des Weiteren werden vorhandene Ergebnisse zusammengetragen, aufbereitet und durch systematische Auswertung für das geplante Vorhaben nutzbar gemacht.
- Die bauliche Ausführung der beiden für die messtechnischen Untersuchungen benötigten Wände (leichte Außenwand mit angrenzender Wohnungstrennwand) wird von der Forschungsstelle und den beteiligten Industriepartnern gemeinsam festgelegt. Die Außenwand hat eine Länge von 11 m, die Trennwand ist ca. 4 m lang. Der Einbau in den Prüfstand (Höhe ca. 3 m) erfolgt durch die Industriepartner.
- Nach Fertigstellung der Wände und Auswahl der zu untersuchenden Dämmsysteme wird mit dem akustischen Messprogramm begonnen. Zunächst werden die schalldämmenden Eigenschaften der Ausgangssituation bestehend aus ungedämmter Außenwand und Wohnungstrennwand gemessen. Die Ergebnisse dienen als Referenz. Im Anschluss werden der Reihe nach die Dämmsysteme an der Außenwand montiert. Für jedes System werden bis zu drei akustische Messungen (Schalldurchgang und Schall-Längsleitung bei halb- und vollflächiger Verlegung gemäß Bild 3) durchgeführt.
- Die Ergebnisse des Messprogramms werden in einer Datenbank zusammengefasst, in die auch die Ergebnisse der Literaturrecherche einfließen. Hierzu müssen die gemessenen Terzspektren in Einzahlangaben (bewertetes Schalldämm-Maß, bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz und Spektrum-Anpassungswerte) umgerechnet werden. Maßgebend für die schallschutztechnische Bewertung ist die gegenüber der Referenz (ungedämmte Außenwand) eingetretene Veränderung, die sich je nach Aufbau als Verbesserung oder Verschlechterung äußern kann.
- Ausgehend von den Erfahrungen bei Vorsatzkonstruktionen werden Berechnungsverfahren für die Schall-Längsleitung und den Schalldurchgang von Außenwänden mit innenseitiger Wärmedämmung entwickelt. Die Planungswerkzeuge werden so konzipiert, dass sie sich durch Änderung der Berechnungsparameter an unterschiedliche bauliche Situationen anpassen lassen. Die Kalibrierung und Validierung der Werkzeuge erfolgt durch Abgleich mit den Messwerten aus der Datenbank. Außerdem ist es erforderlich, die für die einzelnen Schallübertragungspfade berechneten Werte in den vorhandenen akustischen Gesamtkontext einzuordnen (die Schallübertragung in Bauten erfolgt über zahlreiche unterschiedliche Pfade, die nach

EN 12354-1 [9] zu einem Gesamtwert - dem Bau-Schalldämm-Maß R'_w - verrechnet werden).

- Im letzten Schritt des Forschungsvorhabens werden die Untersuchungsergebnisse in einem Bericht zusammengefasst und durch Veröffentlichungen und Vorträge in der Fachwelt (vor allem bei Architekten und Planern) bekannt gemacht. Die Verwendung entsprechend gestalteter Tabellen und Grafiken in dem hierzu erarbeiteten Leitfaden ermöglicht es, die entwickelten Planungswerkzeuge unmittelbar - d. h. ohne zusätzliche eigene Berechnungen - anzuwenden. Der Transfer in die bauakustische Normung erfolgt über die Mitarbeit im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

3.1 Messungen

Im Zentrum des Forschungsvorhabens steht das Messprogramm an einer repräsentativen Auswahl verschiedener, in der Praxis häufig verwendeter Innendämmsysteme. Die Messungen erfolgen in einem bauakustischen Prüfstand, in den - als exemplarische Nachbildung einer typischen Bausituation aus dem Altbaubereich - vor Beginn der Untersuchungen eine Längs- und eine Querwand (sogenannter T-Stoß) eingebaut werden.

Auf die Details zum Prüfstand und der Versuchsaufbauten wird in Abschnitt 5 näher eingegangen.

Zur Bestimmung der resultierenden Schalldämmung werden an der Außenwand nacheinander die verschiedenen Innendämmsysteme montiert. Für jedes der Systeme werden bis zu drei Messungen unter den in Bild 3 dargestellten Randbedingungen durchgeführt und mit der Wandkonfiguration ohne Innendämmung verglichen:

Die Außenwandwand wird aus Porenbeton-Plansteinen errichtet und repräsentiert die Außenwand des Gebäudes. Die Querwand dient als Wohnungstrennwand und weist deshalb eine größere flächenbezogene Masse auf. Hier ist eine Wand aus Kalk-Sandsteinen vorgesehen. Der direkte Schalldurchgang durch die Wohnungstrennwand wird zusätzlich durch eine Vorsatzschale im Senderaum reduziert.

Um den Beitrag des Übertragungspfad F_d (blauer Pfeil) zu bestimmen, wird zusätzlich der Körperschallpegel auf der Rückseite der Querwand (in Raum 4) gemessen.

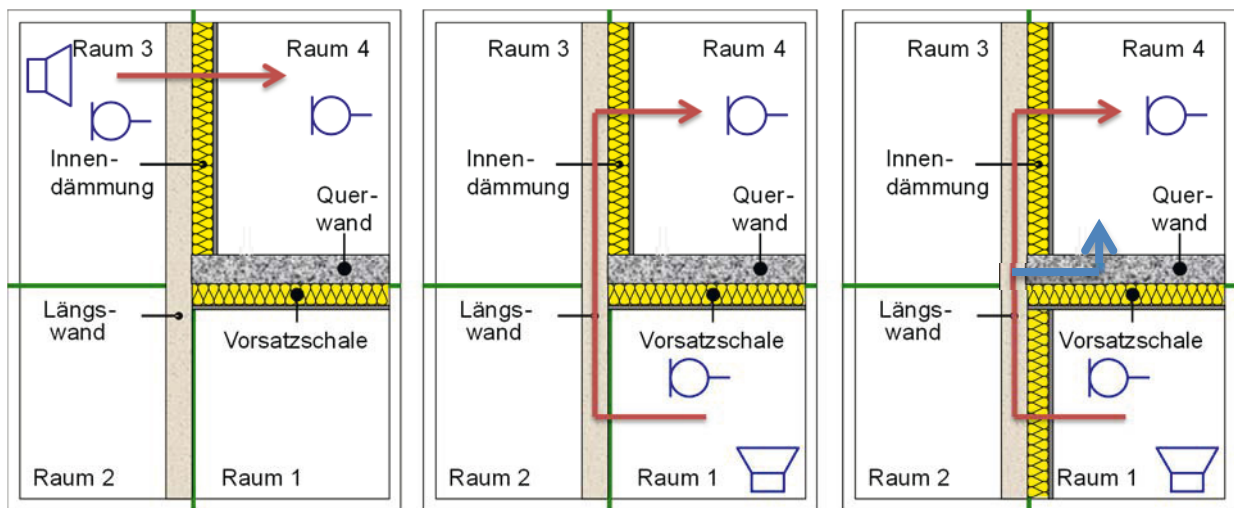


Bild 3:

Messaufbau zur akustischen Untersuchung von Innendämmsystemen (Draufsicht schematisch). 1. Schallübertragung in Durchgangsrichtung (links); 2. Schall-Längsleitung bei halbflächiger Innendämmung (Mitte); 3. Schall-Längsleitung bei vollflächiger Innendämmung (rechts).

Durch Vergleich mit dem ungedämmtem Zustand lässt sich der akustische Einfluss der untersuchten Dämmsysteme auf die Schallübertragung in Längs- und Durchgangsrichtung bestimmen (Schritt 4)

3.2 Planungswerkzeuge

In Schritt 5 des Forschungsvorhabens werden die Ergebnisse der oben beschriebenen Messreihe zur Entwicklung akustischer Planungswerkzeuge genutzt. Den Ausgangspunkt hierzu bilden vorhandene Erfahrungen an Vorsatzkonstruktionen, auf deren Grundlage akustische Berechnungsformeln abgeleitet werden, die variable Parameter zur Berücksichtigung der technischen Eigenschaften der betrachteten Dämmsysteme und der baulichen Randbedingungen (wie z. B. Schalldämm-Maß der Außenwand) enthalten. Diese Parameter werden so angepasst, dass sich die bestmögliche Übereinstimmung mit den im Prüfstand ermittelten Messergebnissen ergibt.

Bei der Entwicklung der Planungswerkzeuge wird neben dem Schalldurchgang von außen nach innen auch die Schall-Längsleitung entlang der Außenwand betrachtet. Wie in der Bauakustik üblich, erfolgen die Berechnungen auf der Grundlage von Einzahlangaben (bewertetes Schalldämm-Maß, bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz und falls möglich der Spektrum-Anpassungswerte).

Die Planungswerkzeuge werden so konzipiert, dass sie sich durch Änderung der Berechnungsparameter an unterschiedliche bauliche Situationen anpassen lassen. Die Kalibrierung und Validierung der Werkzeuge erfolgt durch Abgleich mit den Messwerten aus der Datenbank. Außerdem ist es erforderlich, die für die einzelnen Schallübertragungswege berechneten Werte in den vorhandenen

akustischen Gesamtkontext einzuordnen (die Schallübertragung in Bauten erfolgt über zahlreiche unterschiedliche Wege, die nach DIN EN ISO 12354-1 [9] zu einem Gesamtwert - dem Bau-Schalldämm-Maß R'_w - verrechnet werden).

Leichtbaukonstruktionen und Gebäude in gemischter Bauweise werden in dem Vorhaben nicht betrachtet, das sie sich akustisch äußerst kompliziert verhalten.

4 Literaturrecherche

Zu Beginn des Projekts wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Sie dient dazu sich einen Überblick über marktübliche Konstruktionen zu gewinnen und geeignete Beispiele für die Untersuchungen auszuwählen. Des Weiteren werden vorhandene Ergebnisse zusammengetragen, aufbereitet und durch systematische Auswertung für das geplante Vorhaben nutzbar gemacht.

4.1 Verbesserung der Schalldämmung von Wänden durch Vorsatzschalen

Es liegen umfangreiche Untersuchungen zur akustischen Wirkung von Vorsatzschalen vor. Aus den Literaturangaben [8], [10], sowie [16 bis 25] ergibt sich folgende Zusammenfassung:

Die akustische Wirkung von Vorsatzschalen wird hauptsächlich von der Resonanzfrequenz und der Masse bestimmt. Je niedriger die Resonanzfrequenz und je leichter die Wand, desto größer ist die erreichbare Verbesserung. Um die Resonanzfrequenz abzusenken, kann man die Masse der Vorsatzschale erhöhen oder den Abstand zwischen Vorsatzschale und Grundwand vergrößern. Bei Verbundsystemen sind Dämmschichten mit niedriger dynamischer Steifigkeit zu bevorzugen. Aufgrund ihrer Funktionsweise als Masse-Feder-System wird die Schalldämmung von Vorsatzschalen durch Körperschallbrücken erheblich beeinträchtigt. Eine starre Verbindung zwischen Vorsatzschale und Grundwand ist deshalb zu vermeiden. Freistehende Vorsatzschalen erreichen die höchste Verbesserung der Schalldämmung.

Die Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung liegt mit 2,5 dB im üblichen bauakustischen Rahmen. Bei der Schall-Längsdämmung weisen Vorsatzschalen im Vergleich zur Durchgangsdämmung

durchweg eine höhere akustische Wirkung auf. Erfolgt die Schallübertragung über zwei Vorsatzschalen (z. B. auf Vorder- und Rückseite einer Trennwand), so ist für die Schale mit der geringeren Dämmung nur der halbe ΔR_w -Wert anzusetzen. Durch Flankenübertragung am Bau wird die Wirkung von Vorsatzschalen erheblich herabgesetzt. Dies ist bei der Planung von Schallschutzmaßnahmen entsprechend zu berücksichtigen.

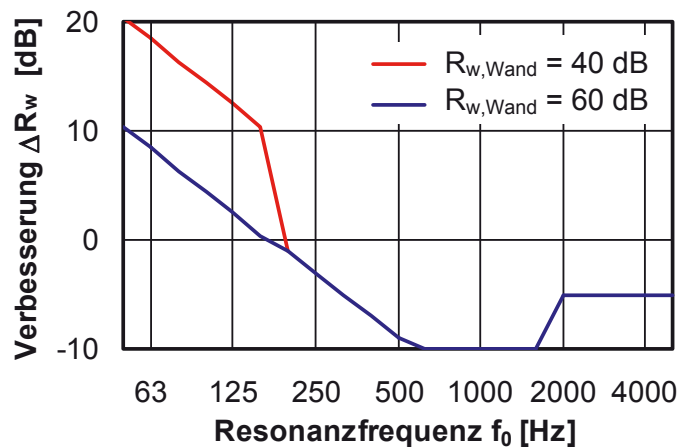


Bild 4:

Verbesserung des bewerteten schalldämm-Maßes von Wänden durch Vorsatzschalen in Abhängigkeit von der Lage der Resonanzfrequenz, grafische Darstellung der Tabellen aus [9].

Die Berechnung von ΔR_w nach dem in DIN EN 12354-1 [9] ursprünglich beschriebenen Verfahren liefert im Mittel ca. 4 dB zu niedrige Werte. Das Verfahren wurde aufgrund der Ergebnisse aus einem Forschungsvorhaben am IBP inzwischen angepasst, ein sicheres Prognoseverfahren für die Schall-Längsleitung von Verbundsystemen existiert allerdings noch nicht und lässt sich aus den Untersuchungen nicht ableiten.

4.2 Verbesserung der Schalldämmung von Wänden durch WDVS

Da sich WDVS und Innendämmsysteme vom Aufbau her sehr ähnlich sind, sollte sich auch ihre akustische Wirkung nicht sehr unterscheiden. Auch für WDVS liegen umfangreiche Untersuchungen zur akustischen Wirkung vor. Diese beschränken sich jedoch auf die Schalldämmung von Wänden. Aus den Literaturangaben aus [1 bis 7] ergibt sich folgende Zusammenfassung:

Die Anbringung von WDVS beeinflusst in starkem Maße das akustische Verhalten der Trägerwand, wobei sowohl eine Erhöhung als auch eine Verminderung der Schalldämmung erfolgen kann. Wichtigste Beurteilungsgröße ist die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, ΔR_w , die auch für den Schallschutznachweis nach DIN 4109 heranzuziehen ist. Neben der Resonanzfrequenz und dem Schalldämm-Maß der Trägerwand hängt ΔR_w - wenn auch in geringerem Maße - von dem Anteil der Klebefläche, der Befestigung mit Dübeln sowie bei Mineralfaser-Dämmstoffen außerdem vom Strömungswiderstand ab. Die höchsten Verbesserungen (bis etwa 20 dB) werden bei niedriger Resonanzfrequenz und geringer Schalldämmung der Trägerwand erreicht, während für WDVS mit hoher Resonanzfrequenz bei Anbringung an schweren Wänden Verschlechterungen von bis zu 10 dB auftreten können.

Bei den genannten Werten ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes - obgleich in den geltenden Normen verankert - kein geeignete Größe zur Beurteilung der Schallschutzwirkung von

Außenbauteilen darstellt. Dies liegt vor allem daran, dass die tieffrequenten Geräuschanteile, die in Außenlärm in starkem Maße vorhanden sind, bei der Berechnung von ΔR_w unberücksichtigt bleiben. Für eine realistische Bewertung der Schallschutzwirkung sollte deshalb im Normalfall statt ΔR_w die Größe $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ herangezogen werden, in der $C_{tr,50-5000}$ den Spektrum-Anpassungswert für Verkehrsgeräusche nach DIN EN ISO 717-1 bezeichnet. Der Wertebereich für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ reicht von etwa -7 dB bis +3 dB, so dass die akustischen Verbesserungen erheblich geringer ausfallen und die Unterschiede zwischen verschiedenartigen WDVS (vor allem im Hinblick auf den Einfluss der Resonanzfrequenz) weitgehend nivelliert werden.

Da sich die Schallschutzanforderungen auf das resultierende Schalldämm-Maß aller Außenbauteile beziehen, müssen auch die in der Außenwand vorhandenen Fenster in die akustischen Betrachtungen einbezogen werden. Obgleich Fenster oft nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der Außenfläche einnehmen, bilden sie wegen ihrer vergleichsweise geringen Schalldämmung vielfach den maßgebenden Übertragungsweg. Der akustische Einfluss von WDVS ist in diesem Fall gering, da er sich auf die eigentliche Wandfläche beschränkt. Akustische Kriterien spielen dann bei der Planung und Auslegung von WDVS nur noch eine untergeordnete Rolle.

Soweit WDVS maßgeblich zum baulichen Schallschutz beitragen, lässt sich die Verbesserung der Schalldämmung mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit mit dem in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Prognoseverfahren bestimmen. Das Verfahren erlaubt es, sowohl ΔR_w als auch $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ zu berechnen, so dass eine realistische und praxisingerechte Beurteilung der Schallschutzwirkung erfolgen kann.

In Bezug auf die Schall-Längsleitung von Innendämmsystemen lässt sich aus den Literaturangaben keine verlässliche Aussage treffen, da

1. WDVS auf der Außenseite montiert und daher bei der Schall-Längsleitung zwischen benachbarten Wohnräumen nicht direkt angeregt werden,
2. sich außenseitig montierte Dämmsysteme kaum auf die Schalllängsleitung von Außenwänden auswirken [2],
3. WDVS meist wesentlich höhere Dämmstoffdicken und damit eine andere Federwirkung haben.

5 Versuchsaufbau

5.1 Prüfstand

Die Versuche wurden in einem speziellen bauakustischen Wandprüfstand, Bild 5 zeigt dessen Grundriss, durchgeführt. Der Prüfstand besteht aus vier zusammenhängenden Räumen und wird auch als Diagonalprüfstand bezeichnet. Die Außenwände der Räume sind aus 22,5 cm dickem Stahlbeton mit einem Flächengewicht von $m'' \geq 450 \text{ kg/m}^2$ und durch Trennfugen (im Bild grün) voneinander entkoppelt.

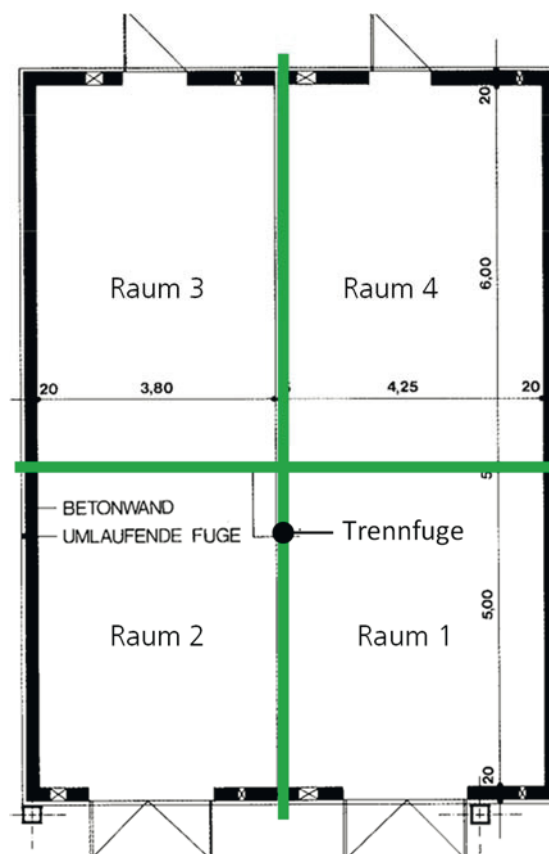


Bild 5:
Horizontalschnitt des Diagonalprüfstands – Draufsicht.

Der leere Diagonalprüfstand, wie er in Bild 5 dargestellt ist, besteht im Prinzip aus einem großen Raum. Die bis zu vier eingezeichneten Räume entstehen erst durch den Einbau einer konkreten Prüfsituation wie hier z.B. bestehend aus einer Längs- und Querwand. In diesem Fall bleiben die Räume 2 und 3 allerdings voneinander ungetrennt und bilden quasi die Außenseite einer gedachten Gebäudesituation, getrennt vom Gebäudeinneren (Räume 1 und 4) durch die Außenwand (Längswand). Diese Außenseite, also die Räume 2 und 3, stellen dabei den Senderaum und Raum 4 den Empfangsraum für die Messungen der Schalldämmung dar. Die Räume 1 und 4 sind wiederum getrennt durch die Wohnungstrennwand (Querwand) und bilden den Send- und Empfangsraum für die Untersuchung der Schall-Längsleitung. Die Räume des Prüfstands sind zwar

durch Trennfugen voneinander entkoppelt, diese Entkopplung wird allerdings durch die Anordnung der massiven Referenzwände überbrückt. Diese Tatsache lässt sich für den Massivbau nicht gänzlich vermeiden, da durch den kraftschlüssigen T-Stoß immer mindestens eine Fuge durch eine Wand überbrückt wird. Die Anordnung der Wände wird so angepasst, dass mögliche Einflüsse auf das Messergebnis minimal sind. Lediglich die Anordnung der Wohnungstrennwand im Raum 4 führt dazu, dass die Schallübertragungspfade D_d und F_d nicht durch Trennfugen entkoppelt sind. Der Weg D_d wird durch die zusätzliche Vorsatzschale im Senderraum unterbunden. Der Pfad F_d wird durch eine zusätzliche Körperschallmessung auf der Wohnungstrennwand im Empfangsraum berücksichtigt. So kann der Einfluss der über den Pfad übertragenen Schallenergie auf das Messergebnis ermittelt und bei Bedarf später rechnerisch korrigiert werden.

5.2 Wandkonfiguration (Referenz)

Da in dem Forschungsvorhaben eine möglichst praxisgerechte Konfiguration aus innen gedämmter Außenwand und Wohnungstrennwand untersucht werden soll, musste zunächst die Wandkonfiguration festgelegt und montiert werden. Die Festlegung geschah in Abstimmung mit den Projektpartnern aus der Industrie.

Außenwand (Längswand):

Die Außenwand bestand aus Porenbeton Plansteinen Typ: „Planblock NF-GT PP 6-0,65 (0,18)“. Die Abmessungen eines Steins betragen (L x B x H) 49,9 x 24,0 x 24,9 cm. Das Gewicht eines trockenen Steins betrug 25 kg. Die Steine waren mit dafür geeignetem Dünnbettmörtel an den Lagerfugen verklebt. Die Stoßfugen waren unverklebt stumpf gestoßen. Daraus ergibt sich eine Flächenbezogene Masse der unverputzten, trockenen Außenwand von $m''_{LW} \approx 200 \text{ kg/m}^2$. Die Fugen zum Prüfstand wurden mit Quellschutt aufgefüllt.

Wohnungstrennwand (Querwand):

Die Wohnungstrennwand bestand aus Kalk-Sand-Verbundsteinen Typ: KS-R(P) 20-2,0 7DF (200). Die Abmessungen eines Steins betragen (L x B x H) 24,8 x 20,0 x 24,8 cm. Das Gewicht eines trockenen Steins betrug 25 kg. Die Steine waren mit dafür geeignetem Dünnbettmörtel an den Lagerfugen verklebt. Die Stoßfugen waren unverklebt stumpf gestoßen. Daraus ergibt sich eine Flächenbezogene Masse der unverputzten, trockenen Außenwand von $m''_{LW} \approx 400 \text{ kg/m}^2$. Die Fugen zum Prüfstand wurden mit Quellschutt aufgefüllt.

Die Wohnungstrennwand war zusätzlich an der Außenwand mit Mauerwerksankern (zwei pro Lage) befestigt (siehe Bild 6 links). Die Anzahl der Mauerwerksanker überstieg die in der Praxis übliche um das Dreifache, da einem Abreißen des kraftschlüssigen Verbunds beider Wände durch die häufige (De-)Montage von Dämmsystemen vorgebeugt werden sollte.



Bild 6:
Fotos von der Montage der Längs- und Querwand im Prüfstand.



Bild 7:
Fotos der Wände beim Auftragen des Putzes.

Nach einer Trocknungszeit von ca. einer Woche wurden die Wände verputzt. Auf der Außenseite wurden ca. 15 mm Kalk-Zementputz aufgetragen, auf der

Innenseite je ca. 15 mm Kalk-Gips-Putz (siehe Bild 7). Die flächenbezogenen Massen der Wände erhöhen sich dadurch um ca. 40 kg/m².

Da in dem Forschungsvorhaben insbesondere die Schall-Längsleitung untersucht werden soll, muss sichergestellt werden können, dass der maßgebliche Anteil der Schallenergie, die während einer Messung vom Senderraum (Raum 1) in den Empfangsraum (Raum 4) übertragen wird den Pfad „Ff“ gemäß Bild 1, also den Weg über die innen gedämmte Außenwand nimmt. Darum wurde die Wohnungstrennwand zusätzlich mit einer freistehenden Vorsatzschale akustisch ertüchtigt. Die Vorsatzschale bestand aus einem 100 mm Metallständer im CW-Profil mit einer dreifachen Beplankung aus speziellen Gipsbauplatten mit einem Flächengewicht von je 12,5 kg/m². Die 100 mm breiten Metallständer wurden mit einem Abstand von 50 mm zur Wohnungstrennwand im Senderraum aufgestellt und der dadurch entstehende 150 mm breite Hohlraum wurde mit 100 mm dicken Mineralwolle Trennwandplatten bedämpt (siehe Bild 8).



Bild 8:
Foto der Vorsatzschale während der Montage.

Daraus ergibt sich nach (5) eine Resonanzfrequenz von 22,5 Hz sodass davon ausgegangen werden kann, dass ab ca. 30 Hz eine Verbesserung der Schalldämmung der Wohnungstrennwand durch die Vorsatzschale zu erwarten ist.

Im Anschluss wurde das bewertete Schalldämm-Maß der Außenwand von Raum 3 nach Raum 4 gemäß Bild 3 links, sowie die Norm-Flankenpegeldifferenz von Raum 1 nach Raum 4 gemäß Bild 3 rechts beides jedoch ohne Innendämmung gemessen. Die Werte dienen als Referenz für die Verbesserung durch die im Folgenden aufgetragenen Innendämmsysteme. Zu dem Zeitpunkt, unmittelbar vor der Montage des ersten Innendämmsystems, betrug das bewertete Schalldämm-Maß der Wand $R_w = 49,7 \pm 1,2$ dB, die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz betrug $D_{n,f,w} = 55,7 \pm 1,2$ dB. Da sich die Referenzwerte mit der Zeit ändern können, z.B. durch veränderliche Ausgleichsfeuchte im Mauerwerk und durch nachträgliches Glätten der Putzschicht im Anschluss an eine Demontage eines Dämmsystems, wurde zu jedem System zeitnah eine eigene Referenzmessung durchgeführt.

5.3 Auswahl der Innendämmsysteme und technische Daten

Die Auswahl der Innendämmsysteme geschah in Absprache mit den Beteiligten Industriepartnern während des ersten Arbeitstreffens und wurde im Protokoll festgehalten. Die einzelnen Systeme sind alle auf dem Markt verfügbar. Da Vorschlagsmodelle für freistehende Vorsatzschalen vorhanden sind, konzentrieren sich die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben auf Verbundsysteme (Systeme, die direkt an der Außenwand befestigt werden). Die getroffene Auswahl an Systemen steht stellvertretend für verschiedene Produktgruppen mit vergleichbaren Eigenschaften. Aus diesem Grund werden keine Markennamen verwendet, sondern anonymisierte, beschreibende Bezeichnungen eingeführt, welche Rückschlüsse auf die eingesetzten Materialien und Dämmdicken zulassen, aber nicht auf konkrete Produkte der einzelnen Hersteller.

Die Innendämmsysteme lassen sich in folgende Produktgruppen einteilen:

1. Verbundsysteme als Kombisysteme aus Expandiertem Polystyrol (EPS) und Gipsplatten (GP) dazu zählen: alle EPS(A); EPS(B)
(die Buchstaben A und B beziehen sich auf Produkte unterschiedlicher Hersteller)
2. Verbundsysteme als Kombisysteme aus Fasern (MW) und Gipsplatten (GP): alle MW(A); MW(B)
3. Verbundsysteme aus verputzten Fasersysteme: HWMP
4. Verbundsysteme aus verputzten mineralischen Dämmplatten: Perlite; Mineraldämmplatte auf Porenbetonbasis (PB)

In diese vier Gruppen lassen sich erfahrungsgemäß die weitaus meisten am Markt verfügbaren, nicht freistehenden Innendämmsysteme einteilen.

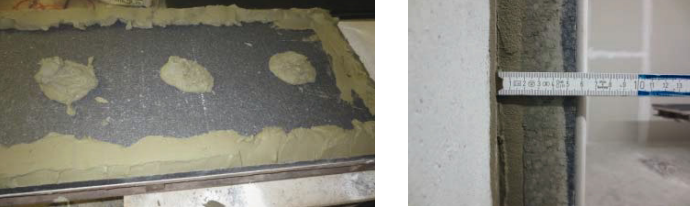
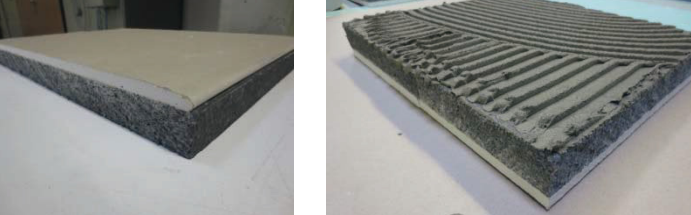
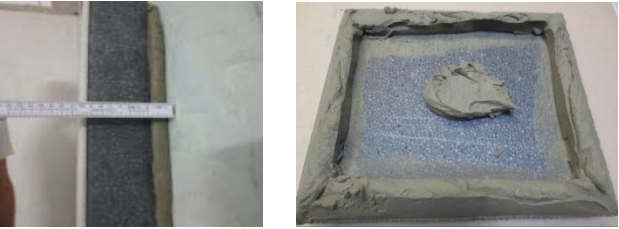



Die gesamte Auswahl der untersuchten Systeme zeigt Tabelle 1.

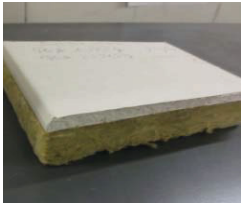






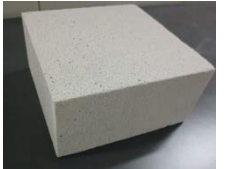







In Tabelle 2 ist zu jedem System zusätzlich ein Foto abgebildet.

Tabelle 1:
 Produktauswahl der Innendämmsysteme, Bezeichnung und technische Daten.

Bezeichnung	Dämmstoffart Dämmstoff- dicke d in [mm]	Wärmedurch- lass-Widerstand $\triangleq d/\lambda$ in [m ² K / W]	Deckschichtart Deckschicht- dicke t in [mm]	Befestigungs- art
EPS(A) 40 PW	EPS 032 40	1,25	Gipsplatte 12,5	Systemklebe- mörtel Punkt-Wulst
EPS(A) 40 Z	EPS 032 40	1,25	Gipsplatte 12,5	Systemklebe- mörtel Zahnkelle
EPS(A) 80 PW	EPS 032 80	2,50	Gipsplatte 12,5	Systemklebe- mörtel Punkt-Wulst
EPS(B) 30 PW	EPS 035 30	0,86	Gipsplatte 12,5	Systemklebe- mörtel Punktweise
EPS(B) 30 Z	EPS 035 30	0,86	Gipsplatte 12,5	Systemklebe- mörtel Zahnkelle
MW(A) 40	Mineralwolle 040 40	1,0	Gipsplatte 12,5	Klebemörtel Punkt-Wulst
MW(B) 30	Mineralwolle 040 30	0,75	Gipsplatte 12,5	Klebemörtel Punktweise
Perlite 50	expandierte Perlite 50	1,11	Systemputz- mörtel mit Armierung 15	Systemklebe- mörtel Zahnkelle
Perlite 100	expandierte Perlite 100	2,22	Systemputz- mörtel mit Armierung 15	Systemklebe- mörtel Zahnkelle
PB 100	Mineraleämm- platte auf Porenbetonbasis 100	2,38	Systemputz- mörtel mit Armierung 15	Systemklebe- mörtel Zahnkelle
HWMP 50 D	Holzwohle-Mehr- schichtplatte 50	1,18	Systemputz- mörtel mit Armierung 15	nur Dübel
HWMP 50 DZ	Holzwohle-Mehr- schichtplatte 50	1,18	Systemputz- mörtel mit Armierung 15	Dübel und Klebemörtel Zahnkelle
HWMP 100 D	Holzwohle-Mehr- schichtplatte 100	2,36	Normalputz- mörtel mit Armierung 15	nur Dübel

Tabelle 2:
Fotos der Dämmsysteme mit Bezeichnung.

Bezeichnung	Fotos
EPS(A) 40 PW	
EPS(A) 40 Z	
EPS(A) 80 PW	
EPS(B) 30 PW	
EPS(B) 30 Z	
MW(A) 40	

<p>MW(B) 30</p>		
<p>Perlite 50</p>		
<p>Perlite 100</p>	 	
<p>PB 100</p>		
<p>HWMP 50 D</p>		
<p>HWMP 50 DZ</p>		
<p>HWMP 100 D</p>		

5.3.1 Kombisysteme aus EPS und GP

Zu den Kombisystemen mit EPS zählen EPS(A) 40 PW; EPS(B) 30 PW; EPS(A) 80 PW. Sie wurden jeweils mit Klebemörtel aufgetragen im Punkt-Wulstverfahren montiert. Bei den Systemen EPS(A) 40 Z und EPS(B) 30 Z wurde der Klebemörtel mit Hilfe einer 10 mm Zahnkelle aufgetragen. Abschließend wurde jeweils nach einer Trocknungszeit von 1-2 Tagen die Fugen der Gipsplattenstöße mit Gipspachtel verspachtelt und die Fugen zum Prüfstand mit Acryl abgedichtet. Die Messungen erfolgten nach einer erneuten Trocknungszeit von 1-2 Tagen. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

5.3.2 Kombisysteme aus Fasern und Gipsplatten

Zu den Kombisystemen aus Fasern zählen MW(A) 40; MW(B) 30. Beide Systeme wurden nur im Punkt-Wulst-Verfahren montiert. Abschließend wurde jeweils nach einer Trocknungszeit von 1-2 Tagen die Fugen der Gipsplattenstöße mit Gipspachtel verspachtelt und die Fugen zum Prüfstand mit Acryl abgedichtet. Die Messungen erfolgten nach einer erneuten Trocknungszeit von 1-2 Tagen. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

5.3.3 Verputzte Fasersysteme

Zu den verputzten Fasersystemen zählen HWMP 50 D; HWMP 50 DZ; und HWMP 100 D. HWMP 50 D und DZ bestehen aus denselben Dämmstoffplatten. Sie wurden einmal nur mit Hilfe von Tellerdübeln befestigt und einmal mit Tellerdübeln und Klebemörtel aufgetragen mit einer 10 mm Zahnkelle. Die Anzahl der Dübel betrug ca. 7 Stück pro Platte, wobei jeweils der Dübel an den Plattenstößen mehrere Platten überlappend befestigte. Anschließend wurden sie mit ca. 15 mm dickem, systemspezifischen Innenputz verputzt. Die Trocknungszeit vor der Messung betrug jeweils 3 bis 5 Tage. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

5.3.4 Verputzte mineralische Dämmplatten

Zu den verputzten Mineraldämmplatten zählen die Systeme Perlite 50; Perlite 100 und PB 100. Sie wurden mit Hilfe von Klebemörtel aufgetragen mit einer 10 mm Zahnkelle befestigt. Anschließend wurden sie mit ca. 15 mm dickem, systemspezifischen Innenputz verputzt. Die Trocknungszeit vor der Messung betrug jeweils 3 bis 5 Tage. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

6 Versuchsdurchführung

Die Messungen werden in einem bauakustischen Wandprüfstand (siehe Abschnitt 5.1 - Bild 5) durchgeführt. Der Prüfstand und die verwendete Ausrüstung entsprechen den Anforderungen aus DIN EN ISO 10140-4 bis 5 [28, 29] und DIN EN ISO 10848-1 [34]. Dabei wurde jeweils im Senderaum mit Hilfe eines bewegten Lautsprechers in Dodekaeder-Form angeregt. Das Anregesignal war rosa Rauschen. Der Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum wurde mit einer Messausrüstung der Genauigkeitsklasse 1 ermittelt. Dabei wurden die Messmikrofone auf geneigten Kreisbahnen bewegt. Nach der Montage der zu untersuchenden Dämmsysteme wurde jeweils zunächst die Nachhallzeit in den Räumen 1; 3 und 4 im Frequenzbereich von 100 bis 500 Hz auf 1-2 s eingestellt. Danach wurden folgende Messungen der Reihe nach durchgeführt:

1. Schalldämmung nach DIN EN ISO 10140-2 [27],
2. Schalllängsleitung nach DIN EN ISO 10848-1 [34],
3. Körperschallpegel auf der Querwand im Empfangsraum bei Anregung durch Luftschall in Raum 1

Die Messungen wurden für alle Systeme gleich durchgeführt. Zusätzlich wurden in regelmäßigen Abständen kurz vor oder nach dem Wechsel eines Systemherstellers die gleichen Messungen an der Rohwand ohne Innendämmsystem wiederholt, damit zu jedem System eine zeitnahe Referenzmessung vorlag.

6.1 Messung der Schalldämmung

Die Schalldämmung der Wände wurde nach den Vorgaben aus DIN EN ISO 10140-2 gemessen. Dabei diente Raum 3 gemäß Bild 3 als Senderaum und Raum 4 als Empfangsraum. Als Prüffläche wurde die Trennwandfläche der Außenwand zwischen Raum 3 und Raum 4 angesetzt. Sie betrug $S = 17,23 \text{ m}^2$. Die Wahl des Empfangsraumes hatte zum einen praktische Gründe, da dieser Raum auch gleichzeitig der Empfangsraum für die Messung der Schall-Längsleitung war. Zum anderen ist aber auch die Schallabstrahlung des massiven Anteils der Querwand geringer als die der Vorsatzschale, was dazu führt, dass sich bei einer Messung in Raum 1 ein Nebenweg im Messergebnis bemerkbar würde. Darum ist die gemessene Schalldämmung von Raum 2 nach 1 geringer, als von Raum 3 nach 4. Der Nachweis für diese These wird im folgenden Abschnitt 7.1 gezeigt.

6.2 Messung der Schall-Längsleitung

Die Schall-Längsleitung der Wände wurde nach den Vorgaben aus [34] gemessen. Dabei diente Raum 1 gemäß Bild 3 als Senderaum und Raum 4 als Empfangsraum. Als Prüffläche wurde die Bezugsfläche für die Norm-Flankenpegeldifferenz gemäß [34] angesetzt. Sie betrug $S = 10 \text{ m}^2$.

6.3 Messung der Körperschallpegel auf der Querwand

Die angegebenen Messergebnisse beziehen sich alle auf Messungen im Labor. Gemäß DIN EN ISO 10140-4 und DIN EN ISO 10848-2 werden diese Messungen normalerweise in bauakustischen Prüfständen mit Unterdrückung aller Schall-Nebenwege durchgeführt. Es ergibt sich im vorliegenden Fall jedoch aufgrund der vorhandenen Bausituation, dass bei der Messung der Norm-Flankenpegeldifferenz nicht alle Nebenwege ausgeschlossen werden können, da der massive T-Stoß zwischen Wohnungstrennwand und Außenwand zwangsläufig eine Trennfuge des Prüfstands überbrückt. Um trotzdem die Möglichkeit zu haben, den Einfluss des sich daraus ergebenden Schall-Nebenwegs F_d aus dem Messergebnis bei Bedarf herauszurechnen wurden zusätzlich Körperschallmessungen auf der Querwand im Empfangsraum durchgeführt. Mit Kenntnis der mittleren Körperschallschnelle auf der Querwand im Empfangsraum kann teilweise die Schallabstrahlung der Wand in den Empfangsraum berechnet werden. Das Abstrahlgrad σ von schwingenden Wänden ist oberhalb der Koinzidenz-Grenzfrequenz gleich 1. Die Koinzidenzfrequenz der massiven Kalksandsteinwand berechnet sich nach (6) zu ca. $f_k = 160$ Hz. Das bedeutet, dass zumindest für alle Messwerte von 160 Hz aufwärts der Einfluss des Nebenwegs F_d mit ausreichender Genauigkeit berechnet und falls nötig, die Messwerte korrigiert werden können.

7 Ergänzende Untersuchungen

Während der Durchführung der Messreihe sind zusätzliche Fragen bezüglich verschiedener Einflüsse auf die Messergebnisse z.B. aufgrund der Art der Befestigung und der Randeinspannung, sowie dem Unterschied zwischen einseitiger und beidseitiger Montage aufgetaucht. Da diese Fragen außerplanmäßig durchgeführt wurden, aber von zentraler Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse sind, werden sie in diesem Abschnitt vorab erläutert.

7.1 Wahl des Empfangsraumes für die Messungen der Schalldämmung

Der Messaufbau gemäß Bild 3 lässt die Messung der Durchgangsdämmung der Außenwand sowohl mit Raum 1 als auch mit Raum 4 als Empfangsraum zu. Neben dem direkten Schalldurchgang durch die Außenwand in den Empfangsraum wird die Wohnungstrennwand dabei von der Außenwand zusätzlich zu Schwingungen angeregt. Es wird vermutet, dass die Schallabstrahlung des massiven Anteils der Querwand geringer ist, als die der Vorsatzschale, was dazu führt, dass sich bei einer Messung in Raum 1 ein Nebenweg im Messergebnis bemerkbar würde. Darum ist die gemessene Schalldämmung von Raum 2 nach 1 geringer, als von Raum 3 nach 4. Um sicherzugehen wurden an einem der ersten untersuchten Systeme beide Varianten gemessen und verglichen. Die Ergebnisse sind in Bild 9 dargestellt.

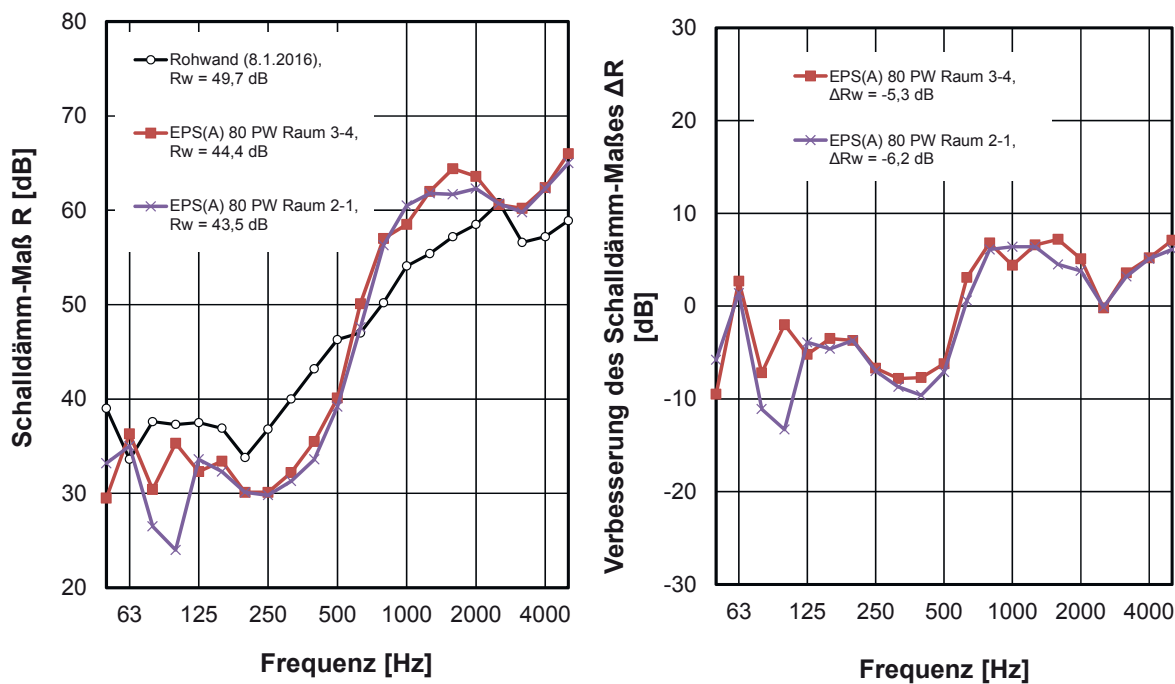


Bild 9:

Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) desselben Dämmsystems bei Schallübertragung zwischen den Räumen 1 und 2 bzw. 3 und 4.

Es zeigt sich, dass wie erwartet, die Schalldämmung von Raum 3 nach Raum 4 gemessen im Mittel etwas höher ausfällt als zwischen Raum 2 und Raum 1, was

vermutlich auf die höhere Übertragung von Schwingungen von der Außenwand auf die freistehende Vorsatzschale zurückzuführen ist.

7.2 Art und Weise der Befestigung

Gemäß der Theorie aus Abschnitt 2.1 lassen sich Innendämmsysteme akustisch als Masse-Feder-Masse System beschreiben. Aus [1-7] ist bekannt, dass die Art und Weise der Befestigung einen Einfluss sowohl auf die schwingende Masse, als auch auf die Federwirkung haben kann. Bei WDVS scheint dieser Einfluss allerdings nicht besonders groß zu sein (ca. ± 2 dB auf den jeweiligen Einzahlwert). Im Laufe der Messreihe hat sich ergeben, dass der Einfluss für die Innendämmsysteme teilweise größer sein kann. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Innendämmsysteme trotz gleicher Materialien jedoch teilweise wesentlich dünner sind (30 bis 100 mm statt 100 bis 240 mm). Dieser Effekt wurde zu Beginn des Projekts unterschätzt. Aus diesem Grund wurde nach der Feststellung von Unregelmäßigkeiten am Ende der Messreihe eine ergänzende Zusatzuntersuchung durchgeführt.

Die Wahl der Befestigung sollte gemäß der Überlegungen aus dem Forschungsantrag möglichst praxisgerecht erfolgen. Da jeder Hersteller bezüglich seines Dämmsystems konkrete Vorgaben zur Befestigung macht, damit auf Baustellen in der Praxis keine Bau-Mängel durch mögliche Unklarheiten entstehen, sind unterschiedliche Einflüsse auf die Messergebnisse zu erwarten. Um diese Einflüsse im Vorfeld zu untersuchen, wurden verschiedene Systeme gleicher Produktgruppen jeweils einmal nach Empfehlung des Herstellers in verschiedenen Ausführungen des Punkt-Wulst-Verfahrens bzw. befestigt und einmal vergleichbar untereinander mit einer 10 mm Zahnkelle. Dann wurden jeweils das Schall-dämm-Maß und die Norm-Flankenpegeldifferenz ermittelt.

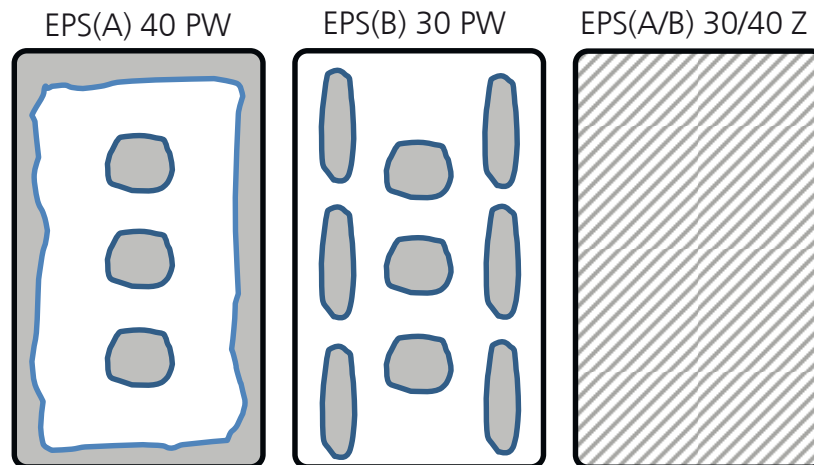


Bild 10:
Schematische Darstellung der Verklebung.

Bild 10 zeigt schematisch die Unterschiede beim Auftragen des Klebemörtels. Dazu gehörige Fotos von der Montage enthält Tabelle 2.

Folgende Systeme gemäß Tabelle 1 wurden für die Vergleichsmessungen ausgewählt: EPS(A) 40 PW; EPS(A) 40 Z; EPS(B) 30 PW; EPS(B) 30 Z. Es wird erwartet, dass die Unterschiede in den Messkurven zwischen EPS(A) 40 und EPS(B) 30 lediglich in einer leicht verschobenen Resonanzfrequenz liegen (maximal eine Terz) da sich die technischen Eigenschaften der Materialien stark ähneln.

Jeder größere Unterschied im Messergebnis wäre damit der Art der Befestigung zuzuschreiben. Die Messergebnisse für das Schalldämm-Maß sind in Bild 11 und für die Norm-Flankenpegeldifferenz in Bild 12 grafisch dargestellt. Insbesondere aus dem jeweils rechten Diagramm, welches die Verbesserungsmaße darstellt, ist zu erkennen, dass bei den Punkt-Wulst Varianten nicht nur größere Unterschiede in der Gesamtwirkung (Einzahlwerte) auftreten, sondern sich darüber hinaus auch sehr breite, nicht gut definierte Resonanzbereiche ausbilden (rote und violette Kurve). Bei Verklebung mit Zahnkelle hingegen (türkise und orangene Kurve) zeigen sich wie erwartet eindeutige Resonanzfrequenzen bei 800 bzw. 1000 Hz und auch die Einzahlwerte liegen erwartungsgemäß für die an sich gleichen Systeme enger beieinander.

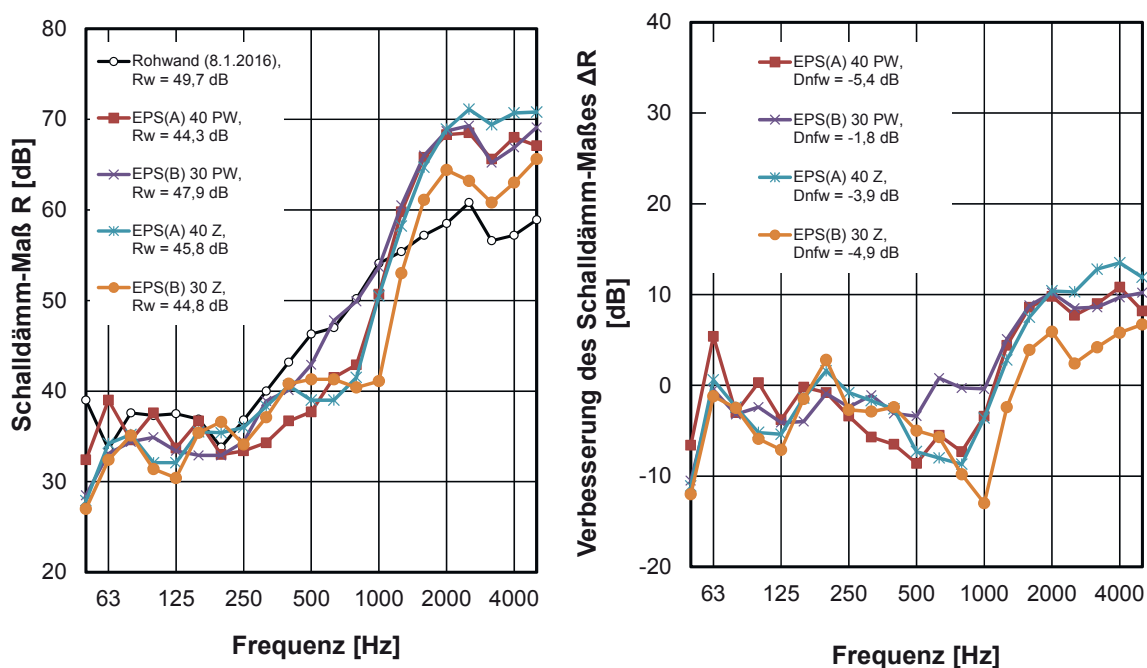


Bild 11:

Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) ähnlicher Dämmsysteme bei unterschiedlicher Art der Verklebung.

Da die auftretenden Unterschiede in der Lage der Resonanz bei den dünnen Systemen besonders auffällig sind, ist die Vermutung naheliegend, dass ein Zusammenhang mit der Menge des aufgetragenen Klebemörtels bzw. dem daraus resultierenden Lufthohlraum besteht. Dies bedeutet, dass davon auszugehen ist, dass bei Verwendung von dünnen Dämmschichtdicken und vergleichsweise großen Mengen Klebemörtel unvorhergesehene Effekte bei der Schalldämmung und Norm-Flankenpegeldifferenz auftreten können.

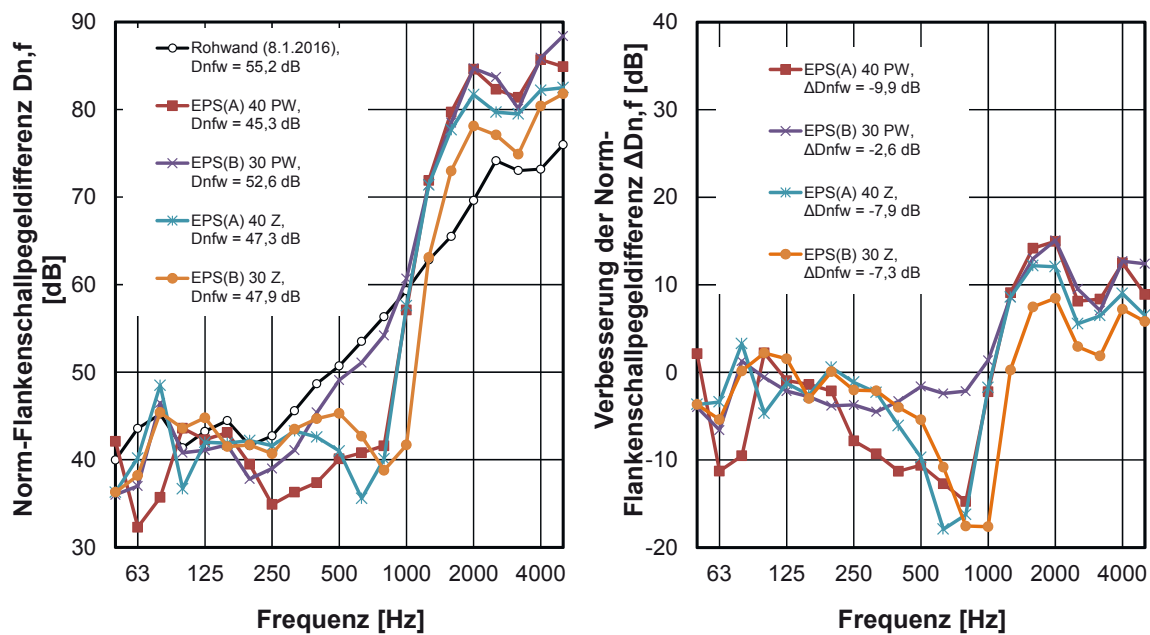


Bild 12:
 Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) ähnlicher Dämmsysteme bei unterschiedlicher Art der Verklebung.

7.3 Art und Weise der Randfugenabdichtung

Im Anschluss an eine Präsentation der Zwischenergebnisse auf den Projekttagen des BBSR in Bonn am 02. März 2016 wurde die Frage nach dem akustischen Einfluss der Randabdichtung der Innendämmsysteme zum Prüfstand gestellt. Der Einfluss wurde zunächst als höchstwahrscheinlich sehr geringfügig eingestuft. Um sicherzugehen wurde dennoch beschlossen, eine ergänzende Untersuchung durchzuführen. Um den Aufwand in einem angemessenen Rahmen zu halten und den Projektfortschritt dadurch nicht unnötig aufzuhalten, wurde die Untersuchung am auf die Projekttag folgende Messtermin mit dem aktuell eingebauten System durchgeführt. Es handelte sich um das System HWMP 50 DZ. Für die Untersuchungen wurden sämtliche Fugen zwischen dem Putz des Innendämmsystems und dem Prüfstand jeweils einmal voll verspachtelt, anschließend mit einem Trennschnitt komplett auf einer Breite von ca. 5 mm aufgetrennt und danach wieder mit Dichtmasse aus Acryl elastisch versiegelt. Dazwischen wurde jeweils eine Messung der Norm-Flankenpegeldifferenz durchgeführt.

Die zwei Zustände „erspachtelt“ und „getrennt“ stellen gewissermaßen die Extremsituationen dar, da es sich einmal um einen kraftschlüssigen Verbund und einmal um vollständige Trennung handelt. Der dritte Zustand „Acrylfuge“ sollte theoretisch, sofern es Einflüsse gibt, akustisch das Optimum bilden, da die Fuge in diesem Fall akustisch abgedichtet ist, der Anschluss aber über eine elastische Entkopplung verfügt. Die Messergebnisse sind in Bild 13 grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Randabdichtung mit ca. $\pm 0,3$ dB nicht größer als die allgemeine Wiederholgenauigkeit bei akustischen Labormessungen gemäß [35] von $u(D_{n,f,w}) = \pm 1,2$ dB ist.

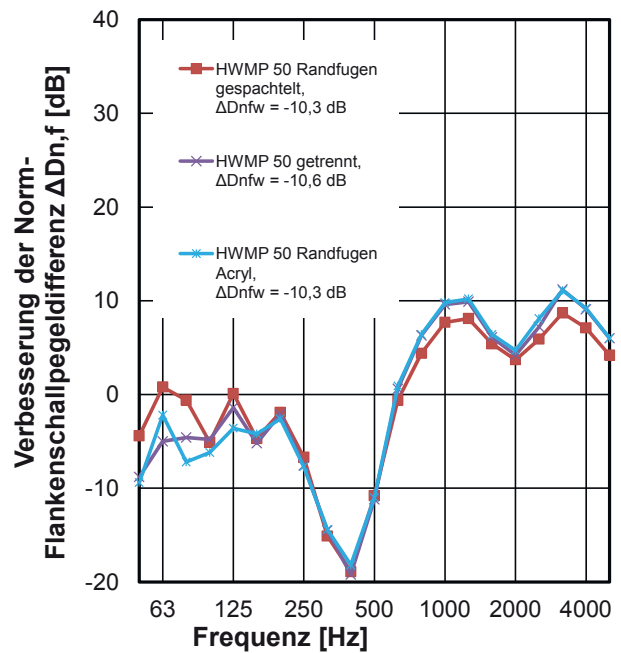
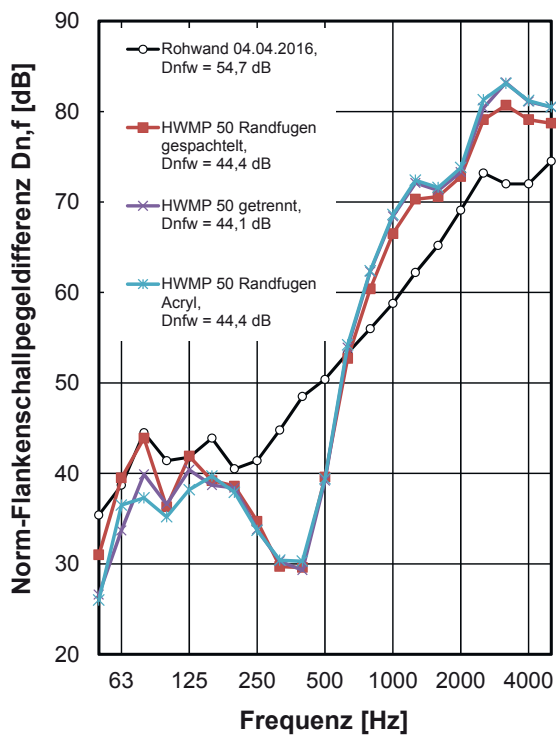


Bild 13:
Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) des Dämmsystems „HWMP 50 DZ“ bei unterschiedlicher Randabdichtung.

7.4 Vergleich einseitige und beidseitige Montage der Innendämmung

In der Praxis kann die beidseitige Montage als Normalfall angesehen werden. Dennoch kann es vorkommen, dass in zwei benachbarten Wohnungen, z.B. weil sie in unterschiedlichem Besitz sind, in einer Wohnung (Raum 4) eine Innendämmung montiert wird und in der anderen (Raum 1) nicht. Prinzipiell hat der Eigentümer von Raum 1 keinen Einfluss auf die Arbeiten in Raum 4. Gemäß DIN 4109-1 [33] gibt es definierte Anforderungen an die Mindest-Schalldämmung zwischen benachbarten Wohnräumen. Je nach Einfluss der einseitigen Montage auf die Schall-Längsleitung der Außenwand, kann es dazu kommen, dass bei o.g. Situation die Schalldämmung zwischen den benachbarten Wohnräumen nach Montage der Innendämmung in Raum 4 den Anforderungen nicht mehr genügt. Es läge ein Mangel vor. Auf die Schalldämmung in der Nachbarwohnung von bzw. nach außen hat die einseitige Montage prinzipiell keinen zusätzlichen Einfluss. In der Wohnung, in der eine Innendämmung montiert ist, gelten die Werte mit und in der anderen die Werte ohne Innendämmung.

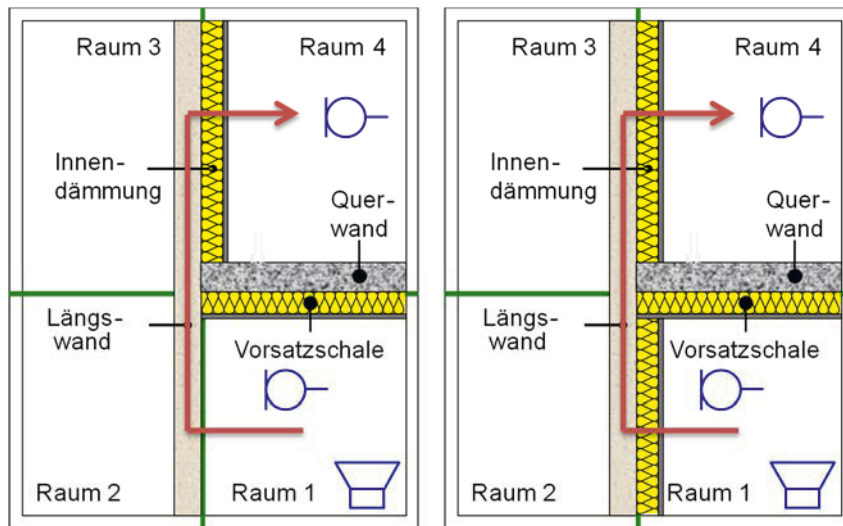


Bild 14:
Messaufbau Vergleich einseitige Montage (links) und beidseitige Montage (rechts).

Da sich die einseitige von der beidseitigen Montage des gleichen Dämmsystems nur durch die Fläche und den Raum (Sende- bzw. Empfangsraum) voneinander unterscheiden, nicht aber durch Material oder Art und Weise der Montage, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss systematisch und für alle untersuchten Systeme etwa gleich ist. Er wird daher, um Zeit und Kosten zu sparen, stellvertretend an zwei Systemen untersucht. Es handelt sich um folgende Systeme gemäß: EPS(A) 40 PW und HWMP 50. Der Messaufbau ist in Bild 14 dargestellt.

Zunächst wurde die Innendämmung nur im Empfangsraum (Raum 4) montiert und die Norm-Flankenpegeldifferenz gemessen. Danach wurde die gleiche Innendämmung auch im Senderraum (Raum 1) montiert und wieder die Norm-Flankenpegeldifferenz gemessen. Die Messergebnisse für EPS(A) 40 befinden sich in Bild 15 und die für HWMP 50 in Bild 16. Die rote Kurve zeigt jeweils die Messergebnisse bei einseitiger Montage. Die Ergebnisse für die beidseitige Montage sind violett dargestellt. Obwohl die Systeme an sich sehr unterschiedlich sind, ist in beiden Fällen zu erkennen, dass der Einfluss der einseitigen Montage nur in Raum 4 gegenüber der beidseitigen Montage in Raum 1 und 4 tatsächlich systematisch ist. Bei beidseitiger Dämmung ergibt sich gegenüber der einseitigen Variante in Übereinstimmung mit dem theoretisch erwarteten Verhalten teilweise in einem großen Teil des Frequenzbereichs eine um etwa Faktor 2 größere Verbesserung der Schalldämmung.

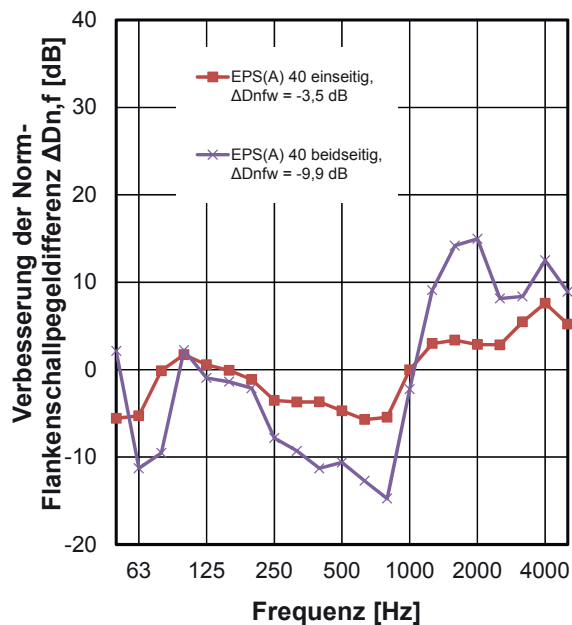
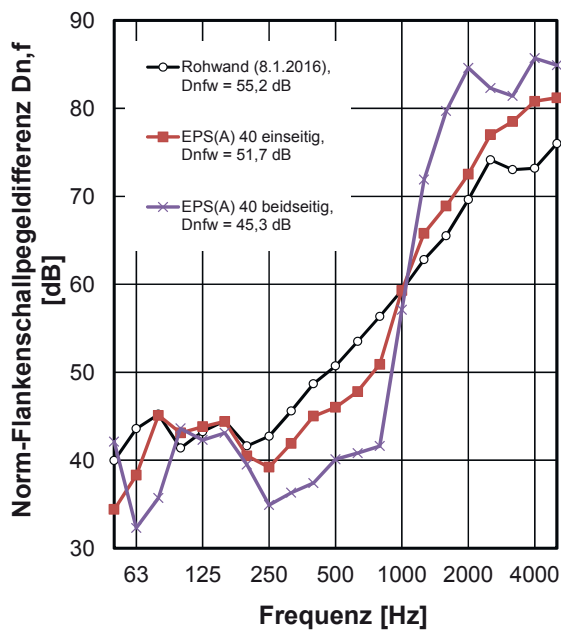


Bild 15:
Messergebnisse Vergleich einseitige und beidseitige Montage am Beispiel
EPS(A) 40.

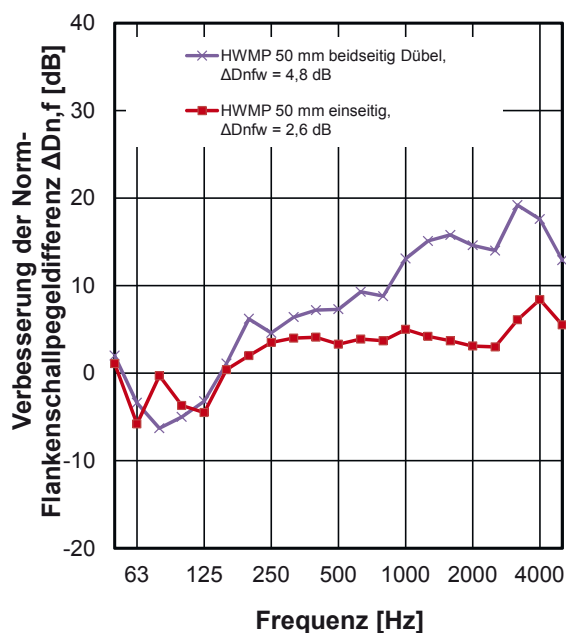
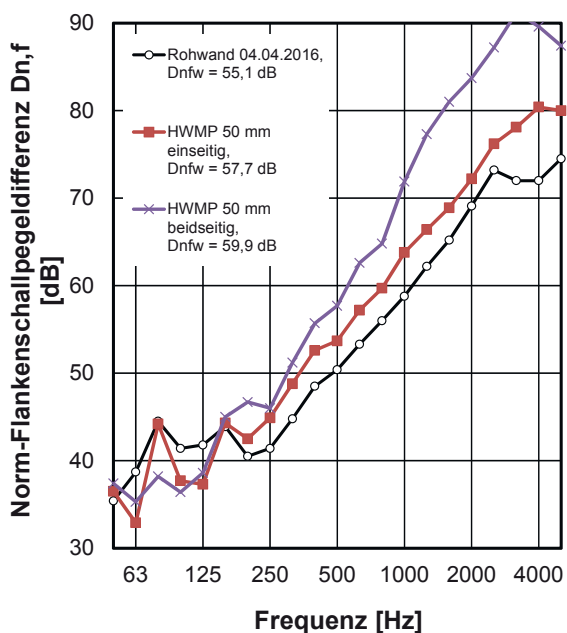


Bild 16:
Messergebnisse Vergleich einseitige und beidseitige Montage am Beispiel
HWMP 50.

Die Unterschiede in der Einzulangabe fallen gegenüber dem Faktor 1,5 aus der Theorie teilweise deutlich höher aus. Spätere Messungen zeigen allerdings, dass gerade die beiden für diese Untersuchung ausgewählten Systeme aufgrund der besonderen Befestigungsart größere Toleranzen beim Messergebnis aufweisen.

Die absolute Größe des Einflusses ist allerdings auch von der gewählten Befestigungsart abhängig. Bezogen auf den Einzahlwert $\Delta D_{n,f,w}$ ergibt sich für das Verhältnis zwischen einseitiger und beidseitiger Montage ein Wert zwischen 1,8 und 2,8.

8 Messergebnisse und Diskussion

In der eigentlichen Hauptuntersuchung wurden jeweils das Schalldämm-Maß, die Normflankenpegeldifferenz der ungedämmten Wand und die dazugehörigen Verbesserungen durch die verschiedenen Innendämmsysteme gemessen. Dabei waren die Innendämmsysteme alle beidseitig der Trennwand montiert. Zu diesen Werten sind in DIN 4109-1 [33] Mindestanforderungen zum Schutz vor unzumutbarem Lärm formuliert. Zusätzlich wurde bei jeder Messung auch der Körperschallpegel auf der Wohnungstrennwand im Empfangsraum gemessen, um den Einfluss des Flankenwegs F_d zu ermitteln. Das Schalldämm-Maß und die Norm-Flankenpegel-Differenz der ungedämmten Wand wurde über den zeitlichen Verlauf des Untersuchungsprogramms mehrfach gemessen, um für die Ermittlung der Verbesserungen jeweils ein zeitnahes Ergebnis zu haben. Zusätzlich zu den Einzahlwerte bewertetes Schalldämm-Maß und bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz wurden die Spektrum Anpassungswerte ermittelt. In der folgenden Ergebnisdarstellung und Diskussion wird neben den Einzahlwerten R_w und $D_{n,f,w}$ besonders auf die Ergebnisse mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ für tieffrequente Geräusche eingegangen. Hierzu existieren in Deutschland keine Mindestanforderungen. Trotzdem werden diese Geräusche in der Praxis von den Betroffenen üblicherweise als besonders lästig eingestuft.

8.1 Messergebnisse Schalldämm-Maß und Verbesserung

8.1.1 Referenzmessungen

In Bild 17 sind vier verschiedene Messergebnisse des Schalldämm-Maßes der Außenwand ohne Innendämmung über den Zeitraum der Messreihe verteilt dargestellt. Der Zeitraum reicht vom 8. Januar 2016, unmittelbar vor Beginn der Montage der Systeme EPS(A), bis zum 25. Juli 2016 unmittelbar nach der Demontage des letzten Dämmsystems PB 100. Die Unterschiede sind allgemein sehr gering und liegen im Bereich der Messtoleranz. Lediglich bei der letzten Messung am 25. Juli 2016 gibt es im Frequenzverlauf Abweichungen, die vermutlich auf die längere Trocknungszeit bei höheren Temperaturen zurückzuführen sind.

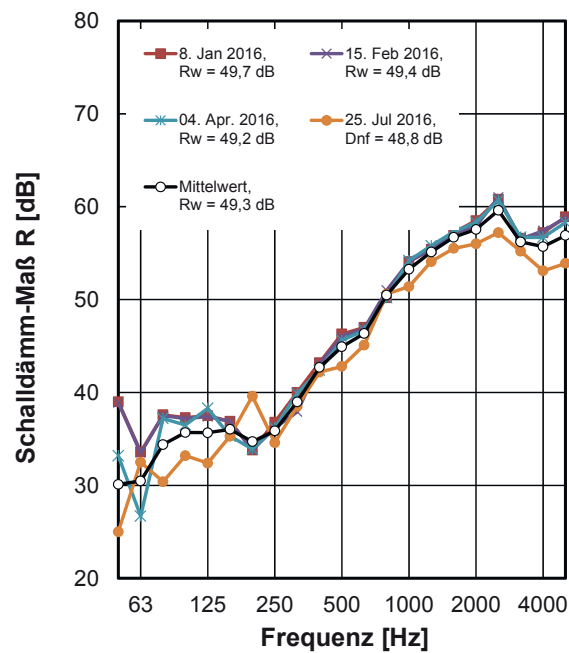


Bild 17:
Schalldämm-Maß der Rohwand ohne Innendämmung (Referenz) über den Zeitraum der Messreihe.

Die Einzahlwerte unterscheiden sich um max. ca. 1 dB (auch bei der Messung im Juli). Um die Auswertung möglichst übersichtlich zu gestalten, wird für die folgenden Diagramme und die Ermittlung der Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch die Innendämmsysteme der Mittelwert der vier Referenzmessungen verwendet.

8.1.2 Kombisysteme aus EPS und Gipsplatten (GP)

Zu den Kombisystemen mit EPS zählen EPS(A) 40 Z, EPS(B) 30 Z, EPS(A) 80 PW. Da bei den Systemen mit 30 bzw. 40 mm Dämmstoffdicke die Unsicherheiten bei der Verklebung im Punkt-Wulst-Verfahren besonders groß waren, werden im Folgenden nur die Ergebnisse mit Zahnkelle dargestellt. Vom System mit 80 mm Dämmstoffdicke liegt nur ein Messergebnis mit Punkt-Wulst-Verklebung vor. Bild 18 zeigt die Schalldämmung (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der Kombisysteme mit EPS und GP.

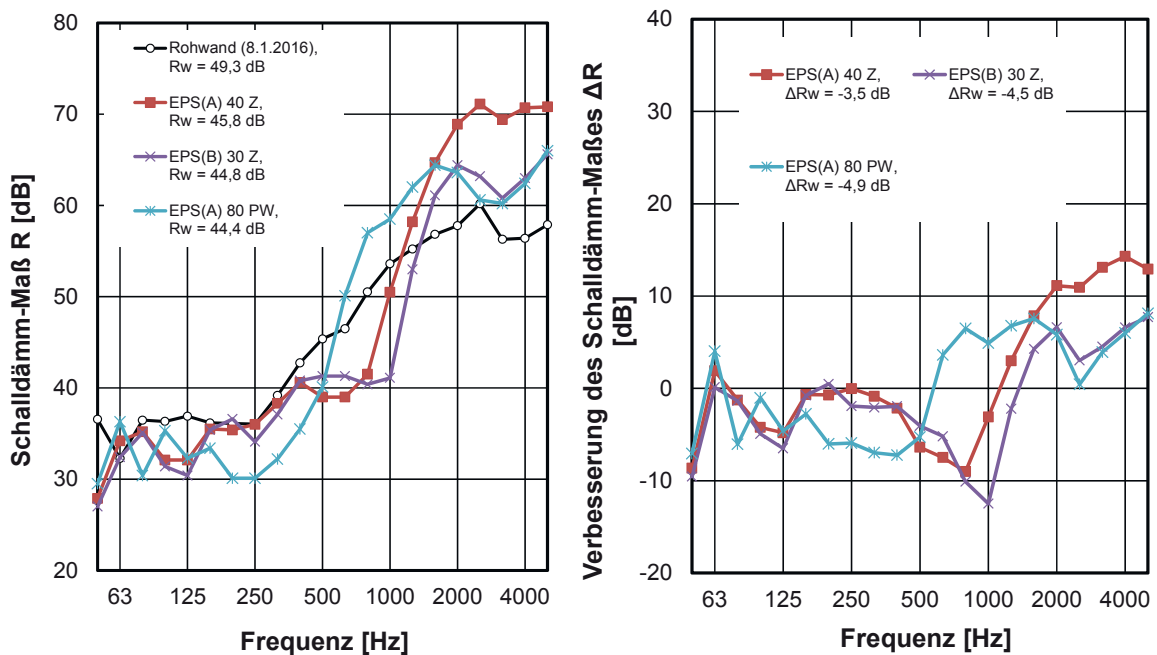


Bild 18:
Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) der Kombisysteme aus EPS und GP.

Insbesondere bei der Verbesserung zeigt sich, dass der Resonanzeinbruch, also der niedrigste Wert im Kurvenverlauf, mit zunehmender Dämmstoffdicke zu tiefen Frequenzen hin verschoben wird. Er liegt bei ca. 1000 Hz (EPS(B) 30 Z; violett) ca. 800 Hz (EPS(A) 40 Z; rot) und ca. 400 Hz (EPS(A) 80 PW; türkis). Dies führt dazu, dass die wieder ansteigenden Kurvenverläufe oberhalb dieser Resonanzfrequenzen näherungsweise parallel verschoben sind. Die Verbesserung der Schalldämmung fällt im Resonanzbereich auf $\Delta R \approx -8$ bis -12 dB.

Alle drei Kurven im rechten Bild haben zusätzlich einen Einbruch oberhalb von 2000 Hz. Dieser ist auf die Koinzidenz-Grenzfrequenz der Gipsplatte zurückzuführen, welche sich nach (6) für eine 12,5 mm dicke Gipsplatte zu $f_K \approx 2500$ Hz berechnet. Die Schwankungen im tieffrequenten Bereich unterhalb von 80 Hz sind schon bei der Rohwandmessung vorhanden und daher auf die Wandeigenschaften und die Raumgeometrie zurückzuführen. Des Weiteren gibt es Schwankungen im Kurvenverlauf bei 80 bis 160 Hz, die bei der Rohwandmessung nicht auftreten. Bei allen Systemen sind die Verbesserungen der Einzahlwerte negativ und liegen im Bereich von $\Delta R_w \approx -4$ bis -5 dB.

8.1.3 Kombisysteme aus Fasern und Gipsplatten

Zu den Kombisystemen aus Fasern zählen MW(A) 40 und MW(B) 30. Beide Systeme wurden nur im Punkt-Wulst-Verfahren montiert. Bild 19 zeigt die Schalldämmung (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der Kombisysteme aus Fasern und GP.

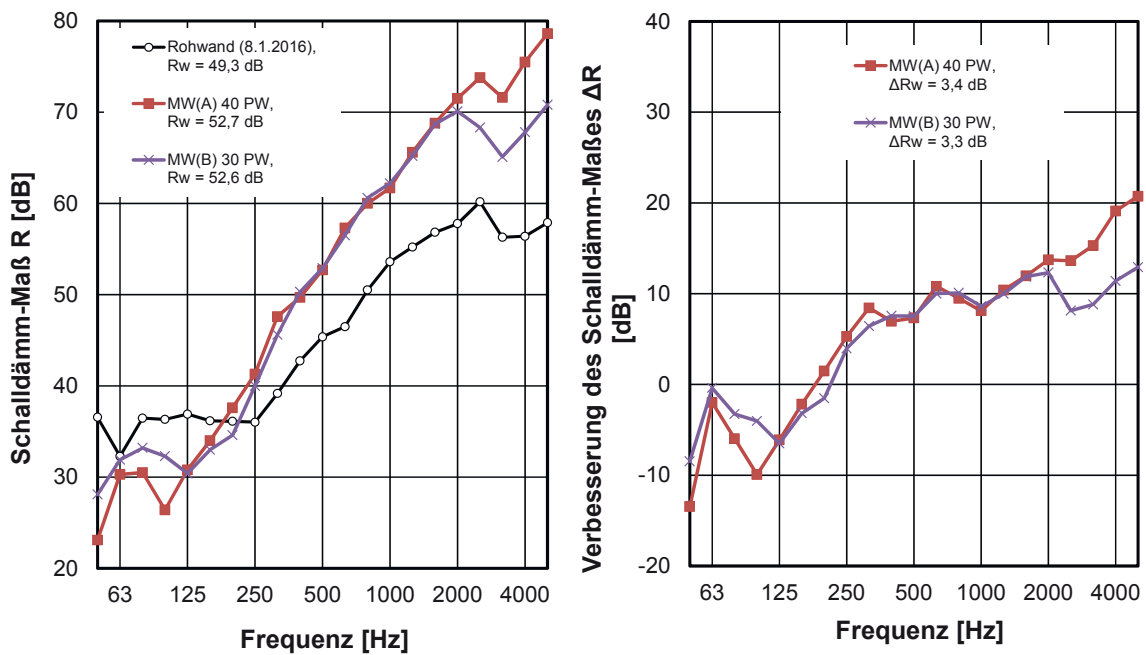


Bild 19:
Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) der Kombisysteme aus Fasern und GP.

Auch hier liegt der Resonanzeinbruch des etwas dickeren Systems MW(40) PW eine Terz tiefer als der des dünneren Systems MW(B) 30 PW. Jedoch sind die Kurven oberhalb der Resonanz nicht parallel verschoben, sondern nahezu deckungsgleich, weil die Verbesserung der Schalldämmung des Systems MW(B) 30 PW im Resonanzbereich nur auf $\Delta R \approx -5$ dB fällt. Beim System MW(40) PW sind es dagegen $\Delta R \approx -10$ dB.

Die Resonanzfrequenzen liegen im Allgemeinen wesentlich niedriger als bei den Kombisystemen mit EPS bei 100 bzw. 125 Hz. Auch hier zeigen sich der Koinzidenzeinbruch der Gipsplatte bei 2500 Hz, sowie durch den Messaufbau bedingte Schwankungen unterhalb von 80 Hz. Die Verbesserungen der Einzelwerte ΔR_w sind beide positiv und liegen im Bereich von ca. +3 dB.

8.1.4 Verputzte Fasersysteme

Zu den verputzten Fasersystemen zählen HWMP 50 D, HWMP 50 DZ und HWMP 100 D. HWMP 50 D und HWMP 50 DZ bestehen aus den gleichen Dämmstoffplatten, sie wurden einmal nur mit Hilfe von Tellerdübeln befestigt und einmal mit Tellerdübeln und zusätzlich Klebemörtel, aufgetragen mit einer 10 mm Zahnkelle. Die Anzahl der Dübel betrug ca. 7 Stück pro Platte, wobei jeweils der Dübel an den Plattenstößen mehrere Platten überlappend befestigte (vgl. Tabelle 2). Anschließend wurden die Platten mit ca. 15 mm dickem, systemspezifischen Innenputz verputzt. Die Trocknungszeit betrug jeweils 3 bis 5 Tage. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

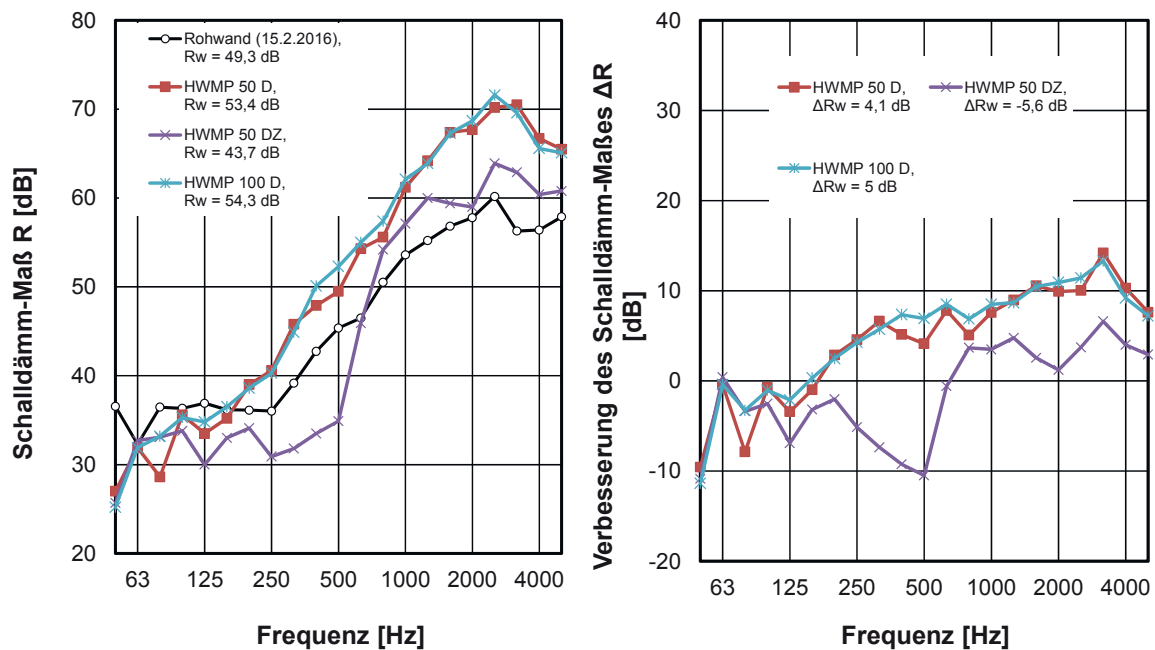


Bild 20:
Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) der verputzten Fasersysteme.

Die Systeme, die nur mit Hilfe von Dübeln befestigt wurden, bewirken eine deutliche Verbesserung der Schalldämmung. Es ist kein eindeutiger Resonanzeinbruch aus der Kurve im rechten Bild abzulesen. Da die dynamische Steifigkeit der Feder theoretisch nicht niedriger werden kann als die der im Dämmsystem eingeschlossene Luftschicht ($s' \approx 2,2$ MN/m³ für das System HWMP 50 D), damit ergibt sich nach (5) mit einer ca. 10 kg/m² schweren Putzschicht eine Resonanzfrequenz von $f_0 \approx 75$ Hz, welche im Kurvenverlauf deutlich ablesbar sein müsste. In der Durchgangsdämmung ist die Resonanz bei ca. 80 Hz, vermutlich wegen der Wirkung der Dübel als Körperschallbrücke, nur andeutungsweise erkennbar. Bei der Längsdämmung (Bild 25) ist hingegen der Effekt deutlich sichtbar erkennbar. Die Verbesserungen der Einzahlwerte liegen im Bereich von $\Delta R_w \approx 4$ bis 5 dB.

Die gleiche Innendämmung befestigt mit Dübeln und Klebemörtel HWMP 50 DZ hat hingegen einen breiten Einbruch bei 500 Hz und bewirkt eine negative Verbesserung von $\Delta R_w = -5,6$ dB. Der breite Einbruch lässt darauf schließen, dass sich zur Resonanz des Masse-Feder-Systems noch zusätzliche Effekte wie Körperschallübertragung durch die auch hier verwendeten Dübel addieren.

8.1.5 Verputzte Mineralfaserplatten

Zu den verputzten Mineralfaserplatten zählen die Systeme Perlite 50, Perlite 100 und PB 100. Sie wurden mit Hilfe von systemspezifischen Klebemörtel, aufgetragen mit einer 10 mm Zahnkelle, befestigt. Anschließend wurden sie mit ca. 15 mm dickem, systemspezifischen Innenputz verputzt. Die Trocknungszeit betrug jeweils 3 bis 5 Tage. Dabei wurde der Prüfstand aktiv belüftet.

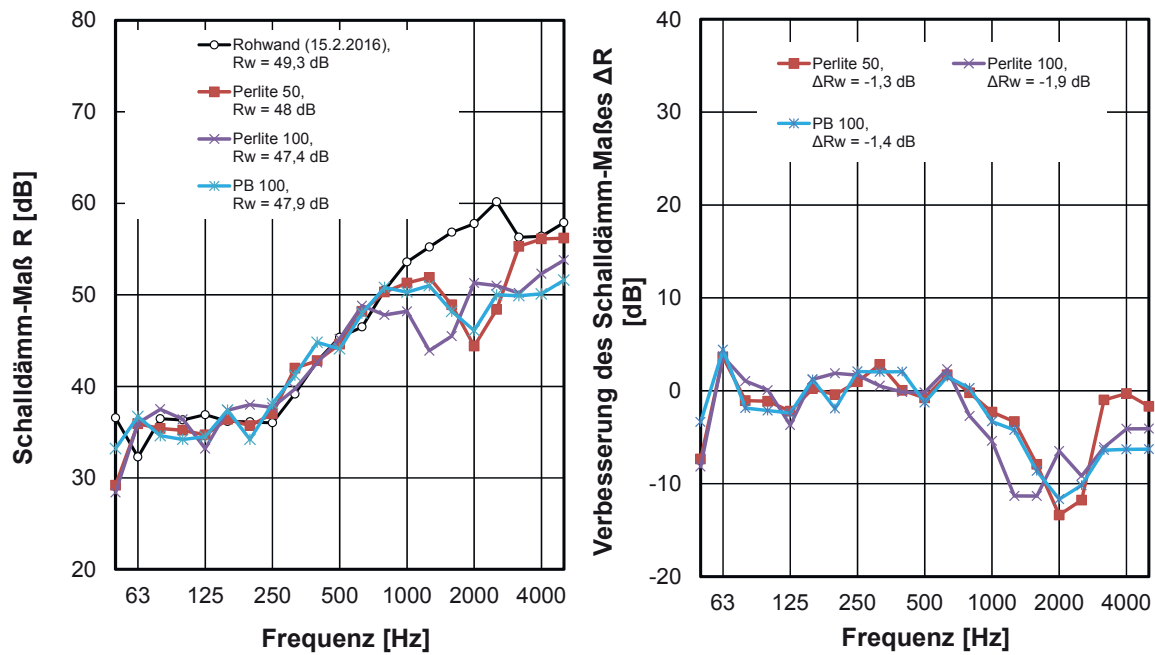


Bild 21:

Schalldämm-Maß (links) und Verbesserung (rechts) der verputzten Mineralschaum-Systeme.

Die Mineralschaum-Systeme haben von allen getesteten Systemen die höchste Lage der Resonanzfrequenz. Sie liegt bei ca. 1250 bis 2000 Hz. Die Verbesserungen der Schalldämmung der getesteten Systeme liegt dort bei $\Delta R < -10$ dB, was zusätzlich durch die Lage der Koinzidenzfrequenz des Putzes im selben Frequenzbereich verstärkt wird. Unterhalb der Resonanzfrequenz schwanken die Kurven des rechten Diagramms erwartungsgemäß um $\Delta R = 0$ dB. Insgesamt führt dies zu einer Verbesserung der Einzahlwerte ΔR_w von ca. -1 bis -2 dB. Auch wenn ΔR_w negativ ist, dürfte dies durch die hohe Lage der Resonanz und der relativ neutrale Kurvenverlauf unterhalb davon rein subjektiv nur schwach wahrnehmbar sein.

8.1.6 Bewertetes Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$

Tabelle 3:

Übersicht: Messergebnisse für bewertetes Schalldämm-Maß R_w und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$, sowie Verbesserung ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ aller untersuchten Systeme.

Bezeichnung	R_w ($C_{tr,50-5000}$) [dB]	ΔR_w [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]
Referenz (Mittel)	49,3 (-5)	-	-
EPS(A) 40 PW	44,3 (-4)	-5,0	-4,0
EPS(A) 40 Z	45,8 (-4)	-3,5	-2,5
EPS(A) 80 PW	44,4 (-5)	-4,9	-4,9
EPS(B) 30 PW	47,9 (-5)	-1,4	-1,4
EPS(B) 30 Z	44,8 (-4)	-4,5	-3,5
MW(A) 40 PW	52,7 (-11)	3,4	-2,6
MW(B) 30 PW	52,6 (-9)	3,3	-0,7
HWMP 50 D	53,4 (-9)	4,1	0,1
HWMP 50 DZ	43,7 (-5)	-5,6	-5,6
HWMP 100 D	54,3 (-10)	5,0	0,0
Perlite 50	48,0 (-5)	-1,3	-1,3
Perlite 100	47,4 (-4)	-1,9	-0,9
PB 100	47,9 (-4)	-1,4	-0,4

In Tabelle 3 sind die Einzahlwerte der bewerteten Schalldämm-Maße mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ sowie die Verbesserungen ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ tabellarisch zusammengefasst. Die Schalldämmung der Referenzwand beträgt im Mittel aus vier Messungen $R_w (C_{tr,50-5000}) = 49,3 (-5)$ dB. Es ist jeweils die höchste Verbesserung in grüner und die niedrigste Verbesserung in roter Schrift dargestellt.

Die Verbesserung der Schalldämmung ΔR_w ist bei allen Kombisystemen mit EPS negativ und bei allen Kombisystemen mit Fasern positiv. Die Verbesserungen der Systeme mit Holzwolle-Mehrschichtplatte (HWMP) und Putz hat nur mit Dübeln befestigt mit $\Delta R_w = 5,0$ dB die höchste und mit Dübeln und Klebemörtel mit $\Delta R_w = -5,6$ dB die niedrigste Verbesserung in Bezug auf ΔR_w . Die Systeme mit mineralischen Schäumen haben unabhängig vom Material vergleichbare Verbesserungen im Bereich $\Delta R_w = -1$ bis -2 dB.

Unter Berücksichtigung von $C_{tr,50-5000}$ bleibt das Niveau der negativen Verbesserungen etwa konstant, während die positiven Verbesserungen bei den verputzten Fasersystemen gegen Null gehen und bei den Kombisystemen mit Fasern sogar leicht negativ werden.

8.2 Messergebnisse Norm-Flankenpegeldifferenz und Verbesserung

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Schalllängsdämmung der einzelnen Produktgruppen gemäß Abschnitt 5.3 zusammengefasst dargestellt.

8.2.1 Referenzmessungen

In Bild 22 sind fünf verschiedene Messungen der Norm-Flankenpegeldifferenz der Außenwand ohne Innendämmung über den Zeitraum der Messreihe verteilt dargestellt, wobei die erste (blaue Kurve) noch ohne die nachträglich montierte Vorsatzschale (VS) im Senderaum vor der Wohnungstrennwand ermittelt wurde. Die Vorsatzschale verbessert die Norm-Flankenpegeldifferenz der Wandkonfiguration nahezu im gesamten Frequenzbereich um ca. 4 dB, oberhalb von 2000 Hz sogar noch etwas mehr. Da eine freistehende Vorsatzschale normalerweise Verbesserungen der Schalldämmung von Wänden im Bereich 8 bis 15 dB bewirkt, lässt sich daraus bereits schließen, dass nun der Großteil der Schallenergie wie gewünscht über die Außenwand übertragen wird.

Der Zeitraum der vier Messungen mit Vorsatzschale reicht vom 8. Januar 2016, unmittelbar vor Beginn der Montage der Systeme EPS(A) bis zum 25. Juli 2016 unmittelbar nach der Demontage des letzten Dämmsystems PB 100. Die Einzelwertwerte unterscheiden sich um max. ca. 1 dB. Um die Auswertung möglichst übersichtlich zu gestalten, wird für die folgenden Diagramme und die Ermittlung der Verbesserung der Norm-Flankenpegeldifferenz durch die Innendämmsysteme der Mittelwert der vier Referenzmessungen mit Vorsatzschale verwendet.

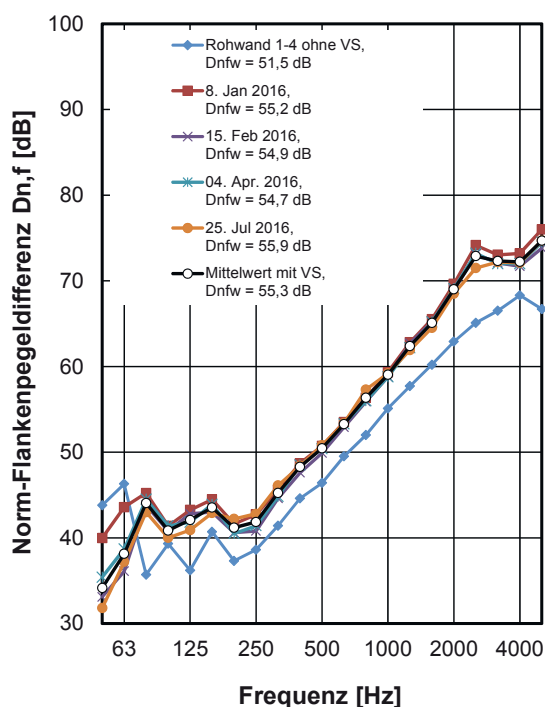


Bild 22:
Norm-Flankenpegeldifferenz der Rohwand (Referenz) über den Zeitraum der Messreihe.

8.2.2 Kombisysteme aus EPS und Gipsplatten

Bild 23 zeigt die Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der Kombisysteme mit EPS und Gipsplatten (GP).

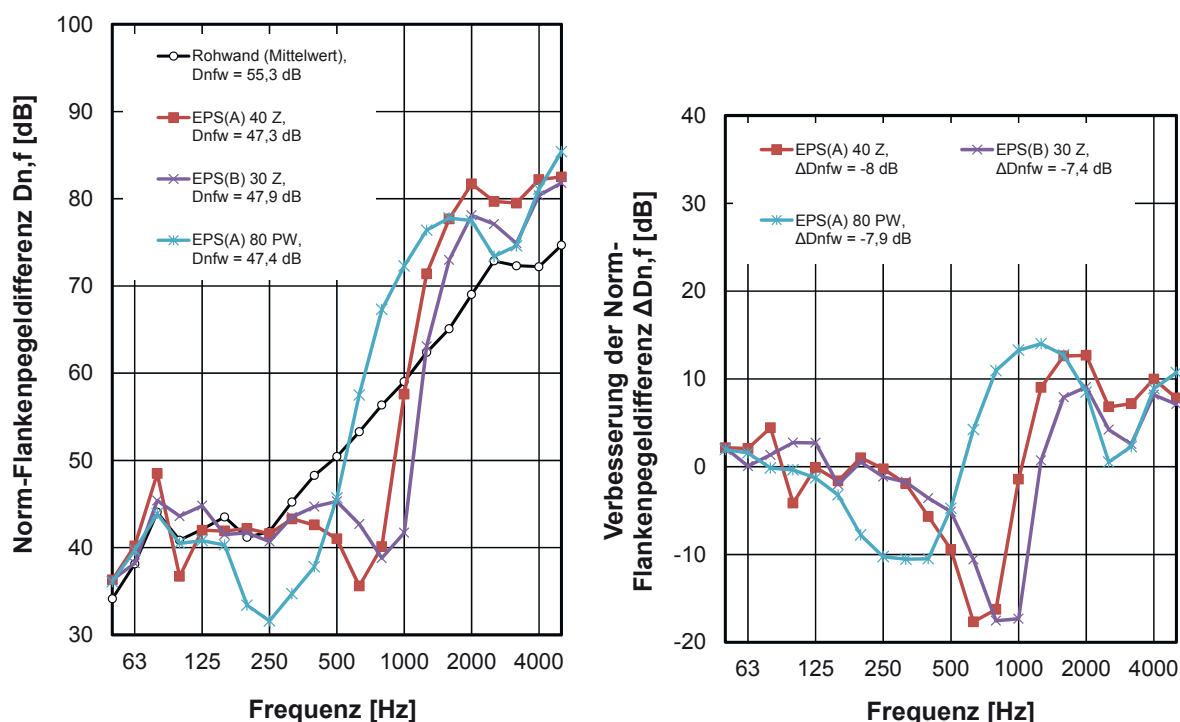


Bild 23:
Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) der Kombisysteme aus EPS und GP.

Auch hier zeigt sich bei der Verbesserung (rechts), dass der Resonanzeinbruch wie bei der Schalldämmung mit zunehmender Dämmstoffdicke zu tiefen Frequenzen hin verschoben wird. Er liegt bei ca. 900 Hz (EPS(B) 30 Z, violett) ca. 650 Hz (EPS(A) 40 Z, rot) und ca. 400 Hz (EPS(A) 80 PW, türkies). Die ansteigenden Kurvenverläufe oberhalb dieser Resonanzfrequenzen sind näherungsweise parallel verschoben. Die Verbesserung der Schalldämmung fällt im Resonanzbereich auf $\Delta D_{n,f} \approx -15$ bis -18 dB, was etwa Faktor 2 gegenüber der Schalldämmung entspricht.

Alle drei Kurven im rechten Bild haben einen Koinzidenz-Einbruch durch die Gipsplatte bei ca. $f_K \approx 2500$ Hz. Die Schwankungen im tieffrequenten Bereich sind nicht so stark ausgeprägt wie bei der Schalldämmung. Bei allen Systemen sind die Verbesserungen der Einzahlwerte negativ. Der Effekt ist mit $\Delta D_{n,f,w} \approx -7$ bis -8 dB ebenfalls etwa doppelt so groß wie bei der Schalldämmung.

8.2.3 Kombisysteme aus Mineralfaser und Gipsplatten (GP)

Bild 24 zeigt die Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der Kombisysteme aus Mineralfasern und GP.

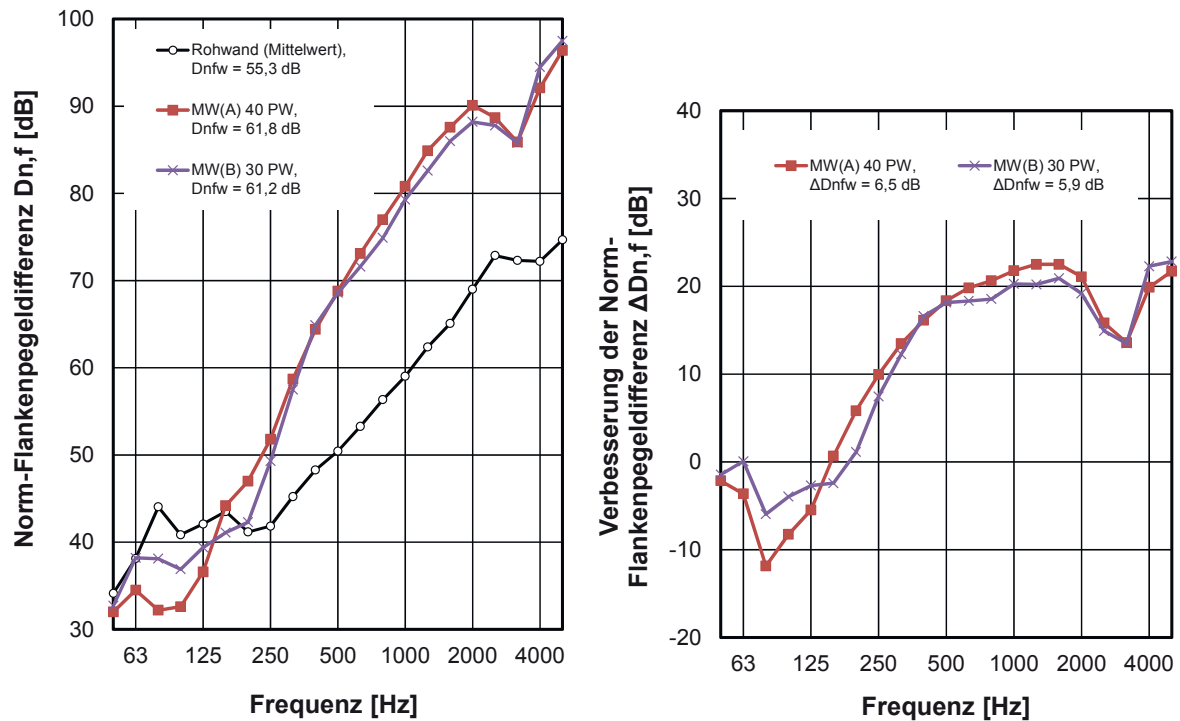


Bild 24:
Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) der Kombisysteme mit Fasern und GP.

Die Resonanzfrequenz beider Systeme liegt bei ca. 80 Hz. Die Verbesserung der Norm-Flankenpegeldifferenz beträgt hier $\Delta D_{n,f} \approx -5$ bzw. -12 dB. Die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz ist bei beiden Systemen positiv und beträgt $\Delta D_{n,f,w} \approx 6$ dB.

8.2.4 Verputzte Fasersysteme

Bild 25 zeigt die Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der verputzten Fasersysteme aus Holzwolle-Mehrschichtplatten.

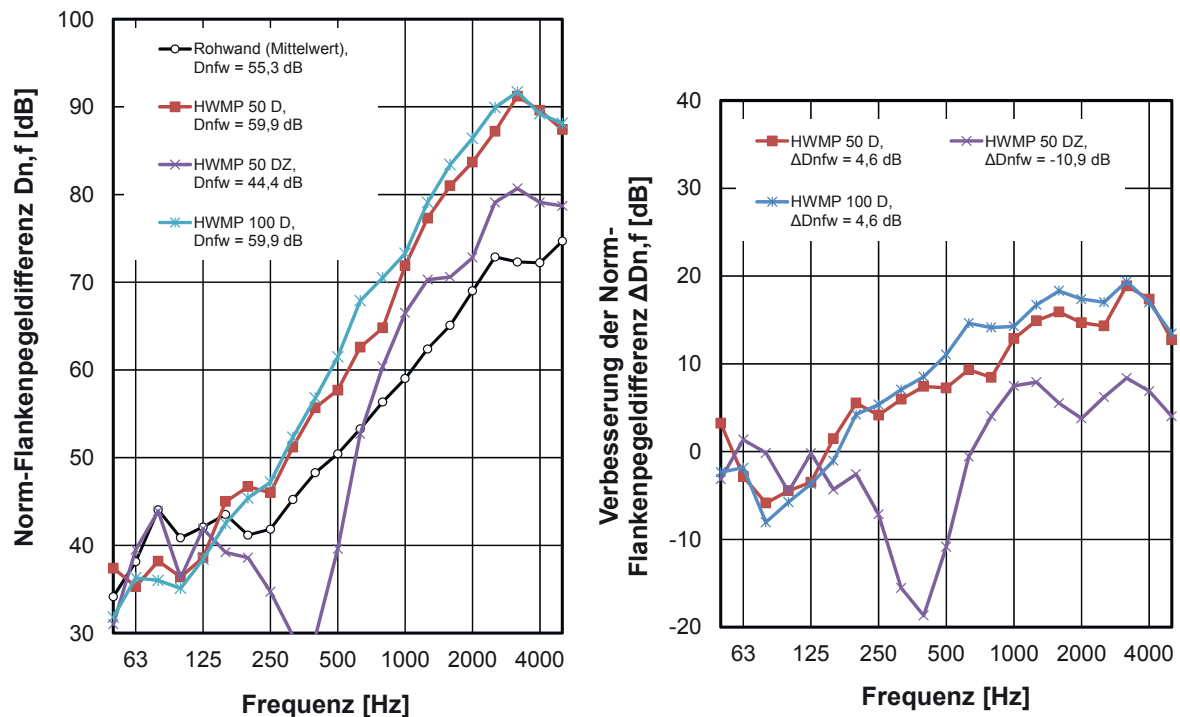


Bild 25:
Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) der verputzten Fasersysteme.

Entgegen der Messungen der Schalldämmung in Durchgangsrichtung der Wand kann bei der Längsdämmung ein eindeutiger Resonanzeinbruch bei den nur mit Dübeln befestigten Systemen HWMP 50 D und HWMP 100 D bei ca. 80 Hz festgestellt werden. Er ist mit $\Delta D_{n,f} \approx -8$ dB etwa halb so stark ausgeprägt, wie bei der Befestigung mit Dübeln und Klebemörtel (HWMP 50 DZ $\Delta D_{n,f} \approx -18$ dB).

Die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz ist bei den beiden Systemen mit Dübel-Befestigung positiv und beträgt $\Delta D_{n,f,w} \approx 5$ dB, durch die zusätzliche Befestigung mit Klebemörtel wird analog zu ΔR_w auch $\Delta D_{n,f,w} \approx -11$ dB negativ.

8.2.5 Verputzte mineralische Dämmplatten

Bild 26 zeigt die Normschallpegeldifferenz (links) und die Verbesserung der Schalldämmung (rechts) der verputzten Mineraldämmplatten.

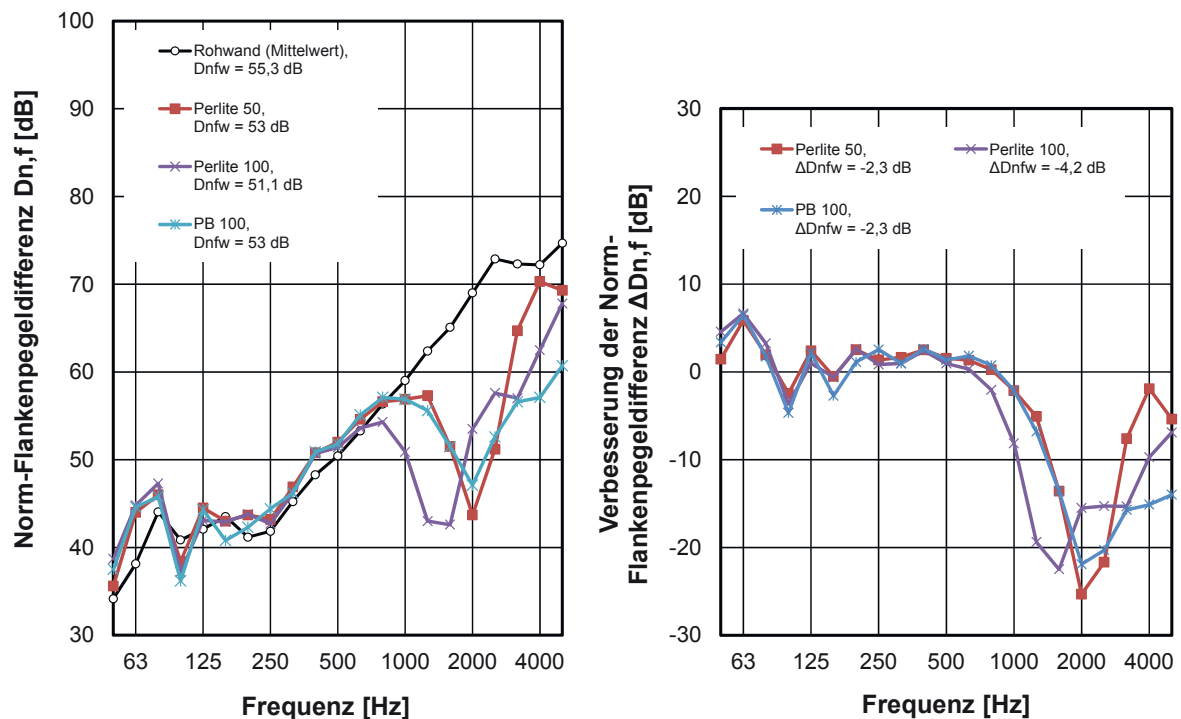


Bild 26: Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) der verputzten Mineralschaum-Systeme.

Bei den massiven Mineraldämmplatten ist der Kurvenverlauf der Verbesserung der Norm-Flankenpegeldifferenz ähnlich wie bei der Verbesserung der Schalldämmung. Die Lage der Resonanz liegt bei ca. 1600 bis 2000 Hz und unterhalb der Resonanzfrequenz gehen die Kurven gegen Null dB. Der Resonanzeinbruch ist mit $\Delta D_{n,f} < -20$ dB, wie zu erwarten war, jedoch doppelt so groß.

8.2.6 Bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$

Tabelle 4:

Übersicht: Messergebnisse für die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$, sowie Verbesserung $\Delta D_{n,f,w}$ und $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ aller untersuchten Systeme

Bezeichnung	$D_{n,f,w} (C_{tr,50-5000})$ [dB]	$\Delta D_{n,f,w}$ [dB]	$\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ [dB]
Referenz (Mittel)	55,3 (-6)	-	-
EPS(A) 40 PW	45,3 (-3)	-10,0	-7,0
EPS(A) 40 Z	47,3 (-4)	-8,0	-6,0
EPS(A) 80 PW	47,4 (-5)	-7,9	-6,9
EPS(B) 30 PW	52,6 (-5)	-2,7	-1,7
EPS(B) 30 Z	47,9 (-4)	-7,4	-5,4
MW(A) 40 PW	61,8 (-13)	6,5	-0,5
MW(B) 30 PW	61,2 (-11)	5,9	0,9
HWMP 50 D	59,9 (-9)	4,6	1,6
HWMP 50 DZ	44,4 (-5)	-10,9	-9,9
HWMP 100 D	59,9 (-10)	4,6	0,6
Perlite 50	53,0 (-4)	-2,3	-0,3
Perlite 100	51,1 (-5)	-4,2	-3,2
PB 100	53,0 (-4)	-2,3	-0,3

In Tabelle 4 sind die Einzahlwerte der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$, sowie die Verbesserungen $\Delta D_{n,f,w}$ und $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ tabellarisch zusammengefasst. Die Norm-Flankenpegeldifferenz der Referenzwand beträgt im Mittel aus vier Messungen $D_{n,f,w} (C_{tr,50-5000}) = 55,3 (-6)$ dB. Es ist jeweils die höchste Verbesserung in grüner und die niedrigste Verbesserung in roter Schrift dargestellt.

Die Verbesserung der Norm-Flankenpegeldifferenz $\Delta D_{n,f,w}$ ist bei allen Kombisystemen mit EPS negativ und bei allen Kombisystemen mit Mineralfasern positiv. Die Systeme mit Holzwolle-Mehrschichtplatte (HWMP) und Putz haben nur mit Dübeln befestigt mit $\Delta D_{n,f,w} = 4,6$ dB eine der höchsten Verbesserungen und mit Dübeln und Klebemörtel mit $\Delta D_{n,f,w} = -10,9$ dB die niedrigste Verbesserung in Bezug auf $\Delta D_{n,f,w}$. Die Systeme mit mineralischen Schäumen haben unabhängig vom Material vergleichbare Verbesserungen im Bereich $\Delta D_{n,f,w} = -2$ bis -4 dB. Unter Berücksichtigung von $C_{tr,50-5000}$ verringert sich das Niveau der negativen Verbesserungen um ca. 1 bis 2 dB, während die positiven Verbesserungen bei den Fasersystemen gegen Null gehen.

8.3 Vergleich Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes und Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz

Tabelle 5:

Übersicht: Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes und Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz ohne und mit $C_{tr,50-5000}$

Bezeichnung	ΔR_w [dB]	$\Delta D_{n,f,w}$ [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]	$\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ [dB]
Referenz (Mittel)	-	-	-	-
EPS(A) 40 PW	-5,0	-10,0	-4,0	-7,0
EPS(A) 40 Z	-3,5	-8,0	-2,5	-6,0
EPS(A) 80 PW	-4,9	-7,9	-4,9	-6,9
EPS(B) 30 PW	-1,4	-2,7	-1,4	-1,7
EPS(B) 30 Z	-4,5	-7,4	-3,5	-5,4
MW(A) 40 PW	3,4	6,5	-2,6	-0,5
MW(B) 30 PW	3,3	5,9	-0,7	0,9
HWMP 50 D	4,1	4,6	0,1	1,6
HWMP 50 DZ	-5,6	-10,9	-5,6	-9,9
HWMP 100 D	5,0	4,6	0,0	0,6
Perlite 50	-1,3	-2,3	-1,3	-0,3
Perlite 100	-1,9	-4,2	-0,9	-3,2
PB 100	-1,4	-2,3	-0,4	-0,3

Beim Vergleich der Einzahlwerte für die Verbesserung der Schalldämmung in Durchgangsrichtung mit denen der Schall-Längsdämmung fällt auf, dass bei fast allen Systemen $\Delta D_{n,f,w}$ nahezu doppelt so groß ausfällt wie ΔR_w .

Der Grund dafür besteht darin, dass bei der Schall-Längsdämmung die Schallenergie jeweils einmal im Senderraum und einmal im Empfangsraum das jeweilige Innendämmsystem passieren muss, während dies bei der Schalldämmung in Durchgangsrichtung nur einmal der Fall ist. Dadurch addieren sich sowohl die positiven, als auch die negativen Effekte. Bestätigt wird diese Aussage durch die ergänzende Untersuchung in Abschnitt 7.4, wo ähnliche Ergebnisse beim Vergleich von einseitiger und beidseitiger Montage der Innendämmung auf das Messergebnis der Schall-Längsdämmung festgestellt wurden.

8.4 Messergebnisse Körperschall auf der Wohnungstrennwand (Querwand) zur Unterscheidung der Übertragungswege F_f , F_d und D_f

Der gemessene Schalldruckpegel im Empfangsraum beinhaltet die Schallübertragung aus dem Senderraum über alle Übertragungspfade. Durch die Bauart des Prüfstands können üblicherweise, mit Bezug auf [29], alle vorhandenen Übertragungspfade außer F_f ausgeschlossen werden. Der Grund dafür ist, dass diese Pfade durch Trennfugen im Prüfstand unterdrückt werden und so der Anteil der über alle unterdrückten Übertragungspfade übertragenen Schallenergie wesentlich geringer ist als der Anteil der Schallenergie, der über den Pfad F_f

übertragen wird. Das führt dazu, dass der gemessene Schalldruckpegel im Empfangsraum, der zur Ermittlung der Norm-Flankenpegeldifferenz dient, normalerweise nur vom Übertragungspfad F_f abhängig ist. Aufgrund der Bausituation, bei der massive Außenwand und Wohnungstrennwand mit einem T-Stoß fest verbunden sind, wird eine Trennfuge im Prüfstand überbrückt. Dies führt dazu, dass bei den Messungen der Norm-Flankenpegeldifferenz die Schallübertragungspfade F_d und D_f einen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Die Übertragung über den Pfad D_f wurde mit Hilfe der Vorsatzschale im Senderraum ausreichend reduziert. Im Empfangsraum wurde hingegen bewusst auf eine Vorsatzschale verzichtet, um auf diese Weise den Einfluss der Innendämmung auf dem Flankenweg F_d (und analog dazu auf dem Weg D_f , über den etwa die gleiche Schallleistung übertragen wird) messtechnisch abschätzen zu können. Die Schalldämmung des Übertragungspfad F_d wird aus der mittleren Körperschall-Schnelle auf der Trennwand berechnet indem parallel zu jeder Schalldruckpegelmessung im Empfangsraum auch die Körperschall-Schnellepegel auf der Wohnungstrennwand gemessen werden.

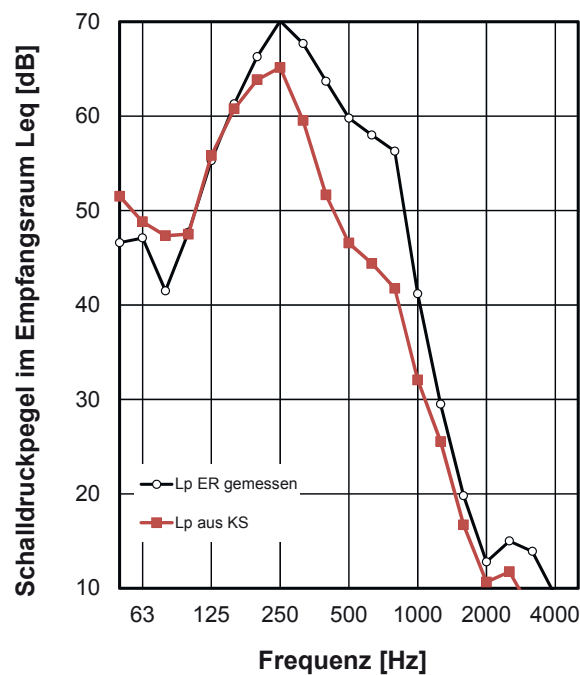


Bild 27:
Direkt Gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel im Empfangsraum der Systeme EPS(A) 40 PW

Mit Hilfe von Gl. (7) kann daraus der Anteil des Schalldruckpegels im Empfangsraum ermittelt werden, der von der Wohnungstrennwand emittiert wird. Dieser wird normgerecht bei Labormessungen der Norm-Flankenpegeldifferenz durch die Prüfanordnung unterdrückt. Idealerweise sollte der gemessene Schalldruckpegel im Empfangsraum mindestens 10 dB höher sein, als der aus der Körperschallmessung auf der Wohnungstrennwand ermittelte. Andernfalls besteht ein Einfluss des Messergebnisses der Norm-Flankenpegeldifferenz durch den Übertragungspfad Fd. In Bild 27 ist jeweils der frequenzabhängige Schalldruckpegel im Empfangsraum direkt gemessen und der Anteil der sich aus der Körperschallmessung auf der Querwand über den Abstrahlgrad errechnet wurde dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Schallübertragung über den Pfad Fd (rote Kurve) in einigen Frequenzbereichen merklichen Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel im Empfangsraum hat. Dies ist überall dort der Fall, wo die schwarze Kurve (gemessener Schalldruckpegel im Empfangsraum – Summe aller Übertragungspfade) nicht mindestens 10 dB über der roten Kurve liegt. Allerdings beschränkt sich das überwiegend auf die Frequenzbereiche, die nicht für die Bildung der Einzahlwerte maßgebend sind. Um sicherzugehen, dass dies sowohl für die Norm-Flankenpegeldifferenz, als auch für deren Verbesserung gilt, wurden beide Werte in Abhängigkeit der Übertragungspfade für ein System ermittelt und gegenübergestellt. Wie in Bild 28 zu erkennen ist, liegen die Einzahlwerte $D_{n,f,w}$ und $\Delta D_{n,f,w}$ für den Pfad Fd und die Summe aller Pfade, die nun maßgeblich vom Pfad Ff bestimmt wird, um mehr als 10 dB auseinander. Dies bedeutet, dass der Einfluss des Pfades Fd kleiner ist als 0,1 dB.

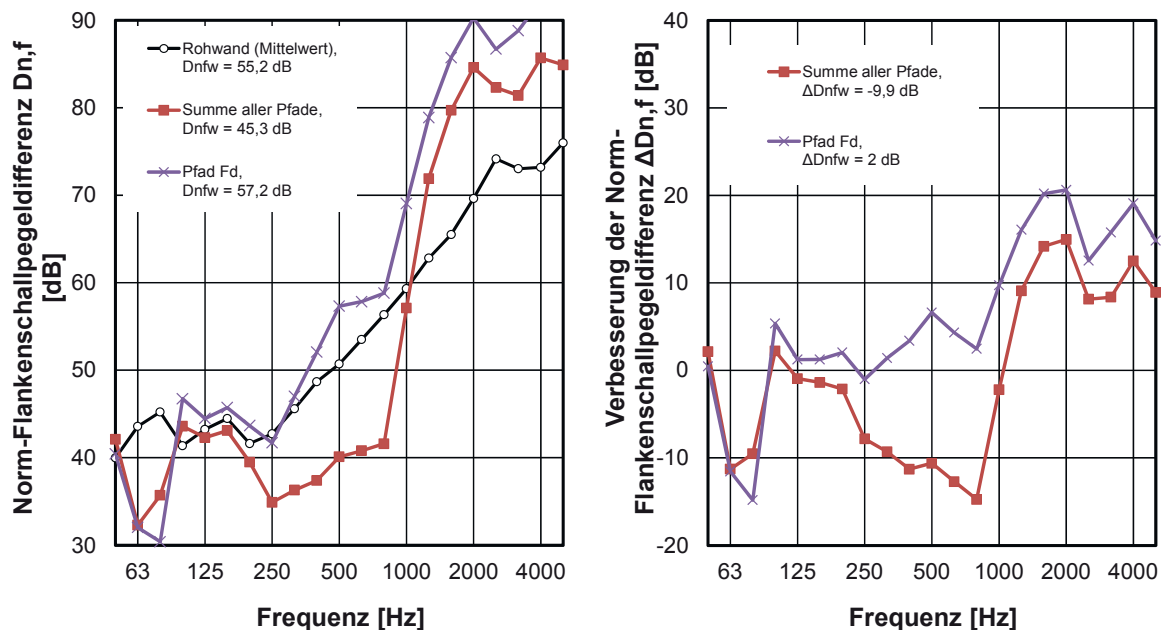


Bild 28:
Norm-Flankenpegeldifferenz (links) und Verbesserung (rechts) des Dämmsystems EPS(A) 40 PW in Abhängigkeit der Schallübertragungspfade

In den folgenden Diagrammen Bild 29 bis Bild 33 sind analog die gemessenen Schalldruckpegel im Empfangsraum und die aus den Körperschallmessungen für den Übertragungspfad Fd berechneten Schalldruckpegel dargestellt. Tendenziell scheinen die Differenzen der direkt gemessenen Schalldruckpegel für alle Übertragungspfade und den aus den Körperschallmessungen berechneten Schalldruckpegelanteilen für den Übertragungspfad Fd größer zu sein als bei dem o.g. Beispiel. Der Einfluss des Pfades Fd liegt damit mit hoher Wahrscheinlichkeit für alle Messungen innerhalb der ohnehin gültigen Messtoleranzen für Labormessungen der Schalldämmung nach DIN EN ISO 12999-1 [35] von $\pm 1,2$ dB und kann damit für die nachfolgende Erstellung des Prognoseverfahrens vernachlässigt werden.

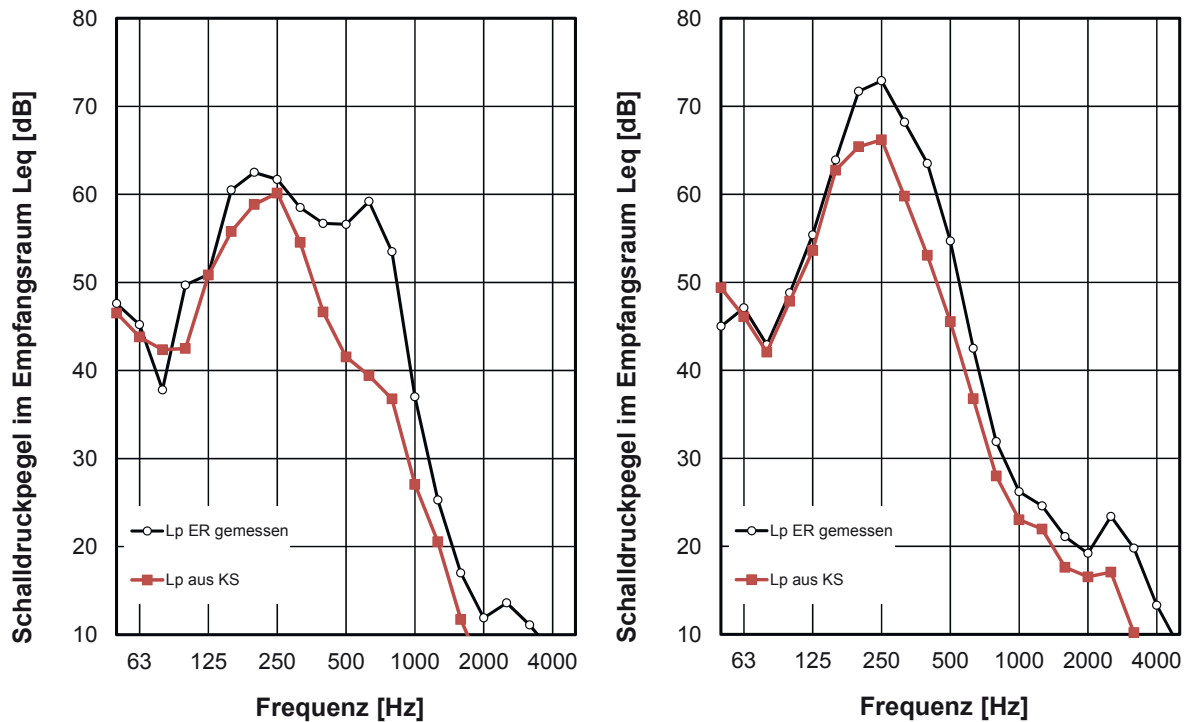


Bild 29:
Direkt gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel für die Systeme EPS(A) 40 Z (links) und EPS(A) 80 PW (rechts).

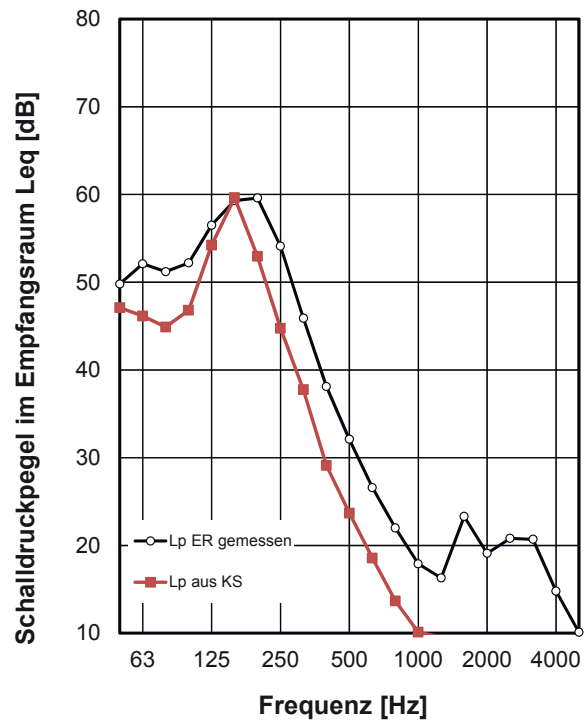


Bild 30:
Direkt gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel im Empfangsraum für das Systems MW(A) 40 PW.

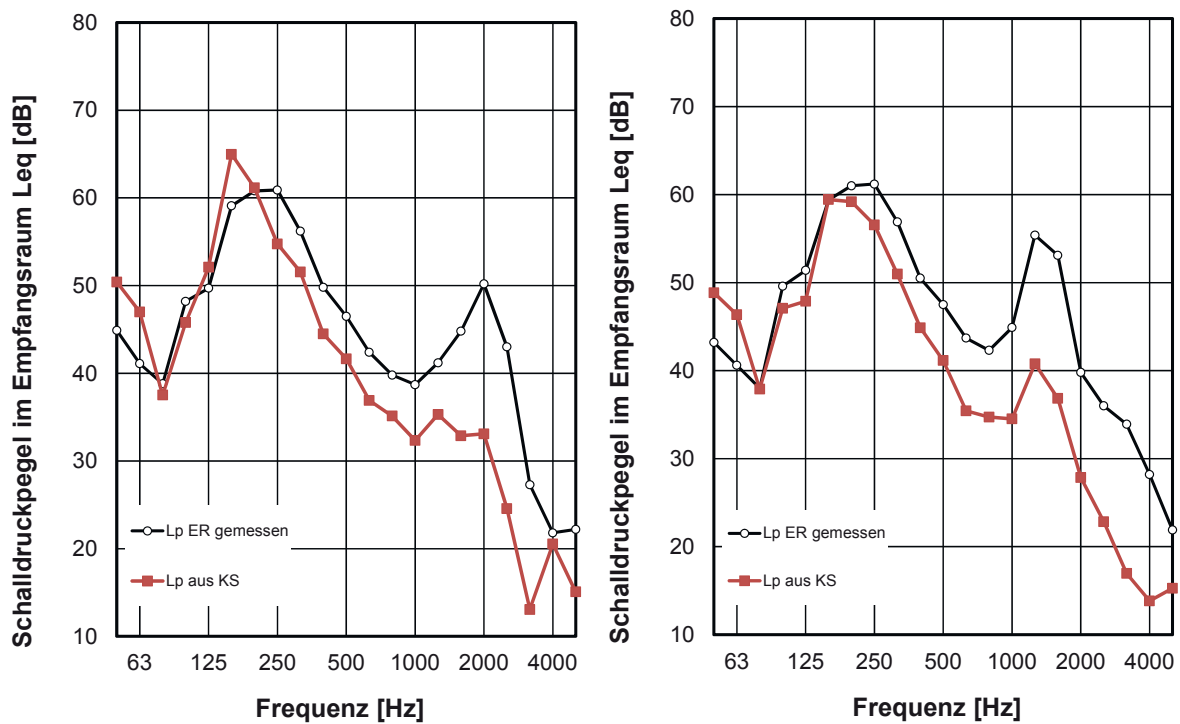


Bild 31:
Direkt gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel im Empfangsraum für die Systeme Perlite 50 (links) und Perlite 100 (rechts).

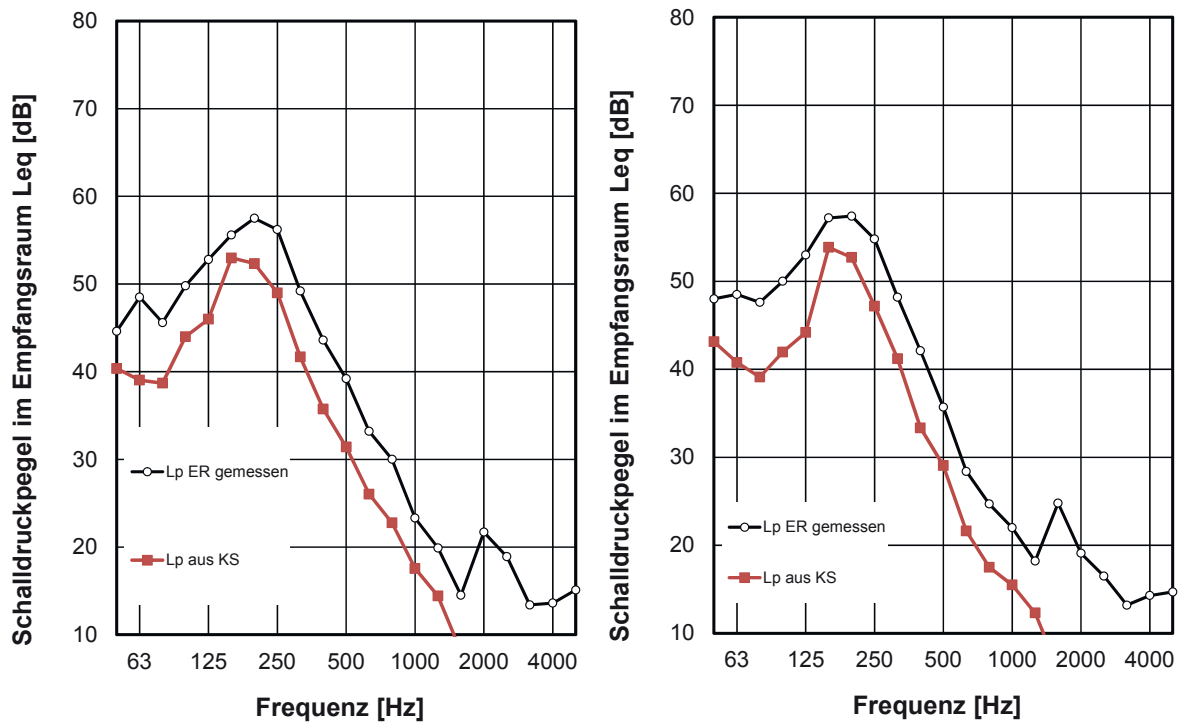


Bild 32:
Direkt gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel für die Systeme HWMP 50 D (links) und HWMP 100 D (rechts).

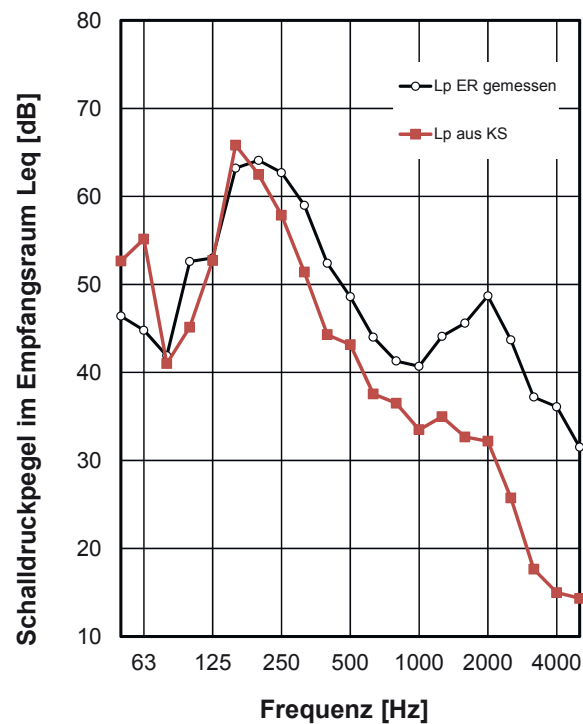


Bild 33:
Direkt Gemessener und aus dem Körperschallpegel berechneter Schalldruckpegel im Empfangsraum für das Systems PB 100 Z.

Bei den Übertragungspfaden F_d und F_f durchläuft der Schall einmal das Dämmsystem. Die akustische Wirkung der Dämmung ist deshalb ähnlich wie bei der Durchgangsdämmung. Im Gegensatz dazu wird die Dämmung beim Pfad F_f zweimal durchlaufen (einmal im Sende- und einmal im Empfangsraum). Der Einfluss des Dämmsystems auf die Schalldämmung ist deshalb stärker. Bezogen auf die meisten Terzwerte ist die Verbesserung etwa doppelt so hoch, bei den Einzahlwerten ergibt sich ein Unterschied um den Faktor 1,5. Die Beiträge der beiden Pfade F_d und F_f zur resultierenden Schalldämmung zwischen Sende- und Empfangsraum sind gleich groß.

Unter üblichen baulichen Verhältnissen liefert der Pfad F_f gegenüber den Pfaden F_d und F_f den maßgeblichen Anteil zur Schall-Längsleitung. Dies gilt sowohl mit als auch ohne Innendämmung. Für eine ungefähre Abschätzung der Längsschalldämmung ist es daher vielfach ausreichend, sich auf den Pfad F_f zu beschränken. Es gibt jedoch auch Sonderfälle, bei denen die Pfade F_d und F_f verstärkt zur Schalllängsleitung beitragen und deshalb nicht ohne Weiteres vernachlässigt werden können. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn nur auf einer Seite der Trennwand ein Dämmsystem vorhanden ist oder wenn das Dämmsystem eine starke Verschlechterung der Schalldämmung bewirkt.

8.5 Messung der dynamischen Steifigkeit der Dämmschichten nach DIN 29052 und Berechnung der Resonanzfrequenzen

Für die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit existiert nur ein genormtes Verfahren, welches allerdings ausdrücklich für Dämmstoffe unter schwimmenden Estrichen und nicht für Wandbekleidungen bestimmt ist. Nach DIN EN 29052-1 [32] wird die dynamische Steifigkeit der Dämmstoffe unter einer statischen Drucklast von ca. 200 kg/m^2 ermittelt, die bei Wandbekleidungen nicht vorhanden ist. Aus diesem Grund weichen die Ergebnisse wegen der Frequenzabhängigkeit der dynamischen Steifigkeit mit zunehmender Steifigkeit der Dämmstoffe voneinander ab und es ergeben sich in Bezug auf Gl. (5) abweichende Resonanzfrequenzen. Diese wiederum führen zu falschen Prognosen des Einflusses der Innendämmsysteme auf die Schalldämmung der Trägerwände.

Da vermutet wird, dass zwischen der nach DIN EN 29052-1 gemessenen und der tatsächlichen dynamischen Steifigkeit des Innendämmsystems als Wandverkleidung ein vergleichsweise einfacher Zusammenhang besteht, wird an dieser Stelle dennoch auf das bereits genormte und bewährte Messverfahren zurückgegriffen. In der folgenden

Tabelle 6 sind die nach DIN EN 29052-1 gemessenen Werte für die dynamische Steifigkeit und die daraus berechnete Resonanzfrequenz, sowie die aus der Messkurve der Verbesserung des Schalldämm-Maßes abgelesene Resonanzfrequenz zusammengefasst.

Wie bereits vermutet, nehmen die Differenzen zwischen der berechneten und der aus der Messkurve abgelesenen Resonanzfrequenz mit zunehmender dynamischer Steifigkeit systematisch und stetig zu. Aus diesem Grund wird davon

ausgegangen, dass sich die Abweichungen mit Hilfe einer Anpassung im Berechnungsmodell berücksichtigen lassen.

Tabelle 6:

Dynamische Steifigkeit und daraus ermittelte Resonanzfrequenzen der Systeme sowie die aus der Messkurve abgelesene Resonanzfrequenz

System	gemessene dynamische Steifigkeit s' [MN/m³]	Flächenbezogene Masse der Deckschicht m'' [kg/m²]	berechnete Resonanzfrequenz f_R aus s' und m'' [Hz]	Resonanzfrequenz f_R aus der Messkurve [Hz]
EPS(A) 40 PW	60	10	390	315-800
EPS(A) 40 Z	60	10	390	650
EPS(A) 80 PW	33	10	290	400
EPS(B) 30 PW	70	10	370	200-800
EPS(B) 30 Z	70	10	425	900
MW(A) 40	12	10	170	80
MW(B) 30	11	10	175	80
Perlite 50	208	10	730	2100
Perlite 100	186	10	690	1600
PB 100	200	10	750	2100
HWMP 50 D	32	10	290	80
HWMP 50 DZ	32	10	290	400
HWMP 100 D	13	10	185	80

9 Berechnungsmodell für die Schalldämmung

Aus den in den vorangehenden Abschnitten dargestellten Messergebnissen geht hervor, dass innenseitige Wärmedämm-Systeme die Schalldämmung und die Schall-Längsdämmung von Außenwänden in erheblichem Maße beeinflussen können. Da dabei sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der Schalldämmung erfolgen kann, muss der akustische Einfluss der Innendämmung bei der baulichen Schallschutzplanung berücksichtigt werden. Im Idealfall erfolgt dies unter Verwendung akustischer Prüfzeugnisse oder Herstellerangaben. Da geeignete Angaben jedoch vielfach nicht zur Verfügung stehen, wird für die Planung ersatzweise ein entsprechendes Berechnungsmodell benötigt. Im Folgenden soll deshalb ein geeignetes Modell zur Vorhersage der Schalldämmung von Wänden mit Innendämmung entwickelt werden.

Das nachfolgend beschriebene Modell beschränkt sich auf Einzahlangaben (bewertetes Schalldämm-Maß R_w und bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$), da für den baulichen Schallschutznachweis nach DIN 4109 und zum Vergleich mit den geltenden Schallschutzanforderungen ausschließlich Einzahlangaben herangezogen werden. Außerdem wären frequenzabhängige Berechnungen mit deutlich höherem Aufwand verbunden, ohne dass sich den vorliegenden Erfahrungen zufolge dabei eine merkliche Verbesserung der Prognosegenauigkeit ergeben würde.

Um die Schallübertragung in Bauten nach DIN 4109-2 [36] oder DIN EN ISO 12354-1 [9] zu berechnen, werden für Außenwände mit innenseitiger Wärmedämmung als Berechnungsgrundlage vor allem zwei Größen benötigt:

- Die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Außenwand durch das Dämmsystem ΔR_w sowie
- die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz der Wand $\Delta D_{n,f,w}$

wobei zwischen den beiden Größen, wie später noch gezeigt wird, ein enger Zusammenhang besteht. Das hier entwickelte Berechnungsmodell konzentriert sich deshalb im Wesentlichen auf die rechnerische Prognose dieser beiden Größen. Der Anwendungsbereich des Modells umfasst folgende bauliche Situation:

- Innenseitige Wärmedämmung in der Ausführung als Verbundsystem (Dämmschicht beidseitig fest mit der Grundwand und der Wandbekleidung verbunden). Dämmsysteme in der Form von Vorsatzschalen (Montage der Wandbekleidung mittels Ständerwerk mit lose eingestelltem Dämmstoff) werden hier nicht betrachtet. Ausführliche Untersuchungen zur Schalldämmung von Vorsatzschalen einschließlich geeigneter akustischer Berechnungsverfahren sind dem Forschungsbericht B-BA 2/2008 [10] zu entnehmen, der vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Auftrag des BBSR erstellt wurde.,
- Es wird davon ausgegangen, dass die Außenwände beidseits der Trennwand gleich aufgebaut und mit gleichartigen Dämmsystemen versehen

sind. Ist nur auf einer Seite der Trennwand eine Innendämmung vorhanden, so verringert sich der mit dem Prognoseverfahren für $\Delta D_{n,f,w}$ berechnete Wert um etwa den Faktor $1/1,5 \cong 0,67$.

Weitere Einzelheiten zum Anwendungsbereich des Berechnungsmodells werden später noch genauer dargestellt.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen und die wichtigsten Schritte zur Entwicklung des Modells in kurzer Form erläutert. Anschließend wird das Modell mit allen erforderlichen Berechnungsformeln und Eingangsdaten dargestellt, so dass die Anwender die Prognose bei Bedarf direkt selbst durchführen können. Der letzte Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich dann noch mit den Anwendungsgrenzen und der Prognosegenauigkeit des Verfahrens.

9.1 Resonanzfrequenz

Auch wenn weitere Faktoren, wie z. B. der Anteil der Klebefläche oder die zusätzliche Befestigung mit Dübeln, die Schalldämmung von Dämmsystemen gleichfalls beeinflussen, stellt die Resonanzfrequenz die weitaus wichtigste akustische Einflussgröße dar. Bei Verbundsystemen lässt sich die Resonanzfrequenz nach Gl. (5) aus der flächenbezogenen Masse der Bekleidung und der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht bestimmen. Die dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht wird dabei im Normalfall messtechnisch nach dem in DIN EN 29052-1 [32] beschriebenen Verfahren ermittelt, da dies das einzige genormte Messverfahren ist, das für diesen Zweck zur Verfügung steht. Das Problem dabei besteht darin, dass DIN EN 29052-1 eigentlich für Trittschalldämmstoffe unter schwimmenden Estrichen und nicht für Wärmedämmstoffe konzipiert wurde. Die Messung erfolgt deshalb bei Frequenzen, die weit unterhalb der Resonanzfrequenzen üblicher Wärmedämmsysteme liegen, so dass der gemessene Wert der dynamischen Steifigkeit – wegen der Frequenzabhängigkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls – teilweise erheblich vom tatsächlichen Wert bei der Resonanzfrequenz des Dämmsystems abweicht. Da die dynamischen Steifigkeit der meisten Wärmedämmstoffe mit der Frequenz anwächst, hat dies zur Folge, dass die nach Gl. (5) unter Verwendung der nach DIN EN 29052-1 gemessenen Steifigkeit berechnete Resonanzfrequenz häufig erheblich unter dem tatsächlichen Wert liegt.

Dies wird ersichtlich, wenn man die tatsächliche Resonanzfrequenz des Dämmsystems und den aus der dynamischen Steifigkeit berechneten Wert einander gegenüberstellt. Der tatsächliche Wert der Resonanzfrequenz kann im Allgemeinen recht zuverlässig aus der Schalldämmkurve (oder genauer gesagt aus dem Frequenzverlauf der Verbesserung ΔR) abgelesen werden, da er dem Minimum des durch die Resonanz hervorgerufenen Dämmungseinbruchs entspricht.

Ein entsprechender Vergleich ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Wie gut zu erkennen ist, liegt die tatsächliche Resonanzfrequenz – abgesehen von den Dämmsystemen mit sehr weicher Dämmschicht – erwartungsgemäß

über dem berechneten Wert, wobei der Unterschied mit zunehmender Resonanzfrequenz deutlich anwächst.

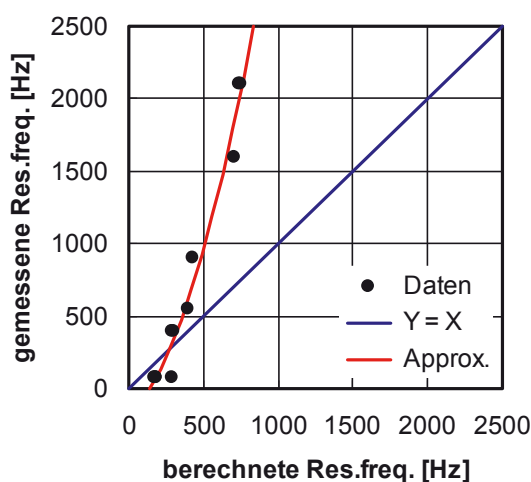


Bild 34:

Vergleich der tatsächlichen, aus dem Frequenzverlauf der gemessenen Schalldämmung abgelesenen Resonanzfrequenz der untersuchten Dämmsysteme (hier als gemessene Resonanzfrequenz bezeichnet) und den aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht nach Gl. (5) berechneten Werten.

Da die untersuchten Dämmsysteme aus unterschiedlichen Dämmstoffen (Polystyrol, Mineralwolle, Mineraldämmplatten) bestanden, würde man eigentlich erwarten, dass sich für jeden Dämmstoff ein anderer Zusammenhang zwischen gemessener und berechneter Resonanzfrequenz ergibt, denn die Frequenzabhängigkeit der dynamischen Steifigkeit ist eine materialabhängige Eigenschaft. Überraschender Weise lässt sich der Zusammenhang jedoch für alle untersuchten Systeme in guter Näherung durch eine einheitliche Kurve beschreiben, die in der Abbildung als rote Linie eingezeichnet ist. Die entsprechende Formel für den Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Resonanzfrequenz, $f_{0,\text{mess}}$, und dem nach Gl. (5) aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht berechneten theoretischen Wert, $f_{0,\text{rech}}$, lautet:

$$f_{0,\text{mess}} = 0,0027 \times f_{0,\text{rech}}^2 + 0,9352 \times f_{0,\text{rech}} - 181. \quad (9)$$

Die obige Polynomapproximation, in die die Frequenz in Hz einzusetzen ist, gilt für berechnete Resonanzfrequenzen im Bereich $170 \text{ Hz} \leq f_{0,\text{rech}} \leq 770 \text{ Hz}$. Obgleich über den theoretischen Hintergrund nur wenig bekannt ist und die Formel allein auf einem empirischen Ansatz beruht, ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung mit den ermittelten Messwerten. Dies ermöglicht es, unabhängig von der Art des Dämmstoffs, aus dem aus der dynamischen Steifigkeit berechneten scheinbaren Wert der Resonanzfrequenz die tatsächliche Frequenz der Resonanz mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit zu ermitteln. Da die tatsächliche Resonanzfrequenz die wichtigste Grundlage für das nachfolgende beschriebene Vorhersagemodell bildet, stellt die obige Formel einen zentralen Baustein des Prognoseverfahrens dar.

9.2 Zusammenhang zwischen Längs- und Durchgangsdämmung

Wärmedämmsysteme beeinflussen gleichermaßen Durchgangs- und Schall-Längsdämmung der Außenwand. Zwischen der resultierenden Verbesserung der Schalldämmung in Durchgangsrichtung, ΔR_w , und der Verbesserung der Schall-Längsdämmung, $\Delta D_{n,f,w}$, besteht theoretisch (für zwei gleiche Dämmsysteme beidseits der Trennwand in Sende- und Empfangsraum) der einfache Zusammenhang [9, 36]:

$$\Delta D_{n,f,w} = 1,5 \times \Delta R_w. \quad (10)$$

Es genügt also im Prinzip, die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes (in Durchgangsrichtung der Wand) zu berechnen, um daraus auf einfache Weise mittels der obigen Gleichung die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz (in Längsrichtung) zu ermitteln. Allerdings muss hierfür zunächst überprüft werden, wie gut die Gleichung in der Praxis bei innenliegenden Dämmsystemen funktioniert. Um dies zu untersuchen, wurden die aus den ermittelten Messdaten abgeleiteten Werte von ΔR_w und $\Delta D_{n,f,w}$ im nachfolgenden Diagramm gemeinsam aufgetragen:

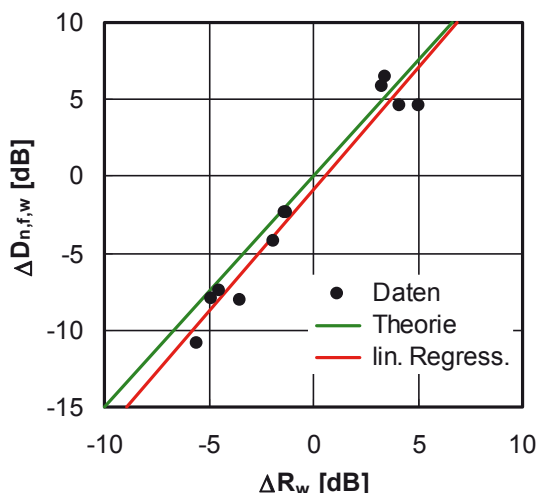


Bild 35:

Zusammenhang zwischen der gemessenen Verbesserung der Schalldämmung der Außenwand in Durchgangs- und in Längsrichtung, ΔR_w und $\Delta D_{n,f,w}$, im Vergleich zur theoretischen Beziehung zwischen den beiden Größen. Die grüne Linie mit der Beschriftung „Theorie“ bezeichnet die theoretische Beziehung $\Delta D_{n,f,w} = 1,5 \times \Delta R_w$. Die rote Linie mit der Bezeichnung „lin. Regress.“ entspricht der für die dargestellten Messwerte berechneten Regressionsgerade.

Wie aus Bild 35 zu ersehen ist, beschreibt der theoretische Ausdruck $\Delta D_{n,f,w} = 1,5 \times \Delta R_w$ (grüne Linie) den zwischen den beiden Größen vorhandenen Zusammenhang schon recht gut. Eine noch bessere Übereinstimmung im Mittel über alle Systeme ergibt sich jedoch, wenn man eine Regressionsgerade durch die Schar der vorhandenen Messwerte legt (rote Linie in der Abbildung). Dies wirkt sich zwar nicht auf die Streuung der Werte aus (die Standardabweichung beträgt in beiden Fällen $\sigma = 1,4$ dB), durch die lineare Regression wird jedoch die

mittlere Abweichung zu Null, die ansonsten (bei Anwendung der Beziehung $\Delta D_{n,f,w} = 1,5 \times \Delta R_w$) einen Wert von 0,9 dB aufweisen würde. Für einige Systeme ergeben sich dadurch etwas schlechtere Werte als gemessen. Die Gleichung für die dargestellte Regressionsgerade lautet:

$$\Delta D_{n,f,w} = 1,582 \times \Delta R_w - 0,9 \text{ dB.} \quad (11)$$

Für die weiteren Berechnungen im Rahmen des zu entwickelnden Prognoseverfahrens wird zur Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit ausschließlich die lineare Regression nach Gl. (11) verwendet. Bei der Prognose wird zunächst die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Außenwand in Durchgangsrichtung, ΔR_w , berechnet und aus diesem Wert anschließend mit Gl. (11) die zugehörige Verbesserung in Längsrichtung, $\Delta D_{n,f,w}$, bestimmt.

9.3 Vorhandene Berechnungsmodelle

Vor der Entwicklung neuer Berechnungsverfahren ist sinnvoll, zunächst festzustellen, ob bereits vorhandene Verfahren existieren, die die Zusammenhänge mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Derzeit gibt es zwei verschiedene Verfahren, um den Einfluss von Dämmsystemen auf die Schalldämmung von Außenwänden zu bestimmen. Das Ergebnis der Berechnung besteht in beiden Fällen in der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das Dämmsystem, ΔR_w :

- Das in der neuen DIN 4109-34 [8] in Abschnitt 4.1.4 beschriebene Berechnungsverfahren ist im Prinzip (bis auf geringe Unterschiede im Detail) identisch mit dem in E DIN EN ISO 12354-1 [9] in Abschnitt D.2.2 enthaltenen Modell. Für die folgenden Berechnungen wird das Verfahren aus DIN 4109 verwendet, das in Tabelle 7 in tabellarischer Darstellungsweise wiedergegeben ist. Als Eingangsdaten für die Berechnung werden lediglich die Resonanzfrequenz des Dämmsystems, f_0 , sowie das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand, R_w , benötigt. Da das Verfahren ursprünglich für freistehende Vorsatzschalen entwickelt wurde, ist es zwar näherungsweise auch für Dämmsysteme in Verbundbauweise anwendbar. In diesem Fall ist allerdings, wie später noch gezeigt wird, von einer deutlich verminderten Berechnungsgenauigkeit auszugehen.
- Neben dem oben erwähnten Berechnungsverfahren aus DIN 4109, das wie schon erwähnt in erster Linie für freistehende Vorsatzschalen konzipiert wurde, gibt es noch ein weiteres Berechnungsmodell, das im IBP vor einigen Jahren speziell für Wärmedämm-Verbundsysteme entwickelt wurde und z. B. im Bereich der bauaufsichtlichen Zulassung eingesetzt wird. Dieses Modell ist wesentlich detaillierter als das einfache Verfahren aus DIN 4109 und berücksichtigt neben der Resonanzfrequenz und der Schalldämmung der Trägerwand unter anderem auch den Einfluss der Klebefläche und der Verdübelung. Es ist jedoch auf Dämmschichten aus Polystyrol und Mineralfaser beschränkt, so dass es nur für einen Teil der hier untersuchten Innendämmsysteme anwendbar ist (Systeme aus Perlite und Porenbeton sowie auch ausschließlich mit Dübeln befestigte Systeme lassen sich damit

nicht berechnen). Obwohl das Modell deshalb im vorliegenden Fall nicht eingesetzt werden kann, können damit doch zumindest für die Systeme, bei denen die Anwendung möglich ist, probeweise Berechnungen durchgeführt werden. Da die Berechnungsformeln recht umfangreich sind und das Modell abgesehen von den Probeberechnungen später nicht mehr benötigt wird, wird auf die Darstellung der Formeln verzichtet. Eine detaillierte Darstellung des Modells und der Formeln ist dem Forschungsbericht B-BA 1/2014 des IBP [5] sowie auch der Technische Systeminfo 7 des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. [7] zu entnehmen.

Tabelle 7:

Berechnungsmodell für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Wänden durch Vorsatzschalen, ΔR_w , nach DIN 4109-34, Abschnitt 4.1.4. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz der Vorsatzschale, f_0 , und dem bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand, R_w .

Spalte	1	2
Zeile	Resonanzfrequenz f_0 der Vorsatzkonstruktion Hz	ΔR_w dB
1	$30 \leq f_0 \leq 160$	$\max\left\{\begin{matrix} 74,4 - 20 \lg f_0 - 0,5 R_w \\ 0 \end{matrix}\right.$
2	200	-1
3	250	-3
4	315	-5
5	400	-7
6	500	-9
7	630 bis 1 600	-10
8	$> 1\ 600 \leq 5\ 000$	-5

Die mit den beiden oben beschriebenen Verfahren berechneten Werte sind in der nachfolgenden Abbildung im Vergleich zu den gemessenen Werten dargestellt. Bei der Berechnung nach DIN 4109 wurden die Rechenwerte zur Verbesserung der Genauigkeit zwischen den in Tabelle 7 aufgeführten Stützstellen interpoliert. Beim dem WDVS-Modell erfolgte die Berechnung im Gegensatz zu DIN 4109 nicht mit der tatsächlichen, sondern mit der aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht berechneten Resonanzfrequenz, da dies im Modell so vorgesehen ist (der Grund dafür besteht darin, dass die tatsächliche Resonanzfrequenz für die Prognose der Schalldämmung zumeist nicht zur Verfügung steht, da noch keine Messdaten vorliegen, so dass die Resonanzfrequenz ersatzweise aus der dynamischen Steifigkeit ermittelt werden muss).

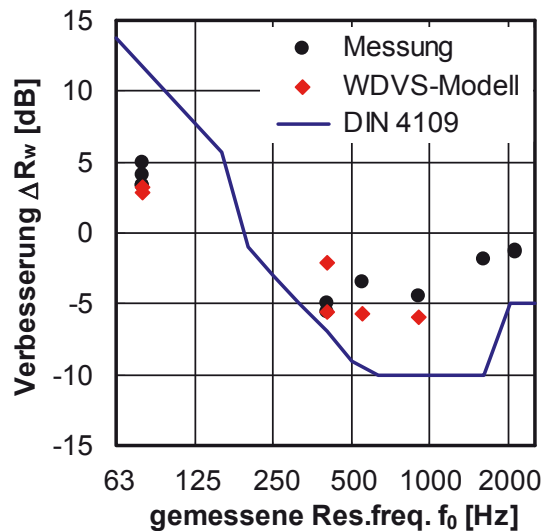


Bild 36:

Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch die untersuchten Innendämmsysteme in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz der Systeme. Neben den Messwerten sind die nach DIN 4109 berechnete Kurve und die mit dem WDV5-Modell aus B-BA 1/2014 berechneten Werte dargestellt.

Wie sich aus Bild 36 entnehmen lässt, bestehen zwischen den nach DIN 4109 berechneten Werten und den Messergebnissen erhebliche Abweichungen. Das WDV5-Modell beschreibt die gemessenen Werte erheblich besser, ist aber leider nur bei einem Teil der marktüblichen Innendämmsysteme anwendbar. Im vorliegenden Fall ist daher keines der beiden Berechnungsverfahren geeignet und es muss statt dessen ein neues Verfahren entwickelt werden.

9.4 Näherungsformel für die Verbesserung der Schalldämmung

Wegen des großen baulichen und experimentellen Aufwandes waren im Rahmen des Forschungsvorhabens insgesamt nur Messungen an dreizehn verschiedenen Innendämmsystemen möglich. Da zwei der Systeme wegen nicht repräsentativer Montagebedingungen und stark abweichender Messergebnisse als Datengrundlage nicht geeignet waren, standen für die Entwicklung des Berechnungsmodells letztlich nur elf Datensätze zur Verfügung. Gleichzeitig bestanden zwischen den elf verwendeten Systemen große Unterschiede, da fünf verschiedene Dämmstoffe (Polystyrol, Mineralwolle, Holzwolle-Mehrschichtplatten, Mineraldämmplatten) sowie mehrere unterschiedliche Arten der Befestigung (nur Klebstoff, Klebstoff und Dübel, nur Dübel) vertreten waren. Diese Vielfalt war einerseits beabsichtigt, um mit den Untersuchungen alle marktüblichen Konstruktionen abzudecken, erschwerte die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens jedoch andererseits erheblich.

Da eine detaillierte Betrachtung der verschiedenen akustischen Einflussgrößen wegen der geringen Menge an Messdaten und der großen Vielfalt der untersuchten Dämmsysteme nicht möglich war, musste sich die Modellierung auf die wichtigste akustische Einflussgröße – die Resonanzfrequenz der Dämmsysteme

– beschränken. Wie aus der nachfolgenden Abbildung hervorgeht, ergibt sich jedoch trotz dieser Beschränkung eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung, wenn die für die Verbesserung der Schalldämmung gemessenen Werte mit einer geeigneten Polynomapproximation nachgebildet werden.

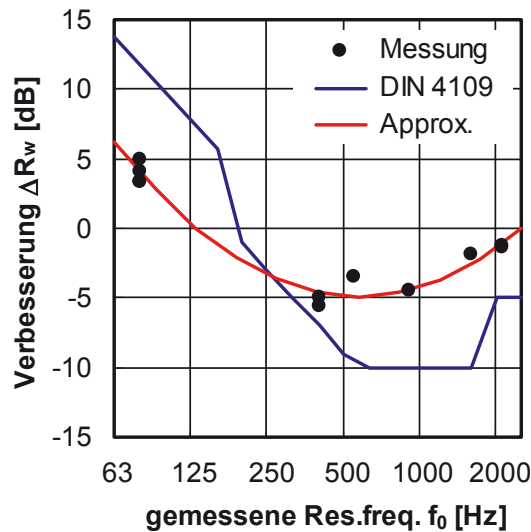


Bild 37:

Beschreibung der Messdaten (Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch die Dämmsysteme, ΔR_w) durch eine geeignete Polynomapproximation in Abhängigkeit von der gemessenen Resonanzfrequenz der Systeme. Neben der Polynomapproximation (rote Kurve) ist zum Vergleich außerdem die Berechnung nach DIN 4109-34, Abschnitt 4.1.4 als blaue Kurve dargestellt.

Die Formel für die oben dargestellte Polynomapproximation, die Verbesserung der Schalldämmung in Abhängigkeit vom Logarithmus der Resonanzfrequenz beschreibt, lautet:

$$\Delta R_w = 11,94 \times (\lg(f_0))^2 - 65,92 \times \lg(f_0) + 86,1 \quad (12)$$

In diese Gleichung (mit ΔR_w in dB und f_0 in Hz) ist für f_0 die tatsächliche (also gemessene) Resonanzfrequenz des Dämmsystems einzusetzen. Für die Abweichung zwischen Rechnung und Messung ergibt sich folgende Statistik:

größte positive Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	1,0 dB,
größte negative Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	-1,4 dB,
Standardabweichung:	0,7 dB,
mittlere Abweichung:	0,0 dB.

Die Polynomapproximation beschreibt die Messdaten also tatsächlich sehr gut.

9.5 Darstellung des entwickelten Berechnungsmodells

Mit den in den vorangehenden Abschnitten abgeleiteten Näherungsformeln stehen alle erforderlichen Gleichungen zur Berechnung der Schalldämmung von Wänden mit Innendämmung zur Verfügung. Die Formeln müssen lediglich aufeinander abgestimmt und in der richtigen Reihenfolge angewandt werden, damit ein einheitliches Gesamtmodell entsteht. Im Folgenden wird dieses Modell genauer erläutert, um den Anwendern eine einfache Durchführung der Berechnungen zu ermöglichen.

Da die Berechnungen in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten erfolgen, werden die einzelnen Schritte zunächst in verkürzter Form in einer Übersicht dargestellt. Anschließend werden die verschiedenen Berechnungsschritte mit den zugehörigen Formeln dann nacheinander im Detail erläutert. Im Sinne einer besseren Übersicht sind dabei alle für die Berechnung erforderlichen Formeln aufgeführt, so dass einige Formeln, die schon weiter vorne beschrieben wurden, hier ein zweites Mal zu finden sind.

9.5.1 Erforderliche Eingangsdaten

Als Eingangswerte für das Berechnungsmodell werden lediglich zwei Werte benötigt:

- a) die flächenbezogene Masse der innenseitigen Bekleidung des Dämmsystems und
- b) die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht.

Ist die dynamische Steifigkeit nicht bekannt, so kann sie nach folgender Beziehung aus dem Elastizitätsmodul des Dämmstoffs bestimmt werden:

$$s' = E/d \quad (13)$$

mit:	s'	=	dynamische Steifigkeit der Dämmschicht	[MN/m ³],
	d	=	Dämmstoffdicke	[m],
	E	=	Elastizitätsmodul des Dämmstoffs	[MN/m ²].

Obgleich Dämmstoffe aus gleichem Material abhängig von den Herstellungsbedingungen unterschiedliche elastische Eigenschaften aufweisen können, kann in vielen Fällen als Abschätzung ein mittlerer Wert herangezogen werden. In der nachfolgenden Tabelle ist der Mittelwert des Elastizitätsmoduls für verschiedene Arten von Dämmstoffen angegeben. Die in der Tabelle enthaltenen Werte wurden durch Auswertung des Datenbestandes des IBP ermittelt (insgesamt ca. 200 Messungen). Soweit vorhanden sind auch die wichtigsten statistischen Angaben zu den Messdaten (Standardabweichung und Wertebereich) mit aufgeführt.

Tabelle 8:

Mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul für verschiedene Wärmedämmstoffe als Bestandteile von Wärmedämm-Verbundsystemen. Die Werte wurden im IBP durch Messungen nach DIN EN 29052-1 [32] ermittelt.

Material	dyn. Elastizitätsmodul E_{dyn} [MN/m ²]		
	Mittelwert	Standardabweich.	Wertebereich
EPS	3,0	1,7	1,2 – 6,0
elastifiziertes EPS	0,7	0,2	0,5 – 1,0
Mineralfaser-Putzträgerplatten ¹⁾	0,5	0,1	0,4 – 0,8
Mineralfaser-Lamellenplatten ²⁾	6,3	2,9	1,1 – 14,0
Perlite	14,5	---	---
Porenbeton	21,4	---	---

1) Faserrichtung parallel zur Plattenoberfläche

2) Faserrichtung senkrecht zur Plattenoberfläche

Da Holzwolle-Mehrschichtplatten im Kernbereich aus Mineralfaser bestehen, kann hierfür näherungsweise der Elastizitätsmodul von Mineralfaser angesetzt werden.

9.5.2 Übersicht über die Berechnungsschritte

Zur Berechnung von ΔR_w und $\Delta D_{n,f,w}$ (Verbesserung der Schalldämmung der Außenwand durch das Dämmsystem in Durchgangs- und in Längsrichtung der Wand) sind folgende Schritte erforderlich:

- 1) Berechnung der scheinbaren Resonanzfrequenz des Dämmsystems, $f_{0,rech}$, aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht und der flächenbezogenen Masse der Bekleidung.
- 2) Umrechnung der scheinbaren Resonanzfrequenz, $f_{0,rech}$, in den tatsächlichen Wert der Resonanzfrequenz, $f_{0,mess}$.
- 3) Berechnung der Verbesserung der Schalldämmung in Durchgangsrichtung der Wand, ΔR_w , aus der tatsächlichen Resonanzfrequenz.
- 4) Anpassung der in Schritt 3) ermittelten Verbesserung an das Schalldämmmaß der Außenwand.
- 5) Umrechnung der Verbesserung in Durchgangsrichtung aus Schritt 4) in die Verbesserung in Längsrichtung der Wand, $\Delta D_{n,f,w}$.

Die Anpassung in Schritt 4) ist erforderlich, weil sich die vorangehenden Berechnungsschritte auf die bei der durchgeführten Messreihe im Prüfstand des IBP vorhandene bauliche Situation, d. h. auf eine Außenwand mit einem bewerteten Schalldämmmaß von $R_w \cong 49$ dB beziehen. Die akustische Wirkung von Dämmsystemen hängt jedoch in erheblichem Maße von der Schalldämmung

der Grundwand ab. Soll die Berechnung daher für eine andere Außenwand erfolgen, muss der in Schritt 3) für ΔR_w ermittelte Wert entsprechend angepasst werden.

Die oben dargestellten Berechnungsschritte schließen jeweils aneinander an und müssen daher in der aufgeführten Reihenfolge durchgeführt werden. Die genaue Vorgehensweise bei den einzelnen Schritten ist nachfolgend beschrieben.

9.5.3 Berechnung der scheinbaren Resonanzfrequenz

Die genaue Beziehung zur Berechnung der Resonanzfrequenz des Dämmsystems aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht lautet:

$$f_{0,\text{rech}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_B} + \frac{1}{m''_W} \right)} \quad (14)$$

mit: s' = dynamische Steifigkeit der Dämmschicht [MN/m³],
 m''_B = flächenbezogene Masse der innenseitigen Bekleidung des Dämmsystems (z. B. Gipskartonplatte oder Putz) [kg/m²],
 m''_W = flächenbezogene Masse der Grundwand [kg/m²].

In der Praxis hat die Bekleidung des Dämmsystems in aller Regel eine weit geringere Masse als die Wand, d. h. es gilt $m''_B \ll m''_W$. Unter dieser Voraussetzung geht die obige Formel in die vereinfachte Zahlenwertgleichung

$$f_{0,\text{rech}} \cong 160 \sqrt{s'/m''_B} \text{ Hz} \quad (15)$$

über, in die die dynamische Steifigkeit s' in MN/m³ und die flächenbezogene Masse der Bekleidung m''_B in kg/m² einzusetzen sind.

Im vorliegenden Fall stellt Gl. (15) die geeignete Formel zur Berechnung der Resonanzfrequenz $f_{0,\text{rech}}$ dar. Welche Werte von $f_{0,\text{rech}}$ in der Praxis für innenseitige Dämmsystem zu erwarten sind, lässt sich der nachfolgenden Abbildung entnehmen. Für den typischen Fall von $s' = 10 \text{ MN/m}^3$ (entspricht in etwa einer 40 mm dicken Dämmschicht aus Mineralwolle) und $m''_B = 10 \text{ kg/m}^2$ ergibt sich eine Resonanzfrequenz von $f_{0,\text{rech}} = 160 \text{ Hz}$.

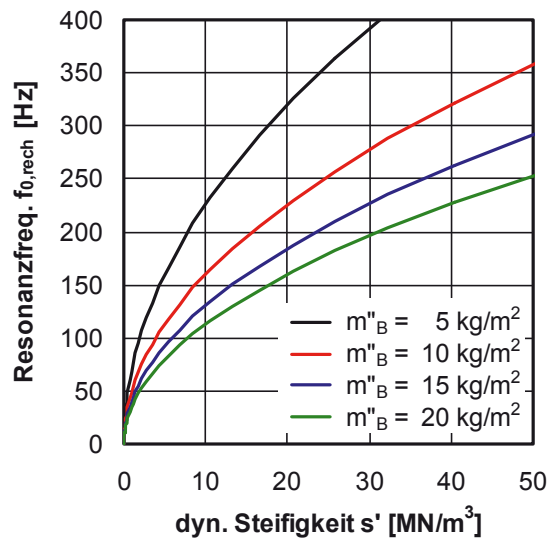


Bild 38:

Berechnete Resonanzfrequenz von Dämmsystemen, $f_{0,rech}$, in Abhängigkeit von der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht s' und der flächenbezogenen Masse der Bekleidung m''_B . Die Berechnung erfolgte nach Gl. (15).

9.5.4 Umrechnung der scheinbaren in die tatsächliche Resonanzfrequenz

Wie oben erläutert wurde, ist die tatsächliche Resonanzfrequenz des Dämmsystems vielfach erheblich höher als der mit Gl. (15) aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht berechnete scheinbare Wert. Dies gilt insbesondere für hohe Werte der Resonanzfrequenz. Es ist deshalb erforderlich, die scheinbare Resonanzfrequenz, $f_{0,rech}$, durch entsprechende Umrechnung in den tatsächlichen Wert am Bau, $f_{0,mess}$, zu überführen. Die entsprechende Berechnungsformel (mit der Frequenz in Hz) lautet:

$$f_{0,mess} = 0,0027 \times f_{0,rech}^2 + 0,9352 \times f_{0,rech} - 181. \quad (16)$$

Die obige Gleichung ist für $170 \text{ Hz} \leq f_{0,rech} \leq 770 \text{ Hz}$ anwendbar.

9.5.5 Berechnung der Verbesserung in Durchgangsrichtung

Die Schalldämmung der Außenwand in Durchgangsrichtung (d. h. von außen nach innen) wird durch das bewertete Schalldämm-Maß R_w beschrieben. Die Verbesserung von R_w durch das Dämmsystem, ΔR_w , lässt sich näherungsweise aus der im vorangehenden Abschnitt ermittelten tatsächlichen Resonanzfrequenz, $f_{0,mess}$, berechnen:

$$\Delta R_w = 11,94 \times (\lg(f_{0,mess}))^2 - 65,92 \times \lg(f_{0,mess}) + 86,1. \quad (17)$$

Hierbei bezeichnet $\lg(f_{0,mess})$ den dekadischen Logarithmus der Resonanzfrequenz. Die Frequenz ist in Hz in die Gleichung einzusetzen. Als Ergebnis erhält man die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes in dB.

9.5.6 Anpassung der Verbesserung an die Schalldämmung der Grundwand

Die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes einer Wand durch ein Dämmsystem wird nicht nur von der Beschaffenheit der Dämmung bestimmt, sondern hängt auch vom Schalldämm-Maß der Grundwand ab. Dies ist weniger auf eine physikalische Wechselwirkung zwischen Dämmsystem und Wand, als vielmehr auf das Zusammenspiel der entsprechenden Frequenzspektren zurückzuführen. Erfolgt die Verbesserung durch das Dämmsystem beispielsweise in einem Frequenzbereich, in dem die Wand ohnehin schon eine hohe Schalldämmung aufweist, so ändert sich das bewertete Schalldämm-Maß nur wenig. Fällt die Verbesserung hingegen in einen Bereich mit niedriger Schalldämmung, so hat dies einen starken Anstieg des bewerteten Schalldämm-Maßes zur Folge (die Einzelheiten dieses Effekts sind in [7] und in [10] erläutert).

Die in der obigen Gl. (17) dargestellte Berechnungsformel wurde für eine Außenwand mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von $R_w \cong 49$ dB abgeleitet (entspricht der bei der durchgeführten Messreihe im Prüfstand des IBP vorhandenen Bausituation). Soll die Berechnung für eine Außenwand mit anderer Schalldämmung erfolgen, so muss die mit Gl. (17) berechnete Verbesserung entsprechend angepasst werden. Die Anpassung erfolgt durch die Addition eines Korrekturwertes K_G (der Index G bezeichnet hierbei den akustischen Einfluss der Grundwand). Die entsprechende Formel für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ΔR_w in Abhängigkeit vom dekadischen Logarithmus der Resonanzfrequenz, $\lg(f_{0,rech})$, lautet:

$$\Delta R_w = \Delta R_{w,49} + K_G$$

$$\text{mit } K_G = (1,4 \lg(f_{0,rech}) - 3,6) (R_w - 49) \quad (18)$$

mit: $\Delta R_{w,49}$ = mit Gl. (17) berechnete Verbesserung der Schalldämmung (bezogen auf eine Grundwand mit $R_w = 49$ dB) [dB],

$f_{0,rech}$ = mit Gl. (15) berechnete scheinbare Resonanzfrequenz [Hz],

R_w = bewertetes Schalldämm-Maß der betrachteten Grundwand [dB].

Die Herleitung des obigen Ausdrucks für K_G erfolgte im Forschungsbericht B-BA 6/2002 des IBP [1] über die akustischen Eigenschaften von Wärmedämm-Verbundsystemen. Für die hier betrachteten Innendämmsysteme mit $170 \text{ Hz} \leq f_{0,rech} \leq 770 \text{ Hz}$ liegt K_G etwa im Bereich von $-5 \text{ dB} \leq K_G \leq 5 \text{ dB}$. Für Wände mit $R_w = 49$ dB beträgt der Korrekturwert selbstverständlich $K_G = 0$. Die Abhängigkeit von K_G von der berechneten Resonanzfrequenz des Dämmsystems und dem bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand ist in Bild 39 exemplarisch dargestellt:

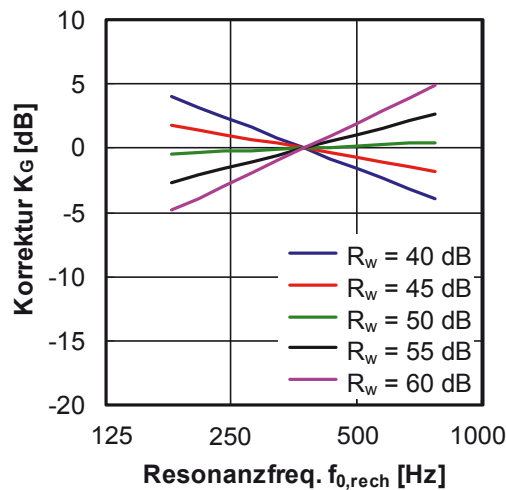


Bild 39:

Abhängigkeit der Korrektur K_G aus Gl. (18) von der berechneten Resonanzfrequenz des Dämmsystems, $f_{0,rech}$, und dem bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand, R_w .

9.5.7 Berechnung der Verbesserung in Längsrichtung

Ist die Verbesserung der Schalldämmung in Durchgangsrichtung, ΔR_w bekannt, so kann aus dem mit Gl. (18) ermittelten ΔR_w -Wert die Verbesserung in Längsrichtung (Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz der Wand durch das Dämmsystem, $\Delta D_{n,f,w}$) berechnet werden. Die Berechnung erfolgt nach folgender Beziehung:

$$\Delta D_{n,f,w} = 1,582 \times \Delta R_w - 0,9 \text{ dB.} \quad (19)$$

Die obige Beziehung gilt unter der Voraussetzung, dass die Außenwand beidseits der Trennwand zwischen Sende- und Empfangsraum über (gleichartige) Innendämmsysteme verfügt. Ist nur einer der beiden Räume gedämmt, so gilt (gleichgültig, ob sich die Dämmung im Sende- oder im Empfangsraum befindet) statt Gl. (19) die vereinfachte Beziehung $\Delta D_{n,f,w} \cong \Delta R_w$.

9.5.8 Anwendungsbereich und Berechnungsgenauigkeit

Der Anwendungsbereich des beschriebenen Berechnungsmodells erstreckt sich auf berechnete Resonanzfrequenzen im Bereich von $170 \text{ Hz} \leq f_{0,rech} \leq 770 \text{ Hz}$. Dies deckt die meisten marktüblichen Innendämmsysteme ab. Liegt die berechnete Resonanzfrequenz außerhalb des angegebenen Bereichs, so kann die Berechnung – vorausgesetzt, dass der Unterschied nicht zu groß ist – in erster Näherung ersatzweise für den benachbarten Endwert des Anwendungsbereichs erfolgen.

Abgesehen von den erwähnten Einschränkungen hinsichtlich der Resonanzfrequenz ist das Berechnungsmodell – unabhängig von der Art des Dämmstoffs und der Befestigungsweise – im Prinzip für alle bauüblichen Innendämmsysteme anwendbar, soweit es sich dabei um Verbundsysteme handelt. Lediglich

für Dämmsysteme, die ohne Klebstoff ausschließlich mit Dübeln an der Wand befestigt werden, ist das Modell nicht geeignet, da sich hier große Abweichungen zwischen Rechnung und Messung ergeben können. Auf diesen Punkt wird unten noch genauer eingegangen.

Um die Genauigkeit des Berechnungsmodells zu überprüfen, wurde die Verbesserung der Schalldämmung für die untersuchten Innendämmsysteme berechnet und mit den hierfür ermittelten Messwerten verglichen. Da alle Messungen an derselben Außenwand mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von $R_w \cong 49$ dB erfolgten, wies der Korrekturwert K_G nach Gl. (18) in allen Fällen einen Wert von $K_G = 0$ auf. Der Einfluss von K_G ist somit nicht in der nachfolgend dargestellten Berechnungsgenauigkeit enthalten. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit Wärmedämm-Verbundsystemen ist jedoch davon auszugehen, dass K_G keine wesentliche Verschlechterung der Genauigkeit bewirkt [1, 5, 7].

Aus den in der nachfolgenden Abbildung für die Verbesserung der Durchgangsdämmung, ΔR_w , dargestellten Mess- und Berechnungsergebnisse ist zu entnehmen, dass zwischen Messung und Rechnung im Allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung besteht. Eine Ausnahme bildet lediglich eines der beiden Dämmsysteme mit einer Resonanzfrequenz von $f_{0,rech} = 290$ Hz, bei dem das Messergebnis etwa 8 dB über der berechneten Verbesserung liegt. Das betreffende System besteht aus Holzwolle-Mehrschichtplatten, die nur mit Dübeln (also ohne Klebstoff) an der Wand befestigt wurden. Für diesen spezielle Art der Befestigung ist das entwickelte Berechnungsmodell offensichtlich nicht anwendbar, was vermutlich vor allem auf zwei Ursachen zurückzuführen ist:

- Bei der Befestigung mit Dübeln entstehen zwischen der Bekleidung des Dämmsystems und der Wand lokal starre Verbindungen (in der Bauakustik spricht man von Körperschallbrücken), die die Schwingungen der Bekleidung unterbinden. Das Dämmsystem verhält sich im Bereich der Dübel daher nicht mehr wie ein Masse-Feder-System, weshalb das verwendete Berechnungsmodell, das auf diesem Grundprinzip beruht, hier nicht mehr ohne Weiteres anwendbar ist.
- Wird das Dämmsystem statt mit Klebemörtel ausschließlich mit Dübeln befestigt, so ergibt sich kein gleichmäßiger flächiger Kontakt, sondern lediglich eine punktförmige Verbindung im Bereich der Dübel. Zwischen den Dübeln sind die Befestigungsbedingungen hingegen weitgehend undefiniert und hängen von unterschiedlichen Faktoren, wie z. B. dem Anzugsmoment der Befestigungsschrauben oder der Oberflächenrauigkeit der Wand, ab. Da sich der Kontakt zwischen Dämmschicht und Wand in starkem Maße auf die akustischen Eigenschaften des Systems auswirkt, ist die rechnerische Beschreibung angesichts der undefinierten und nicht reproduzierbaren Verhältnisse naturgemäß mit großen Schwierigkeiten verbunden.

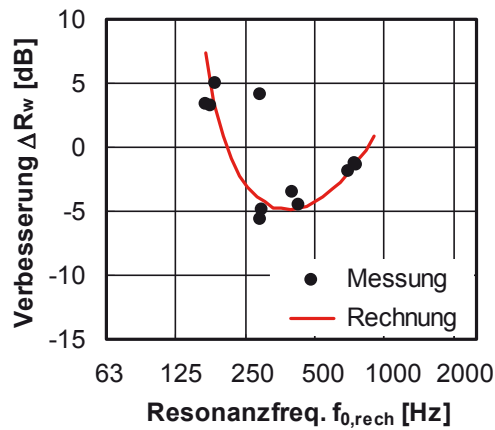


Bild 40:

Vergleich der für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Außenwand durch die Innendämmung, ΔR_w , gemessenen und berechneten Werte. Die Berechnung erfolgte mit dem in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Prognoseverfahren.

Blendet man das erwähnte Dämmsystem aus Holzwolle-Mehrschichtplatten mit Dübel-Befestigung aus der Betrachtung aus, so ergeben sich für die Abweichung zwischen Rechnung und Messung bei ΔR_w folgende statistischen Kennwerte:

größte positive Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	3,9 dB,
größte negative Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	-1,6 dB,
Standardabweichung:	1,6 dB,
mittlere Abweichung:	0,4 dB.

Die Genauigkeit bei der Berechnung von ΔR_w ist damit etwas besser, als dies üblicherweise bei anderen bauakustischen Berechnungsmodellen der Fall ist (dort ist im Normalfall von einer Standardabweichung von $\sigma \cong 2,0$ dB auszugehen). Die erreichte Berechnungsgenauigkeit ist somit als durchaus befriedigend anzusehen.

Da die Verbesserung der Schalldämmung in Durchgangs- und in Längsrichtung der Wand direkt miteinander verknüpft sind, ist zu erwarten, dass die obigen Aussagen für ΔR_w im Wesentlichen auch für die Berechnung von $\Delta D_{n,f,w}$ zutreffen. Die Darstellung der Mess- und Rechenergebnisse für die Schall-Längsdämmung in der nachfolgenden Abbildung bestätigt dies. Das Dämmsystem aus Holzwolle-Mehrschichtplatten mit Dübel-Befestigung und einer berechneten Resonanzfrequenz von $f_{0,rech} = 290$ Hz, bei dem schon bei der Durchgangsdämmung eine starke Abweichung zwischen Rechnung und Messung zu verzeichnen war, zeigt bei der Längsdämmung erwartungsgemäß ein ähnliches Verhalten.

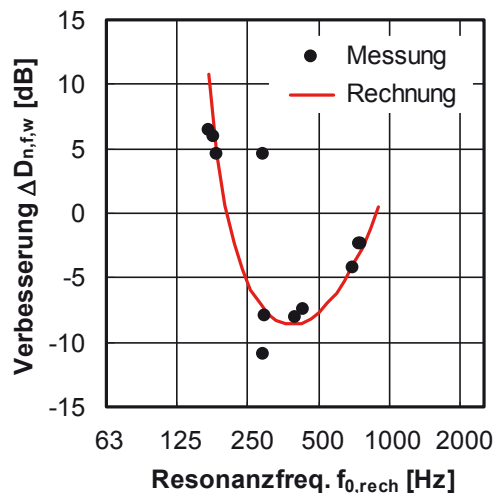


Bild 41:

Vergleich der für die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz der Außenwand durch die Innendämmung, $\Delta D_{n,f,w}$, gemessenen und berechneten Werte. Die Berechnung erfolgte mit dem in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Prognoseverfahren.

Die statistische Auswertung für $\Delta D_{n,f,w}$, (wiederum ohne Berücksichtigung des oben erwähnten Dämmsystems aus Holzwolle-Mehrschichtplatten mit Dübel-Befestigung) liefert folgende Ergebnisse:

größte positive Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	4,2 dB,
größte negative Abweichung zwischen Rechnung und Messung:	-1,1 dB,
Standardabweichung:	1,8 dB,
mittlere Abweichung:	0,6 dB.

Die Berechnungsgenauigkeit für $\Delta D_{n,f,w}$ ist somit etwas geringer als bei ΔR_w . Dies war auch nicht anders zu erwarten, da das Verfahren zur Berechnung von $\Delta D_{n,f,w}$ gegenüber ΔR_w einen zusätzlichen Berechnungsschritt umfasst. Im Vergleich zu anderen bauakustischen Berechnungsverfahren ergibt sich jedoch noch immer ein gute Genauigkeit.

9.6 Einfluss von Spektrum-Anpassungswerten

Enthält der auf die Außenwand einwirkende Schall deutlich wahrnehmbare Geräuschanteile bei tiefen Frequenzen, so beschreibt das bewertete Schalldämmmaß – wie in Abschnitt 2.2.2 bereits erläutert – die Schallschutzwirkung der Wand nur noch unzureichend. Dies ist z. B. bei städtischem Straßenverkehrslärm (bei der Schallübertragung von außen nach innen) oder bei Rock- und Popmusik (bei der Übertragung längs der Außenwand) der Fall. Statt des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w ist dann zur adäquaten Beurteilung der Schallschutzwirkung die Summe von R_w und dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$, also die Einzahlangabe $(R_w + C_{tr,50-5000})$ heranzuziehen. Im Hinblick auf die untersuchten Innendämmsysteme ist maßgebend, wie sich die Dämmung auf diese Größe auswirkt, d. h. welcher Wert sich für die Verbesserung $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ ergibt.

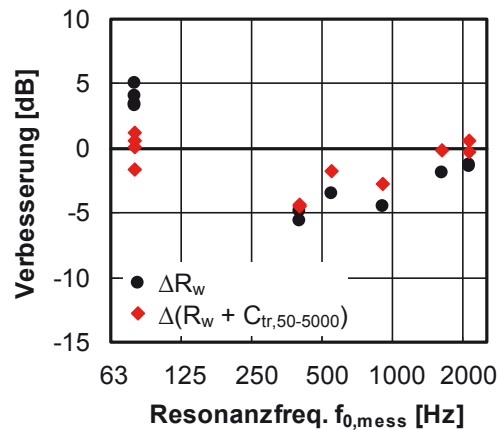


Bild 42:

Verbesserung der Durchgangsdämmung der Außenwand durch das Dämmsystem in Abhängigkeit von der gemessenen Resonanzfrequenz $f_{0,mess}$. Neben der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, ΔR_w , ist zum Vergleich auch die unter Einbeziehung des maßgebenden Spektrum-Anpassungswertes gebildete Angabe $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ mit aufgetragen.

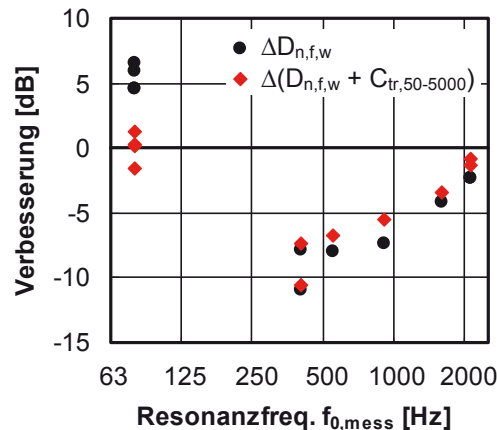


Bild 43:

Verbesserung der Längsdämmung der Außenwand durch das Dämmsystem in Abhängigkeit von der gemessenen Resonanzfrequenz $f_{0,mess}$. Neben der Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz, $\Delta D_{n,f,w}$, ist zum Vergleich auch die unter Einbeziehung des maßgebenden Spektrum-Anpassungswertes gebildete Angabe $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ mit aufgetragen.

Die für die untersuchten Dämmsysteme aus den Messdaten ermittelten Werte von ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ wurden bereits in den Tabellen 3 bis 5 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen den beiden Größen lässt sich jedoch besser zu erkennen, wenn man statt der tabellarischen eine grafische Darstellung wählt. In der nachfolgenden Abbildung wurden die beiden Angaben daher gemeinsam über der Resonanzfrequenz aufgetragen. Eine gleichartige Darstellung für die Längsdämmung (d. h. für $\Delta D_{n,f,w}$ und $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$) ist in Bild 43 enthalten.

Abgesehen davon, dass die Verbesserung der Schalldämmung in Längsrichtung der Außenwand erwartungsgemäß höher als in Durchgangsrichtung ausfällt

(dies ist darauf zurückzuführen, dass der Schall bei Ausbreitung in Längsrichtung die Dämmung zweimal durchlaufen muss), weisen die für Längs- und Durchgangsdämmung dargestellten Messergebnisse ein sehr ähnliches Verhalten auf:

- Bei niedriger Resonanzfrequenz des Dämmsystems erfolgt eine deutliche Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, die sich bei Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ allerdings nahezu auf einen Wert von Null vermindert.
- Mit ansteigender Resonanzfrequenz durchläuft die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes zunächst ein Minimum (d. h. es tritt eine starke Verschlechterung der Schalldämmung ein). Steigt die Resonanzfrequenz noch weiter an, so strebt die Verbesserung dann allmählich gegen einen Wert von Null. Wird der Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ mit in die Betrachtung einbezogen, fällt die Verschlechterung für alle Resonanzfrequenzen weniger deutlich aus, als dies beim bewerteten Schalldämm-Maß alleine der Fall ist.

Die beschriebenen Effekte entsprechen weitgehend dem von der Theorie vorhergesagten Verhalten und sind somit nicht weiter überraschend. Interessant wird es jedoch, wenn man die Verbesserungen mit und ohne Spektrum-Anpassungswert einander gegenüberstellt, d. h. $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ in Abhängigkeit von ΔR_w aufträgt. Hier zeigt sich, dass zwischen den beiden Angaben ein deutlicher Zusammenhang besteht, der sich in guter Näherung durch eine Polynom-Approximation beschreiben lässt. Neben den in Bild 44 für die Durchgangsdämmung aufgetragenen Werten gilt dies gemäß Bild 45 in ähnlicher Weise auch für die Längsdämmung.

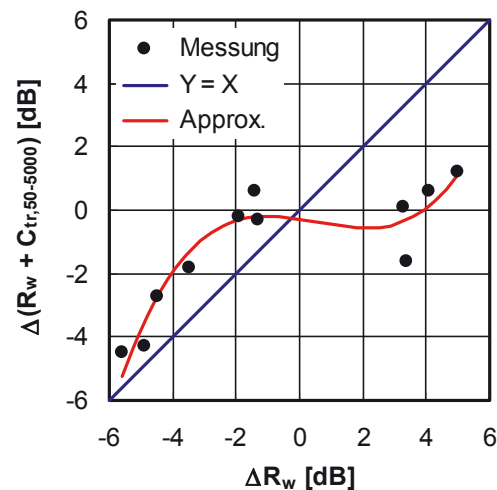


Bild 44: Verbesserung der Durchgangsdämmung der Außenwand durch das Dämmsystem: Darstellung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ in Abhängigkeit von ΔR_w . Die rote Kurve stellt eine Polynom-Approximation der aufgetragenen Messergebnisse dar.

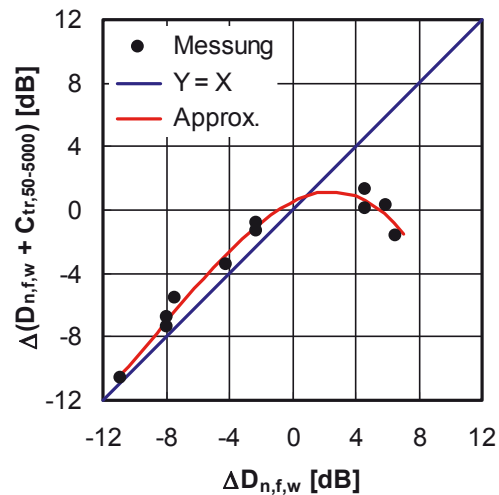


Bild 45:

Verbesserung der Längsdämmung der Außenwand durch das Dämmsystem: Darstellung von $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ in Abhängigkeit von $\Delta D_{n,f,w}$. Die rote Kurve stellt eine Polynom-Approximation der aufgetragenen Messergebnisse dar.

Die in Bild 42 eingezeichnete Polynom-Approximation lässt sich dazu nutzen, um $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ rechnerisch vorherzubestimmen. Dazu wird mit dem oben beschriebenen Prognosemodell zunächst die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, ΔR_w , bestimmt, aus der dann unter Verwendung der Polynom-Approximation der zugehörige Wert von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ ermittelt wird. Gleiches gilt sinngemäß auch für die Schallübertragung in Längsrichtung der Außenwand, d. h. für die Verbesserung $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$. Die Formeln für die zugehörige Polynom-Approximation sind in den beiden nachfolgenden Gleichungen dargestellt:

$$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) = 0,026 \times \Delta R_w^3 - 0,042 \times \Delta R_w^2 - 0,164 \times \Delta R_w - 0,28 \quad (20)$$

für $-5,6 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 5,0 \text{ dB}$, sowie

$$\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000}) = -0,0036 \times \Delta D_{n,f,w}^3 - 0,086 \times \Delta D_{n,f,w}^2 + 0,491 \times \Delta D_{n,f,w} + 0,52 \quad (21)$$

für $-11,0 \text{ dB} \leq \Delta D_{n,f,w} \leq 7,0 \text{ dB}$.

Für die Differenz zwischen Messung und Rechnung ergibt sich in beiden Fällen eine Standardabweichung von $\sigma = 0,6 \text{ dB}$. Für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bewegen sich die Abweichungen im Bereich von $-0,8 \text{ dB}$ bis $1,3 \text{ dB}$, für $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ ergibt sich ein Bereich von $-0,9 \text{ dB}$ bis $0,7 \text{ dB}$. Die beiden in Gl. (21) und Gl. (22) dargestellten Polynom-Approximationen beschreiben die Relation zwischen den betrachteten Einzahlangaben also sehr gut, so dass der entsprechende Berechnungsschritt (d. h. die Umrechnung von ΔR_w in $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bzw. von $\Delta D_{n,f,w}$ in $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$) die Genauigkeit des Gesamtmodells nur geringfügig beeinträchtigt.

9.7 Resultierende Schalldämmung am Bau

Während die Schallübertragung im Prüfstand normalerweise nur über ein einziges Bauteil (im vorliegenden Fall z. B. die Außenwand) erfolgt, sind an der Übertragung von Schall zwischen benachbarten Räumen am Bau zahlreiche verschiedene Bauteile und Wege beteiligt. Die gesetzlichen Schallschutzanforderungen in DIN 4109-1 beziehen sich auf das resultierende Schalldämm-Maß zwischen den beiden Räumen, R'_w , wobei der Apostroph zum Ausdruck bringt, dass die am Bau gemessenen Schalldämmung neben dem trennenden auch die flankierende Bauteile umfasst (man spricht deshalb auch vom Bau-Schalldämm-Maß).

Neben dem Einfluss auf die Schalldämmung der Außenwand (d. h. auf die Schallübertragung von außen nach innen) ist für die Praxis deshalb vor allem wichtig, wie sich Innendämmsysteme auf das Bau-Schalldämm-Maß R'_w zwischen den an die Wand angrenzenden Räumen auswirken. Die Bestimmung von R'_w erfolgt rechnerisch, wobei die über die vorhandenen Wege übertragene Schallanteile einzeln berechnet und zu einer Gesamtleistung aufaddiert werden, aus der anschließend das Bau-Schalldämm-Maß berechnet werden kann. Das entsprechende Berechnungsverfahren ist in DIN 4109-2 und DIN 4109-32 [36, 37] beschrieben, wo auch Angaben zu den wichtigsten Eingangsdaten (wie z. B. den Stoßstellendämm-Maßen für die Bauteilverbindungen) zu finden sind. Obgleich nach DIN EN ISO 12354-1 [9] auch frequenzabhängige Berechnungen möglich sind, beschränkt sich DIN 4109 auf Einzahlangaben, weil der Aufwand erheblich niedriger und die Berechnungsgenauigkeit nur unwesentlich geringer ist. Aus diesem Grund werden auch im Folgenden nur Einzahlangaben betrachtet.

Wie sich aus der nachfolgenden Abbildung entnehmen lässt, erfolgt die Schallübertragung zwischen benachbarten Räumen am Bau über dreizehn verschiedene Wege: den direkten Weg über die Trennwand D_d und je vier Flankenwege F_f , F_d und D_f über Boden, Decke, Außen- und Innenwand der Räume). Die Anbringung eines Innendämmsystems verändert die Schalldämmung von drei dieser Wege (rechte Seite in Bild 46), während die übrigen zehn Wege unverändert bleiben.

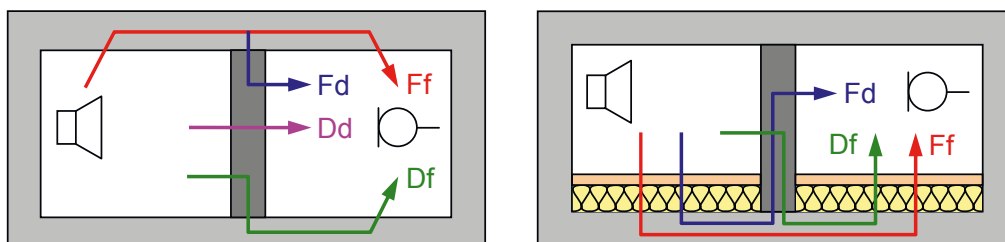


Bild 46:

Linke Seite: Schallübertragungswege zwischen benachbarten Räumen am Bau (Weg D_d und je vier Wege F_f , F_d und D_f). Rechte Seite: Die Anbringung eines Innendämmsystems wirkt sich nur auf drei der vorhandenen Wege aus: Weg F_f über die Außenwand, Weg F_d von der Außen- in die Trennwand und Weg D_f von der Trenn- in die Außenwand.

Um den Einfluss der Innendämmung auf R'_w zu bestimmen, muss man die geänderten Schalldämm-Maße der drei betroffenen Wege in das Berechnungsmodell nach DIN 4109 eingeben und das Berechnungsergebnis mit der Ausgangssituation ohne Dämmsystem vergleichen. Die Schalldämmung der drei Wege ändert sich dabei in folgender Weise:

$$\text{Weg Df: } D_{n,f,w}(\text{Df}) \rightarrow D_{n,f,w}(\text{Df}) + \Delta R_w,$$

$$\text{Weg Fd: } D_{n,f,w}(\text{Fd}) \rightarrow D_{n,f,w}(\text{Fd}) + \Delta R_w,$$

$$\text{Weg Ff: } D_{n,f,w}(\text{Ff}) \rightarrow D_{n,f,w}(\text{Ff}) + \Delta D_{n,f,w}$$

mit $\Delta D_{n,f,w} = 1,582 \times \Delta R_w - 0,9 \text{ dB}$ nach Gl. (19),

wobei ΔR_w die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Außenwand durch das Dämmsystem bezeichnet.

Da das Berechnungsergebnis in starkem Maße von der betrachteten Bausituation abhängt und dabei insbesondere die Außenwand großen Einfluss hat, wurde die Berechnung für Außenwände mit unterschiedlicher Schalldämmung zwischen $R_w = 40 \text{ dB}$ und 60 dB durchgeführt. Für die Verbesserung der Schalldämmung durch das Dämmsystem wurde von einem Wert von $\Delta R_w = -5 \text{ dB}$ ausgegangen, was an der unteren Grenze der bei der durchgeführten Messreihe vorgefundenen Werte liegt und somit eine Worst-Case-Betrachtung darstellt. Dabei ist zu beachten, dass sich der genannte Wert von $\Delta R_w = -5 \text{ dB}$ auf eine Außenwand mit $R_w = 49 \text{ dB}$ bezieht und gemäß Gl. (18) in Abhängigkeit vom Schalldämm-Maß der Wand auch etwas höher oder niedriger ausfallen kann. Die bei der Berechnung betrachtete Bausituation entsprach den Verhältnissen in einem üblichen Wohngebäude und ist in Bild 47 schematisch dargestellt. Die wichtigsten Angaben zu den betrachteten Bauteilen sind nachfolgend aufgeführt. Die Schalldämmung wurde dabei jeweils nach DIN 4109-32, Abschnitt 4.1.4.2.2 aus der flächenbezogenen Masse der Bauteile bestimmt.

Die betrachteten Bauteile waren folgendermaßen aufgebaut:

- Trennwand: schweres Mauerwerk, $m'' = 370 \text{ kg/m}^2$, $R_w \cong 57 \text{ dB}$,
- Innenwand: leichtes Mauerwerk, $m'' = 140 \text{ kg/m}^2$, $R_w \cong 44 \text{ dB}$,
- Boden: Stahlbeton, $d = 180 \text{ mm}$, $m'' \cong 420 \text{ kg/m}^2$, $R_w \cong 59 \text{ dB}$, mit schwimmendem Estrich mit $m'' \cong 80 \text{ kg/m}^2$, $f_{0,\text{rech}} \cong 60 \text{ Hz}$ und $\Delta R_w \cong 10 \text{ dB}$,
- Decke: gleicher Aufbau wie der Boden,
- Außenwand: mit unterschiedlicher Schalldämmung im Bereich von $40 \text{ dB} \leq R_w \leq 60 \text{ dB}$ (entspricht $100 \text{ kg/m}^2 \leq m'' \leq 460 \text{ kg/m}^2$,
- Innendämmung: steife Dämmschicht mit $s' \cong 60 \text{ MN/m}^3$, $m''_B \cong 10 \text{ kg/m}^2$, $f_{0,\text{rech}} \cong 400 \text{ Hz}$ sowie $\Delta R_w = -5,0 \text{ dB}$ und $\Delta D_{n,f,w} \cong -8,8 \text{ dB}$ (bezogen auf Wand mit $R_w = 49 \text{ dB}$).

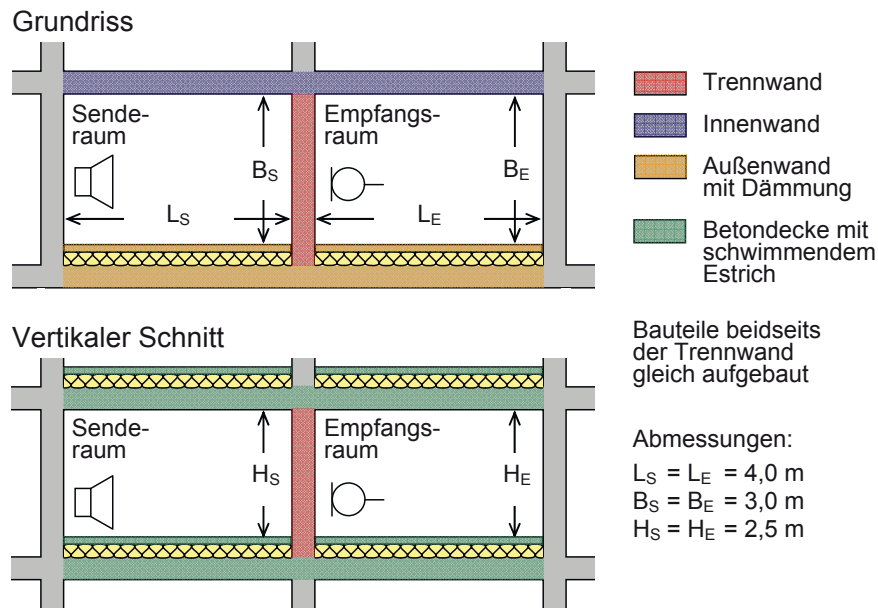


Bild 47:
Schematische Darstellung der bei Berechnung des resultierenden Schalldämm-Maßes betrachteten Bausituation.

Obgleich die Fläche der Trennwand weniger als 10 m^2 beträgt, so dass nach DIN 4109-4 eigentlich die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,w}$ heranzuziehen wäre, wird im Folgenden im Sinne einer konsistenten Darstellungsweise weiterhin das resultierende Schalldämm-Maß R'_w verwendet (die beiden Angaben unterscheiden sich im vorliegenden Fall lediglich um einen konstanten Wert in Höhe von $1,2 \text{ dB}$).

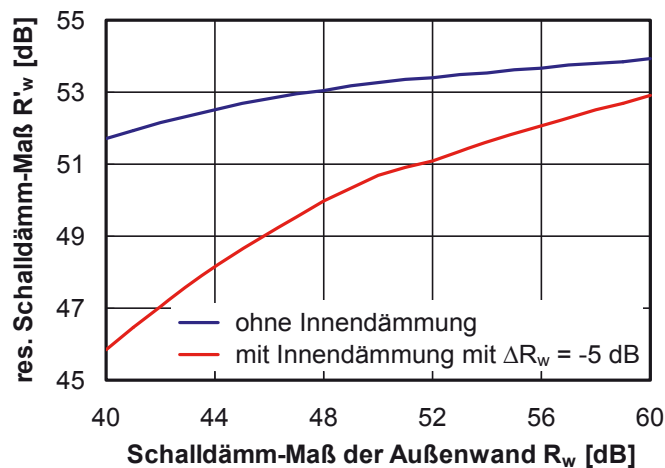


Bild 48:
Resultierendes Schalldämm-Maß zwischen zwei benachbarten Räumen an der Außenwand eines Wohngebäudes mit und ohne innenseitige Wärmedämmung. Bei der Berechnung wurde von einer Verbesserung der Schalldämmung der Außenwand durch das Dämmsystem von $\Delta R_w = -5,0 \text{ dB}$ (bezogen auf $R_w = 49 \text{ dB}$) ausgegangen. Die betrachtete Bausituation ist oben beschrieben und in

Bild 47 grafisch dargestellt. Die Berechnung erfolgte nach DIN 4109-2 und DIN 4109-32.

Die in Bild 48 dargestellten Ergebnisse der durchgeführten akustischen Berechnungen entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verschlechtert das Anbringen einer innenseitigen Wärmedämmung die Schalldämmung der Außenwand, so erfolgt auch eine Verschlechterung der resultierenden Schalldämmung zwischen den an der Außenwand befindlichen Räumen. Gleiches gilt in umgekehrter Weise natürlich auch für eine Verbesserung der Schalldämmung. Die Änderung des resultierenden Schalldämm-Maßes kann dabei etwa ebenso hoch ausfallen wie die Änderung der Schalldämmung der Außenwand.
- Der Einfluss des Dämmsystems auf die resultierende Schalldämmung zwischen Sende- und Empfangsraum hängt in starkem Maße vom Schalldämm-Maß der Außenwand ab. Bei leichten Außenwänden mit niedriger Schalldämmung erfolgt die Schallübertragung zwischen den Räumen zum großen Teil durch Schall-Längsleitung über die Außenwand und die Verbesserung der resultierenden Schalldämmung durch das Dämmsystem kann – wie oben schon erwähnt – gleiche Werte wie bei der Durchgangsdämmung der Außenwand erreichen. Weist die Außenwand hingegen eine hohe Schalldämmung auf, so hat die Wärmedämmung nur verhältnismäßig geringen Einfluss auf die resultierende Schalldämmung.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts wurde die akustische Wirkung von Innendämmsystemen auf die Schalldämmung von Außenwänden in Durchgangsrichtung, als von außen nach Innen und in Längsrichtung, also z.B. zwischen zwei benachbarten Wohnräumen untersucht. Ziele der Untersuchung waren u.a. die Bereitstellung eines repräsentativen Bauteilkatalogs mit Messdaten für alle am Markt gängigen Produktgruppen, sowie die Erstellung eines Prognoseverfahrens zur Abschätzung der akustischen Wirkung von Innendämmsystemen vor der Montage am Bau.

In dem durchgeführten Messprogramm wurden insgesamt dreizehn verschiedene Innendämm-Systeme untersucht. Die Auswahl der Systeme, die gemeinsam mit den Industriepartnern erfolgte, wurde so vorgenommen, dass alle bauüblichen Konstruktionen vertreten waren. Dies gilt sowohl für die verwendeten Dämmstoffe (Polystyrol, Mineralwolle, Holzwolle-Mehrschichtplatten, Perlite und Porenbeton) als auch für die innenseitige Bekleidung des Dämmsystems (Gipskarton oder Putz) sowie auch die Befestigung des Systems an der Wand (nur Klebstoff, Klebstoff und Dübel, nur Dübel).

Bei der Befestigung mit Klebstoff wurden außerdem die Menge des verwendeten Klebemörtels (Anteil der Klebefläche an der Gesamfläche der Wand und Dicke der Mörtelschicht) sowie die Art der Auftragung (Punkt-Wulst-Verfahren oder vollflächige Auftragung mit Zahnkelle) variiert. Dabei zeigte sich, dass bei

der Verwendung des Punkt-Wulst-Verfahrens in Verbindung mit großen Klebstoffmengen starke, nicht verständliche und nicht reproduzierbare Abweichungen im akustischen Verhalten der Dämmsysteme auftraten. Die beiden hiervon betroffenen Systeme konnten bei der Entwicklung eines akustischen Vorhersagemodells nicht berücksichtigt werden, so dass zuverlässige Aussagen über die zu erwartende Schalldämmung hier nicht möglich sind. Bei Punkt-Wulst-Verklebung mit großer Klebstoffmenge ist daher insbesondere bei geringer Dämmstoffdicke in akustischer Hinsicht Vorsicht geboten.

Messung und Auswertung der Ergebnisse erfolgten wie üblich frequenzabhängig in Terzen. Als Maß für die akustische Wirkung im Hinblick auf die praktische Anwendung (rechnerischer Schallschutznachweis nach DIN 4109) wurden jedoch Einzahlangaben, nämlich die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ΔR_w und analog dazu die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz $\Delta D_{n,f,w}$ herangezogen. Um zusätzlich die akustische Wirkung bei tiefen Frequenzen bewerten zu können, wurde außerdem der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ in die Untersuchungen einbezogen, indem statt ΔR_w und $\Delta D_{n,f,w}$ alternativ die Größen $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bzw. $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ betrachtet wurden.

Der Einfluss der Innendämmung auf die Schalldämmung der Außenwand kann sowohl positiv, als auch negativ ausfallen. Die Ergebnisse der im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Innendämmsysteme liegen bei ΔR_w im Bereich von -6 dB bis +5 dB, die Ergebnisse von $\Delta D_{n,f,w}$ sind mit Werten von -11 bis +7 dB im Durchschnitt ca. 1,5 mal so hoch. Dies entspricht dem theoretisch erwarteten Verhalten, sofern die Innendämmung auf beiden Seiten der Trennwand angebracht ist. Bei Anwendung von $C_{tr,50-5000}$ rücken die Ergebnisse auf -6 dB bis 0 dB für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bzw. -10 dB bis 2 dB für $\Delta(D_{n,f,w} + C_{tr,50-5000})$ zusammen. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass bei einer einseitigen Montage des Dämmsystems z.B. nur in einer von zwei aneinandergrenzenden, durch eine Wohnungstrennwand getrennten Räumen sich auch die Verbesserung der Norm-Flankenpegeldifferenz im Vergleich zur beidseitigen Montage näherungsweise halbiert. Dies gilt allerdings nur für die Terzwerte der Schalldämmung, während sich für das bewertete Schalldämm-Maß bei einseitig angebrachter Innendämmung die Beziehung $\Delta D_{n,f,w} \approx \Delta R_w$ ergibt.

Innendämmsysteme wirken sich über den Weg der Schall-Längsdämmung auf die resultierende Schalldämmung zwischen Räumen beidseits der Trennwand aus. Diese wird nach DIN 4109 berechnet, indem die über die einzelnen Übertragungspfade (insgesamt 13 Pfade) übertragene Leistungsanteile einzeln berechnet und anschließend energetisch aufsummiert werden. Für die Pfade, bei denen der Schall durch die Innendämmung hindurch übertragen wird, kann dabei für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der gleiche Wert wie bei der Durchgangsdämmung der Außenwand angesetzt werden. Befinden sich zwei Innendämmsysteme im Übertragungspfad, ist die Verbesserung mit dem Faktor 1,5 zu multiplizieren. Diese Aussagen, die sich theoretisch aus dem Berechnungsmodell nach DIN 4109 ergeben, konnten in dem durchgeführten Forschungsvorhaben bestätigt werden. Für den Einfluss der Innendämmung auf

das resultierende Schalldämm-Maß ist den durchgeführten Untersuchungen zufolge im Normalfall der Flankenpfad Ff (Schall-Längsleitung vollständig über die Außenwand) maßgebend.

Da das vorhandene Berechnungsmodell für Vorsatzschalen aus der neuen DIN 4109 und DIN EN ISO 12354-1 bei Innendämmsystemen in Verbundbauweise den durchgeführten Untersuchungen zufolge starke Abweichungen aufwies und deshalb in der Praxis nicht anwendbar ist, wurde auf Grundlage der im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Messergebnisse ein empirisches Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung von Wänden mit innen-seitiger Wärmedämmung entwickelt. Mit dem Modell lässt sich sowohl die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Außenwand durch das Dämmsystem ΔR_w (für die Schallübertragung von außen nach innen) als auch die Verbesserung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz $\Delta D_{n,f,w}$ (für die Schall-Längsleitung entlang der Wand) bestimmen. Außerdem sind Aussagen zum Einfluss des Dämmsystems auf den Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ (beim Vorhandensein tieffrequenter Geräusche) möglich. Die Auswirkung des Dämmsystems auf das resultierende Schalldämm-Maß zwischen zwei an die Außenwand angrenzenden Räumen lässt sich durch eine Schallausbreitungsbe-rechnung nach DIN 4109-2 und DIN 4109-32 bestimmen, wobei die mit dem entwickelten Berechnungsmodell ermittelten Verbesserungen als Ausgangswerte dienen.

Zur Durchführung der Berechnungen werden die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht sowie die flächenbezogene Masse der innenseitigen Bekleidung des Dämmsystems (z. B. Gipskartonplatten oder Putz) benötigt. Da ΔR_w und $\Delta D_{n,f,w}$ in nicht unerheblichem Maße von der Schalldämmung der Grundwand abhängen, ist außerdem auch noch das bewertete Schalldämm-Maß der Außenwand erforderlich. Weitere Eingangsdaten werden jedoch nicht benötigt, so dass sich ein verhältnismäßig einfaches, gut überschaubares Berechnungsverfahren ergibt, das auch für den Anwender in der baulichen Praxis handhabbar ist. Abgesehen von Dämmsystemen, die ohne Klebstoff ausschließlich mit Dübeln an der Wand befestigt werden, ist das Berechnungsmodell – unabhängig von der Art des Dämmstoffs und der Befestigungsweise – im Prinzip für alle bauüblichen Innendämmsysteme anwendbar.

Trotz des einfachen, empirischen Berechnungsverfahrens ergibt sich insgesamt gesehen eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Dies kommt auch in der Standardabweichung zwischen den gemessenen und berechneten Werten zum Ausdruck, die $\sigma = 1,6$ dB für die Durchgangs- und $\sigma = 1,8$ dB für die Längsdämmung beträgt und damit sogar ein wenig besser als bei den meisten vergleichbaren bauakustischen Modellen ist.

11 Ausblick

Mit Hilfe des Forschungsvorhabens konnte eine bestehende Sicherheitslücke in der baulichen Schallschutzplanung geschlossen werden. Die Ergebnisse liefern einen repräsentativen Überblick über das akustische Verhalten eines breiten Spektrums marktüblicher Innendämmsysteme und mit Hilfe des Berechnungsmodells kann vergleichsweise einfach und mit Kenntnis weniger Parameter vorab prognostiziert werden, wie sich die Innendämmung einer Massivwand auf die Schalldämmung in Durchgangs-, und in Längsrichtung auswirken wird.

Die Ergebnisse der Messungen und die für den Massivbau erstellten Planungswerkzeuge können nun in entsprechender Form publiziert und in die Normung eingebracht werden. Leichtbaukonstruktionen und Gebäude in gemischter Bauweise konnten in dem Vorhaben nicht betrachtet werden, da sie sich akustisch äußerst kompliziert verhalten. Andererseits ist der Einsatz von Innendämmungen bei dieser Bauweise im Allgemeinen auch wenig gebräuchlich.

Offene Fragen bestehen derzeit noch in Bezug auf Außenwände aus Lochsteinen (z.B. Hochlochziegel) für die bislang noch keine Ergebnisse in Verbindung mit Innendämmsystemen vorliegen. Vorhandene Untersuchungen an Wärmedämmverbundsystemen auf der Außenseite der Wand deuten darauf hin, dass in dieser Hinsicht zwischen Lochstein- und Vollsteinwänden nur geringe Unterschiede bestehen. Im Hinblick auf Innendämmsysteme ist dies allerdings derzeit noch nicht experimentell verifiziert.

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass alle durchgeführten Untersuchungen an ein und derselben Außenwand aus Porenbeton erfolgten. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Außenwände mit unterschiedlicher flächenbezogener Masse ist zwar rechnerisch möglich, die Umrechnung konnte allerdings bislang ebenfalls noch nicht messtechnisch überprüft werden.

12 Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die finanzielle Förderung sowie Hr. Dipl.-Ing. Steffen Kisseler für die organisatorische Betreuung des durchgeführten Forschungsvorhabens. Unser Dank gilt außerdem den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern für die Bereitstellung und Montage von Prüfmaterial und Prüfaufbauten, sowie technische Beratung und allgemein für die gute Zusammenarbeit:

- Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH,
- Knauf Aquapanel GmbH,
- Knauf Insulation GmbH,
- SINIAT GmbH,
- Saint-Gobain Rigips GmbH.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Weber, L.; Brandstetter, D.: Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen. IBP-Bericht B-BA 6/2002 im Auftrag des DIBt und des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e. V., Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2003).
- [2] Weber, L.; Zhang, Y.; Brandstetter, D.: Untersuchung der Schall-Längsdämmung von Außenwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. IBP-Bericht B-BA 4/2002 im Auftrag des BBR, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2003).
- [3] Weber, L.: Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen - Ergänzung des Berechnungsverfahrens. IBP-Bericht B-BA 4/2005 im Auftrag des DIBt, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2005).
- [4] Rabold, A.; Bacher, S.: Wärmedämmverbundsysteme und Außendämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz in der Altbausanierung - Prognose und Optimierung der schalltechnischen Eigenschaften. Forschungsbericht des ift Rosenheim im Auftrag des BBSR (2014).
- [5] Weber, L.; Müller, S.: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen. IBP-Bericht B-BA 1/2014 im Auftrag des BBSR, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2015).
- [6] Weber, L.: Schallschutz von WDV- und Innendämmsystemen. Fachsymposium "Dämmstoffe - Neue Erkenntnisse und Messmethoden", Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Okt. 2011, Tagungsband, S. 52 - 62.
- [7] Weber, L.: WDV-Systeme zum Thema Schallschutz. Technische Systeminfo 7, Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (2013).
- [8] DIN 4109-34: Schallschutz im Hochbau -Teil 34: Eingangsdaten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen (Entwurf, Juni 2013).
- [9] DIN EN ISO 12354-1: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (Dezember 2000 bzw. Entwurf vom März 2016).
- [10] Weber, L.; Buchele, A.: Akustische Sanierung von Wohngebäuden mit Vorsatzschalen und Vorsatzkonstruktionen - Berechnung, Planung, Optimierung. IBP-Bericht B-BA 2/2008 im Auftrag des BBR, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2009).
- [11] Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland - Erste Ergebnisse der Gebäude- und Wohnungszählung 2011. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Jan. 2011).
- [12] Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D.: Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU) und Bremer Energie Institut (BEI) (Dez. 2010).

- [13] Umwelt - Umsatz mit Umweltschutzgütern und Umweltschutzleistungen 2012. Statistisches Bundesamt, Fachserie 19 Reihe 3.3 (August 2014).
- [14] Paproth, O.: Dämmkosten im Vergleich. Claytec Symposium Innendämmung, Duisburg, Januar 2014 (Vortragsmanuskript).
- [15] Webseite "Energiesparen im Haushalt": <http://www.energiesparen-im-haushalt.de/>
- [16] Schröder, H.; Haltenorth, I.: Verbesserung der Längs-Schalldämmung durch Vorsatzschalen aus Verbundelementen. IBP-Bericht B-BA 10/2002, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2002).
- [17] Nicolai, M.; Scholl, W.; Fischer, H.-M.: Verbesserung der Luftschalldämmung durch Vorsatzschalen. IBP-Bericht B-BA 2/1995, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1995).
- [18] Krüger, J.; Scholl, W.; Koch, S.: Verbesserung der Luftschalldämmung massiver Bauteile durch biegeeweiche Vorsatzschalen. IBP-Bericht B-BA 3/2000, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2001).
- [19] Schröder, H.; Haltenorth, I.: Untersuchung der Verbesserung der Längs-Schalldämmung durch freistehende Vorsatzschalen. IBP-Bericht B-BA 9/2002, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2002).
- [20] Schröder, H.; Haltenorth, I.: Verbesserung der Längs-Schalldämmung durch Vorsatzschalen. IBP-Bericht B-BA 2/2003, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2003).
- [21] Schröder, H.: Längs oder durch ist nicht egal. Trockenbau Akustik 2/2004, S. 72 - 73 (2004).
- [22] Weber, L.; Buchele, J. A.: Verbesserung der Schalldämmung durch Vorsatzschalen. Veröffentlichungen der Hochschule für Technik 80, Bauphysikertreffen 2006, S. 9 - 29 (2006).
- [23] Buchele, J. A.; Weber, L.: Vorsatzschalen in Theorie und Praxis. Fortschritte der Akustik – DAGA 2007 (2007), S. 363 - 364.
- [24] Weber, L.; Buchele, J. A.: Verbesserung der Schalldämmung durch Vorsatzschalen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2008 (2008), S. 697 - 698.
- [25] Weber, L.; Leistner, P.: Improvement of airborne sound insulation of partition walls by using additional linings. Internoise 2008, Tagungs-CD, Architectural Acoustics, Beitrag 0501 (2008).
- [26] DIN EN ISO 10140-1: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 1: Anwendungsregeln (2016).

- [27] DIN EN ISO 10140-2: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (2010).
- [28] DIN EN ISO 10140-4: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 4: Messverfahren und Anforderungen (2010).
- [29] DIN EN ISO 10140-5: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände (2014).
- [30] DIN EN ISO 717-1: Akustik- Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung (2013).
- [31] DIN EN ISO 16283-1: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 1: Luftschalldämmung (2014).
- [32] DIN EN 29052-1: Akustik – Bestimmung der dynamischen Steifigkeit – Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (August 1992).
- [33] DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau - Teil 1 – Mindestanforderungen (Juli 2016).
- [34] DIN EN ISO 10848-1: Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen – Teil 1: Rahmendokument (2006).
- [35] DIN EN ISO 12999-1: Bestimmung und Anwendung von Messunsicherheiten in der Bauakustik – Teil 1: Schalldämmung (2014).
- [36] DIN 4109-2: Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen (Juli 2016).
- [37] DIN 4109-32: Schallschutz im Hochbau – Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau (Juli 2016)