

Lutz Weber, Bernd Kaltbeitzel

Schallschutz bei Wärmedämm- Verbundsystemen im Holz- und Leichtbau

F 3127

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

2019

ISBN 978-3-7388-0326-6

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

IBP-Bericht B-AK 3/2018

Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen im Holz- und Leichtbau

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

(AktENZEICHEN: SWD-10.08.18.7-16.12 / IBP-422460)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

82 Seiten Text

5 Tabellen

46 Abbildungen

1 Anhang

Dr. Lutz Weber

M.Sc. Bernd Kaltbeitzel

Stuttgart, 28. Sept. 2018

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

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

Dr.
Peter Brandstät

Dr.
Lutz Weber

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Vorgehensweise	5
3	Stand der Forschung	7
4	Akustische Grundlagen	9
4.1	Geräuschbelastung durch Außenlärm	9
4.2	Schalldämmung von Bauteilen	10
4.3	Bewertetes Schalldämm-Maß	11
4.4	Spektrum-Anpassungswerte	12
4.5	Resultierende Schalldämmung von Außenbauteilen	13
5	Schalldämmung von WDVS	15
5.1	Aufbau und Klassifizierung von WDVS	15
5.2	Akustisches Wirkungsprinzip	17
5.3	Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS	20
5.4	Einfluss der Resonanzfrequenz	21
5.5	Einfluss der Grundwand	22
5.6	Weitere Einflussgrößen	24
5.7	WDVS auf Ständerwänden	24
6	Versuchsaufbau	26
6.1	Herstellung der Grundwände	27
6.2	Montage der WDVS	29
6.3	Prüfstand	32
7	Messdurchführung und Vorversuche	34
7.1	Durchführung und Auswertung der Messungen	34
7.2	Grundgeräusch und Grenzdämmung	35
7.3	Reproduzierbarkeit	36
8	Untersuchte Konstruktionen	38
8.1	Grundwände	38
8.2	WDVS	41

9	Messergebnisse	45
9.1	Grundwände ohne WDVS	46
9.2	Akustischer Einfluss von WDVS	48
9.2.1	WDVS ohne Wand	48
9.2.2	Resonanzfrequenz	50
9.2.3	Gleiche Wand mit verschiedenen WDVS	53
9.2.4	Gleiches WDVS auf unterschiedlichen Wänden	54
9.2.5	Einfluss von Dübeln	56
9.2.6	Einzahlangaben	57
10	Berechnungsmodell	59
10.1	Vorhandenes Modell des ift	60
10.2	Einfluss der Resonanzfrequenz des WDVS	62
10.3	Berechnungsformeln	65
10.4	Validierung an unabhängigem Datensatz	69
10.5	Anwendungsgrenzen und Genauigkeit	72
11	Zusammenfassung	73
12	Verwendung der Forschungsmittel	76
13	Literatur	77
14	Danksagung	81
A.1	Berechnungsverfahren des ift	82

1 Einleitung

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) verbessern die thermische Isolation der Gebäudehülle und liefern damit einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Heizenergie. Sie verändern jedoch zugleich in starkem Maße die akustischen Eigenschaften der Außenwand, wobei abhängig von der jeweiligen Konstruktion sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der Schalldämmung erfolgen kann. Bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß können sich bei massiven Wänden dadurch Veränderungen im Bereich von etwa $-10 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 20 \text{ dB}$ ergeben. Daher müssen WDVS beim baulichen Schallschutznachweis für Außenbauteile im Normalfall stets berücksichtigt werden.

Da sie sich einfach und kostengünstig herstellen lassen und eine sehr gute Wärmedämmung aufweisen, sind WDVS im Massivbau mittlerweile weit verbreitet. Wegen der gestiegenen energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle sind sie jedoch zunehmend auch im Holz- und Leichtbau zu finden. Typische Einsatzgebiete sind z. B. die energetische Sanierung älterer Gebäude in Holzbauweise sowie Fertighäuser, bei denen die Käufer eine verputzte Fassade wünschen.

Im Gegensatz zum Massivbau, wo zuverlässige Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung von Wänden mit WDVS zur Verfügung stehen, sind derartige Werkzeuge für den Leichtbau bislang nicht verfügbar. Mögliche Alternativen, wie z. B. entsprechende Bauteilkataloge, sind wegen der großen Konstruktionsvielfalt im Bereich des Holz- und Leichtbaus nicht praktikabel. Ziel des Vorhabens ist es deshalb, ein zuverlässiges Prognoseverfahren für die Schalldämmung von Holz- und Leichtbauwänden mit WDVS zu entwickeln. Des Weiteren sollen Vorschläge zur akustischen Optimierung der Systeme erarbeitet und praktische Hinweise für den Einsatz von WDVS im Holz- und Leichtbau formuliert werden.

Aufgrund ihrer mehrschaligen Bauweise unterscheiden sich die im Holz- und Leichtbau üblicherweise eingesetzten Ständerwände in ihrem akustischen Verhalten erheblich von massiven Bauteilen. Die bewährten Berechnungsmethoden für WDVS aus dem Bereich des Massivbaus sind deshalb hier nicht ohne weiteres anwendbar, sondern müssen entsprechend modifiziert und ergänzt werden. Hierzu ist es erforderlich, geeignete mathematische Modelle zu entwickeln, die an die speziellen Eigenschaften mehrschaliger Systeme angepasst sind.

Da sich Ständerwände mit WDVS in akustischer Hinsicht äußerst kompliziert verhalten, kann die Entwicklung eines praxistauglichen Berechnungsverfahrens nur semiempirisch auf der Basis eines ausreichenden Bestandes an Messdaten erfolgen. Bislang sind allerdings nur wenige geeignete Schalldämm-Messungen an Leichtbauwänden mit WDVS verfügbar, so dass zunächst die für die Entwicklung erforderliche Datengrundlage geschaffen werden muss. Die Beschaffung der notwendigen Daten erfolgt durch eine systematische Messreihe in einem bauakustischen Prüfstand. Hierbei werden die verwendeten Prüfobjekte so ausgewählt, dass sie einerseits repräsentative Beispiele für die am häufigsten verwendeten Bauweisen bilden und andererseits die gesamte Bandbreite bauüblicher Konstruktionen umfassen.

Nachdem die Entwicklung des Berechnungsverfahrens in seinen Grundzügen abgeschlossen ist, wird das Verfahren mit den ermittelten Messdaten abgeglichen. Dabei werden die Berechnungsparameter so angepasst, dass sich eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt, was zugleich auch Aussagen über die Vorhersagegenauigkeit des Verfahrens ermöglicht. Abschließend wird untersucht, inwieweit sich das Verfahren auf Konstruktionen anwenden lässt, die nicht Bestandteil der durchgeführten Messreihe sind.

Wegen seiner ökonomischen und ökologischen Vorteile verzeichnet der Holz- und Fertigteiltbau in Deutschland einen kontinuierlich wachsenden Marktanteil (bei Neubauten beträgt er derzeit etwa 15 % [1]). Ein grundlegendes Problem dieser Bauweise stellt jedoch der Schallschutz der Gebäudehülle dar. Ursache hierfür ist vor allem der in vielen Stadtgebieten einwirkende starke Verkehrslärm, die trotz technischer Fortschritte im Fahrzeugbau wegen des steigenden Verkehrsaufkommens stetig zunimmt [2 - 4]. Ein ungestörtes Wohn- und Arbeitsumfeld setzt daher eine wirksame Abschirmung des Verkehrslärms voraus.

Wände in Holz- und Leichtbauweise haben jedoch in dieser Hinsicht gegenüber Mauerwänden erhebliche Nachteile. Sie erreichen zwar ähnliche Werte für das bewertete Schalldämm-Maß, bei tiefen Frequenzen ist ihre Schalldämmung jedoch zumeist deutlich geringer. Dies kommt im Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ nach DIN EN ISO 717-1 [5] zum Ausdruck, der bei tieffrequenter Geräuschanregung zum bewerteten Schalldämm-Maß zu addieren ist und bei leichten Ständerwänden zumeist hohe negative Werte aufweist. Da bei Verkehrsgeräuschen vielfach die tieffrequenten Anteile dominieren, hat dies in der Praxis eine verstärkte Schallübertragung durch die Außenwand zur Folge.

Für den Holz- und Leichtbau ist es daher wichtig, die Schalldämmung von Außenwänden bei tiefen Frequenzen so weit wie möglich zu verbessern. Wärmedämm-Verbundsysteme können hierzu einen Beitrag leisten, sofern sie akustisch entsprechend ausgelegt sind (anderenfalls können sie die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen auch verschlechtern). Bisher lässt sich dieses Verbesserungspotenzial nicht gezielt nutzen, weil die erforderlichen akustischen Planungswerkzeuge fehlen. Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich deshalb auch mit diesem Aspekt der akustischen Problematik.

2 Vorgehensweise

Die beiden zentralen Themenbereiche des Forschungsvorhabens bestanden in der Durchführung einer systematischen akustischen Messreihe an Leichtbauwänden mit WDVS sowie in der Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Vorhersage der Schalldämmung auf Grundlage der ermittelten Messdaten. Zur Durchführung dieser Aufgaben waren folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- a) Der erste Arbeitsschritt des Vorhabens bestand aus einer Literatur- und Produktrecherche und diente vor allem dazu, vorhandene Untersuchungsergebnisse zu dem betrachteten Forschungsthema zusammenzutragen. Die Ergebnisse wurden einer-

seits als Hilfsmittel bei der Auswahl der in die Messreihe einbezogenen Wände und WDVS herangezogen. Andererseits bildeten sie einen wichtigen Baustein bei der Vorbereitung und Konzeption des entwickelten Berechnungsverfahrens.

- b) Als nächster Schritt erfolgte die Planung des erforderlichen akustischen Messprogramms. Dies betraf zunächst die Auswahl geeigneter Wände und WDVS, wobei die Aufgabe vor allem darin bestand, sowohl die am häufigsten verwendeten Bauweisen einzubinden als auch nach Möglichkeit das gesamte Spektrum bauüblicher Konstruktionen abzudecken. Um den Herstellungsaufwand zu vermindern, wurden die Schalldämm-Messungen nicht an vollflächigen Wänden, sondern an Wandausschnitten mit den Maßen $B \times H = 1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$ (entspricht einer Fläche von ca. $1,8 \text{ m}^2$) vorgenommen. Die WDVS wurden nicht direkt an den Wänden angebracht, sondern als separate Bauteile hergestellt, so dass sie mehrfach verwendet und mit unterschiedlichen Wänden kombiniert werden konnten. Neben einer Verringerung des Zeit- und Arbeitsaufwandes hatte dies vor allem den Vorteil, dass immer dieselben WDVS zum Einsatz kamen, was die Vergleichbarkeit der Messergebnisse durch den Wegfall herstellungsbedingter Unterschiede zwischen gleichartigen Systemen beträchtlich verbesserte.
- c) Die Herstellung der Wände und WDVS erfolgte größtenteils durch institutseigenes Handwerkerpersonal. Die WDVS wurden in bauüblicher Weise auf OSB-Platten aufgeklebt, die später mit Schrauben an den Ständern der Wände befestigt wurden und dort die außenseitige Beplankung bildeten. Die Verschraubung erfolgte mit Gewindestangen, die von der Rückseite her durch Bohrungen in den Ständern gesteckt und in Einschlagmuttern eingedreht wurden, die in die OSB-Platte eingelassen waren. Diese Montageweise ermöglichte es, das WDVS auszutauschen, ohne die Wand hierfür ausbauen oder öffnen zu müssen, was ebenfalls dazu beitrug, die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu verbessern.
- d) Zur Messung der Schalldämmung wurden die untersuchten Wände in die Prüföffnung eines bauakustischen Wandprüfstandes eingebaut (die Öffnung war vorher mittels einer hochschalldämmenden Maske auf eine Fläche von $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ verkleinert worden, so dass an den Rändern der Prüfobjekte eine umlaufende 1 cm breiten Fuge verblieb). An den eingebauten Wänden wurden dann nacheinander die verschiedenen WDVS befestigt. Nach dem Abdichten der Fugen auf der Vorder- und Rückseite der Wand erfolgte jeweils eine Schalldämm-Messung nach DIN EN ISO 10140 [6]. Das Messprogramm umfasste sieben Wände (je drei Holz- und Metallständerwände sowie eine Massivholzwand) und zehn verschiedene WDVS (aus fünf unterschiedlichen Dämmstoffen, jeweils mit und ohne Dübel). Einschließlich von Vorversuchen, Wiederholungs- und Ergänzungsmessungen fanden insgesamt etwa achtzig Schalldämm-Messungen statt. Neben der Schalldämmung der Wände wurde außerdem die dynamische Steifigkeit der verwendeten Dämmstoffe durch Messungen nach DIN EN 29052-1 [7] bestimmt.
- e) Die ermittelten Messergebnisse bildeten die Grundlage zur Entwicklung eines Berechnungsverfahrens, um die Schalldämmung von Leichtbauwänden mit WDVS vorherzubestimmen. Dabei wurde von vorhandenen Modellen ausgegangen, die an die speziellen Verhältnisse im Leichtbau angepasst und durch geeignete Wahl der Berechnungsparameter so optimiert wurden, dass sich die größtmögliche

Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergab. Da frequenzabhängige Berechnungen zu kompliziert und aufwändig gewesen wären, beschränkt sich das entwickelte Verfahren auf die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes als zentraler bauakustischer Einzahlangabe. Als Berechnungsergebnis ergibt sich die die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS (Differenz zwischen dem bewerteten Schalldämm-Maß der Wand mit und ohne WDVS), die im Einzelfall natürlich auch negative Werte annehmen kann und dann eine akustische Verschlechterung darstellt.

- f) Nach Fertigstellung des Berechnungsmodells wurden die Genauigkeit und die Anwendungsgrenzen des Verfahrens an einem unabhängigen Satz von Messdaten überprüft. Da sich die in dem hierzu verwendete Datensatz enthaltenen Konstruktionen teilweise stark von den zuvor betrachteten Wänden unterschieden, fiel die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung hierbei erwartungsgemäß geringer aus, als dies bei den Ausgangsdaten der Fall war (hierzu trug auch bei, dass die Berechnung im Gegensatz zu den Ausgangskonstruktionen unter Verwendung von Herstellerangaben erfolgte). Die Berechnungsgenauigkeit war aber dennoch ausreichend hoch, so dass das entwickelte Modell nicht modifiziert, sondern lediglich geringfügig ergänzt werden musste. Die auf diese Weise erzielte Prognosegenauigkeit ist für die Praxis völlig ausreichend.
- g) Im letzten Schritt des Forschungsvorhabens wurden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um Konstruktions- und Planungshinweise für WDVS im Leichtbau abzuleiten. Vorgehensweise, untersuchte Konstruktionen und Ergebnisse des Vorhabens wurden in einem Forschungsbericht dokumentiert sowie außerdem in einer Veröffentlichung zusammengefasst, die demnächst in einer geeigneten Fachzeitschrift (Zeitschrift Trockenbau Akustik) erscheinen wird.

3 Stand der Forschung

In Gegensatz zu Leichtbauwänden, für die bislang nur wenige Untersuchungsergebnisse vorliegen, ist der Einfluss von WDVS auf die Schalldämmung massiver Wände im Großen und Ganzen gut bekannt. Erste Publikationen zu diesem Thema wurden bereits in den achtziger Jahren veröffentlicht und seither ist eine Reihe weiterer Veröffentlichungen erschienen [8 - 20].

In den Jahren 2002 bis 2005 wurden die akustischen Eigenschaften von Massivwänden mit WDVS im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) im Rahmen von mehreren Forschungsvorhaben umfassend untersucht [21 - 23]. Dabei wurde unter anderem ein zuverlässiges Berechnungsverfahren zur Vorhersage des bewerteten Schalldämm-Maßes entwickelt, das in der baulichen Schallschutzplanung und im Bereich der bauaufsichtlichen Zulassung bis heute in nahezu unveränderter Form Verwendung findet. Derzeit wird das Verfahren vom DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) zur Ergänzung und Verfeinerung des vorhandenen Modells für Vorsatzschalen in die neue DIN 4109 integriert.

Da sich die Bauweise von WDVS in den vergangenen Jahren – unter anderem durch die gestiegenen Anforderungen an die thermische Isolation der Gebäudehülle – teilweise beträchtlich verändert hat, wurden in den Jahren 2014 bis 2016 erneut akustische Untersuchungen an WDVS vorgenommen [24 - 26]. Ziel der entsprechenden Forschungsaktivitäten war es, herauszufinden, wie sich die erwähnten konstruktiven Veränderungen (WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke, zweilagige WDVS, WDVS auf Lochsteinwänden, etc.) auf die akustischen Eigenschaften der Systeme auswirken. Hierbei zeigte sich, dass das vorhandene Berechnungsmodell – teilweise leicht angepasst und ergänzt – im Wesentlichen auch für WDVS in veränderter Bauweise anwendbar ist. Dies gilt im übrigen nicht nur für klassische Dämmstoffe wie Polystyrol oder Mineralfaser, sondern in etwas modifizierter Form auch für WDVS aus nachwachsenden Rohstoffen [27].

Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung existieren zwar auch für leichte Ständerwände (ein guter Überblick hierzu findet sich in [28]), die meisten dieser Verfahren sind jedoch für die Anwendung in der baulichen Praxis zu kompliziert oder zu ungenau [29 - 42]. Außerdem erlauben sie keine Aussage über den akustischen Einfluss von WDVS und sind auch deshalb im vorliegenden Fall nur beschränkt verwendbar. Systematische messtechnische Untersuchungen an Ständerwänden mit WDVS sind bislang ebenfalls kaum verfügbar. Die meisten Messdaten sind entweder unvollständig (es fehlt die Schalldämmung der Wand ohne WDVS, ohne die die Werte für das durchgeführte Forschungsvorhaben weitgehend wertlos sind), oder die Messungen erfolgten unter undefinierten baulichen Randbedingungen am Bau [43 - 48].

Eine Ausnahme bildet ein Forschungsvorhaben des ift Rosenheim aus dem Jahr 2006, das sich mit der Entwicklung eines akustischen Berechnungsverfahrens für Holzständerwände beschäftigte [49, 50]. In diesem Vorhaben wurden auch Ständerwände mit WDVS betrachtet und semiempirische Formeln für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Wand durch das WDVS abgeleitet. Die Formeln beruhen zwar nur auf einem verhältnismäßig kleinen Datenbestand von lediglich zwölf Wänden, es handelt sich dabei jedoch um zuverlässige und gut dokumentierte Messwerte aus bauakustischen Prüfständen. Die vorliegenden Forschungsergebnisse stellen deshalb einen guten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar, auch wenn sie wegen des begrenzten Umfangs der Ausgangsdaten nicht für alle bauüblichen WDVS geeignet sind und für die Anwendung in der Praxis daher noch erweitert und ergänzt werden müssen.

Ein wichtiges Ergebnis des erwähnten Forschungsvorhabens ist außerdem, dass zwischen den akustischen Eigenschaften von WDVS auf Ständer- und Massivwänden trotz des unterschiedlichen Wandaufbaus viele Ähnlichkeiten bestehen. So ist das typische Resonanzverhalten des aus Grundwand, Dämmstoff und Putzschicht gebildeten Masse-Feder-Masse Systems, das vom Massivbau her bekannt ist, in ähnlicher Form auch bei WDVS auf Wänden in Leichtbauweise zu finden. Zwar erfolgt die Resonanz bei einer anderen Frequenz und auch hinsichtlich der Auswirkung des Resonanzeinbruchs auf die Schalldämmung der Grundwand bestehen Unterschiede, die akustisch maßgebenden Einflussgrößen (insbesondere die Resonanzfrequenz des WDVS und das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand) stimmen aber in beiden Fällen überein. Daher kann man als ersten Ansatz zur Entwicklung eines akustischen Berechnungsverfahrens für

Leichtbauwände mit WDVS im Prinzip von den entsprechenden Formeln für den Massivbau ausgehen. Um sie an die Verhältnisse bei Leichtbauwänden anzupassen, müssen die Formeln dann anschließend modifiziert und ergänzt werden, wobei natürlich auch eine Neubewertung der akustischen Einflussgrößen erforderlich ist.

4 Akustische Grundlagen

4.1 Geräuschbelastung durch Außenlärm

Da WDVS an Außenwänden angebracht werden, handelt es sich bei den einwirkenden Geräuschen normalerweise um Außenlärm. Außenlärm kann sich aus verschiedenen Arten von Geräuschen wie z. B. Industrielärm, Nachbarschaftslärm, Sportlärm und Verkehrslärm zusammensetzen, wobei der maßgebende Geräuschanteil in den meisten Fällen aus Verkehrslärm besteht. Bei Verkehrslärm spielt im Allgemeinen der Straßenverkehr im Vergleich zu Luft- und Schienenverkehr die dominierende Rolle, weshalb man sich beim Schallschutz von Außenbauteilen zumeist auf die Geräusche des Straßenverkehrs konzentriert.

Der wesentliche Unterschied zwischen Straßenverkehrslärm und wohnüblichen Innengeräuschen besteht in den verschiedenartigen Frequenzspektren: Bei Verkehrsgeräuschen sind die tieffrequenten Geräuschanteile im Verhältnis erheblich stärker ausgeprägt. Dies ist in Abb. 1 anhand der zur Berechnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} verwendeten genormten Frequenzspektren veranschaulicht:

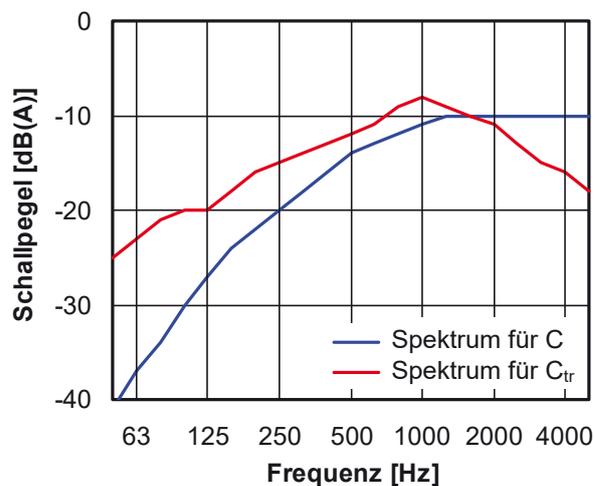


Abb. 1: Frequenzspektren zur Berechnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} nach DIN EN ISO 717-1. Das für C verwendete Spektrum (sogenanntes rosa Rauschen) stellt eine vereinfachte Nachbildung wohnüblicher Innengeräusche dar. Das Spektrum für C_{tr} entspricht - abgesehen von dem bis 50 Hz hinab erweiterten Frequenzbereich - dem standardisierten Verkehrslärm-spektrum für innerstädtischen Straßenverkehr nach DIN EN 1793-3 [51]. Beide Spektren sind auf den gleichen Gesamtpegel von 0 dB(A) normiert und lassen sich somit direkt miteinander vergleichen.

Als Konsequenz aus den starken Geräuschanteilen von Verkehrslärm bei tiefen Frequenzen, sollten Außenbauteile in diesem Frequenzbereich eine genügend hohe Schalldämmung aufweisen. Dies wird bei der Planung zumeist nicht ausreichend berücksichtigt und führt dann trotz Einhaltung der gesetzlichen Schallschutzanforderungen zu akustischen Defiziten, die sich in Störungen und Beeinträchtigungen der betroffenen Bewohner äußern.

4.2 Schalldämmung von Bauteilen

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

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

Die Schalldämmung ist eine frequenzabhängige Größe und steigt mit zunehmender Frequenz an. Der Anstieg erfolgt allerdings nicht gleichmäßig, sondern weist infolge unterschiedlicher akustischer Einflüsse, wie z. B. Koinzidenzeffekt und Bauteilresonanzen, mehr oder weniger ausgeprägte Strukturen (Minima und Maxima) auf. Für einschalige homogene Massivwände lässt sich der Frequenzverlauf der Schalldämmung näherungsweise (mit einer für die Praxis meist hinreichenden Genauigkeit) durch einen konstanten Wert bei tiefen und einen linearen Anstieg bei hohen Frequenzen darstellen:

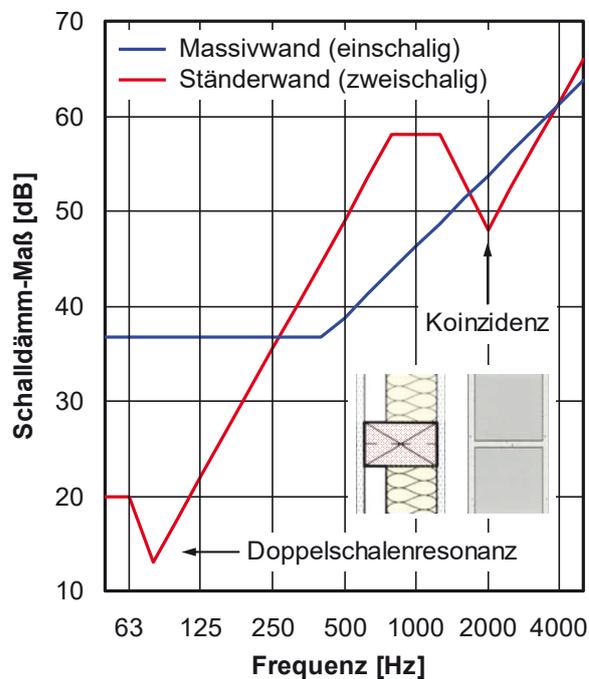


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schalldämmkurve einer Massiv- und einer Ständerwand. Das bewertete Schalldämm-Maß beträgt in beiden Fällen $R_w = 45$ dB. Bezieht man den Spektrum-Anpassungswert für Verkehrslärm mit

ein, was eine stärkere Berücksichtigung der tiefen Frequenzen zur Folge hat, so ergeben sich hingegen zwischen den beiden Wänden erhebliche Unterschiede ($R_w + C_{tr,50-5000} = 42$ dB bei der Massivwand und $R_w + C_{tr,50-5000} = 31$ dB bei der Ständerwand).

Ständerwände weisen demgegenüber im tief- und hochfrequenten Bereich zwei charakteristische Dämmungseinbrüche auf, die auf die Doppelschalenresonanz der zweischaligen Konstruktion bzw. auf die Koinzidenzfrequenz der Beplankungsplatten zurückzuführen ist. Zwischen den beiden Einbrüchen steigt die Schalldämmkurve mit ca. 12 dB / Oktave an, was etwa der doppelten Steigung wie bei der Massivwand entspricht.

4.3 Bewertetes Schalldämm-Maß

Während die Messung der Schalldämmung frequenzabhängig (zumeist in Terzen) erfolgt, werden für die schalltechnische Planung und den Vergleich mit den Schallschutzanforderungen in der Regel Einzahlangaben verwendet. Die zentrale Einzahlangabe für die Luftschalldämmung von Bauteilen ist das bewertete Schalldämm-Maß R_w . Die Berechnung von R_w erfolgt gemäß DIN EN ISO 717-1 durch Vergleich der Messkurve mit einer genormten Bezugskurve. Das verwendete Verfahren ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht:

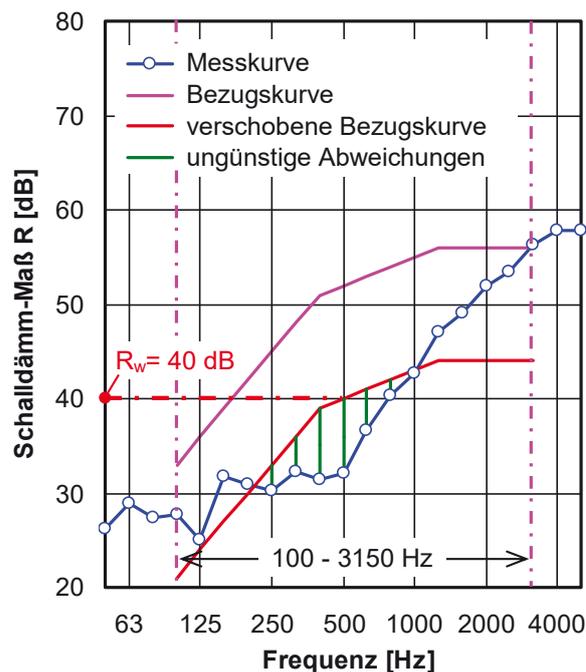


Abb. 3: Beispiel für die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w . Die Berechnung erfolgt durch vertikale Verschiebung der Bezugskurve in ganzzahligen Schritten. Die Verschiebung wird so lange fortgesetzt, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, aber nicht mehr als 32,0 dB beträgt (eine ungünstigste Abweichung liegt vor, wenn der Messwert unter der Bezugskurve liegt). Das bewertete Schalldämm-Maß

entspricht dem Wert der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz (im dargestellten Beispiel ergibt sich $R_w = 40$ dB).

Für die akustische Planung in der baulichen Praxis wird das bewertete Schalldämm-Maß zumeist als ganzzahliger Wert gebildet. Da dies jedoch zwangsläufig eine Berechnungsunsicherheit von $\pm 0,5$ dB nach sich zieht, wird R_w im vorliegenden Bericht durchweg mit einer Genauigkeit von 0,1 dB angegeben, indem die Bezugskurve gemäß DIN EN ISO 717-1 in Schritten von 0,1 dB anstatt 1 dB verschoben wird.

4.4 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 tieffrequentem 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 hochfrequente Außengeräusche) und C_{tr} (für tieffrequenten 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. Die verwendete Berechnungsformel (am Beispiel von C_{tr}) lautet:

$$C_{tr} = -10 \lg \left(\sum_n 10^{(L_n - R_n)/10} \right) \text{ dB} - R_w. \quad (2)$$

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

Neben dem standardmäßig verwendeten Frequenzbereich von 100 - 3150 Hz können die Spektrum-Anpassungswerte - sofern entsprechende Messwerte für die Schalldämmung vorliegen - optional auch für die Bereiche von 100 - 5000 Hz, 50 - 3150 Hz und 50 - 5000 Hz ermittelt werden. In diesen Fällen werden die Werte mit einem entsprechenden Index (also z. B. $C_{tr,50-5000}$) gekennzeichnet. Ist kein Index vorhanden, so ist immer der Bereich von 100 - 3150 Hz gemeint. Da die Vielzahl unterschiedlicher Angaben (zwei verschiedene Spektrum-Anpassungswerte mit jeweils vier verschiedenen Frequenzbereichen) bei der praktischen Anwendung häufig zu Unklarheiten führt, hier in kurzer Form die wichtigsten Anwendungsregeln [52]:

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

Bei Außenwänden mit WDVS stellt in der Regel $R_w + C_{tr,50-5000}$ die am besten geeignete Beurteilungsgröße dar, da sie dem menschlichen Höreindruck am nächsten kommt. Für $R_w + C_{tr,50-5000}$ ergeben sich hierbei fast immer kleinere Werte als für R_w , was für Wände mit und ohne WDVS gleichermaßen zutrifft. Bei Wänden mit WDVS ist der Unterschied zwischen den beiden Angaben im Allgemeinen um so größer, je niedriger die Resonanzfrequenz des WDVS ausfällt.

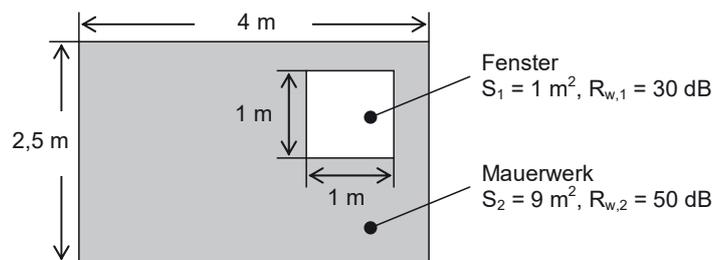
Trotz ihrer großen akustischen Bedeutung sind die Spektrum-Anpassungswerte in den gesetzlichen Anforderungen für den baulichen Schallschutz in Deutschland bislang nicht berücksichtigt. Auch die neue DIN 4109 enthält diesbezüglich lediglich Hinweise und Empfehlungen, aber keine verbindlichen Festlegungen. Rein rechtlich gesehen ist eine Berücksichtigung der Spektrum-Anpassungswerte also nicht zwingend erforderlich. Im Folgenden wird dennoch neben R_w zusätzlich auch $R_w + C_{tr,50-5000}$ betrachtet, da vielfach nur auf diese Weise eine gehörige Beurteilung der Schallschutzwirkung von Außenbauteilen gewährleistet ist.

4.5 Resultierende Schalldämmung von Außenbauteilen

Außenwände sind meist keine homogenen Gebilde, sondern enthalten Elemente mit abweichender Schalldämmung, wie z. B. Fenster, Rolladenkästen oder Lüftungseinrichtungen. Der Schalldurchgang durch eine solche aus mehreren Elementen zusammengesetzte Wand wird durch das resultierende Schalldämm-Maß aller Teilflächen beschrieben:

$$R_{\text{res}} = -10 \lg \left(\frac{1}{S_{\text{ges}}} \sum_{n=1}^m S_n 10^{-R_n/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB} . \quad (3)$$

Hierbei bezeichnen S_n und R_n die Fläche und das Schalldämm-Maß des n -ten Elements, während $S_{\text{ges}} = S_1 + S_2 + \dots + S_m$ die Gesamtfläche der Wand beschreibt. Die obige Gleichung gilt streng genommen nur für Terzwerte, kann aber näherungsweise auch auf das bewertete Schalldämm-Maß R_w angewandt werden. Ein Beispiel hierfür ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



$$\begin{aligned} R_{w,\text{res}} &= -10 \lg \left(\frac{1}{S_1 + S_2} \left[S_1 10^{-R_{w,1}/10 \text{ dB}} + S_2 10^{-R_{w,2}/10 \text{ dB}} \right] \right) \text{ dB} \\ &= -10 \lg \left(\frac{1}{1 \text{ m}^2 + 9 \text{ m}^2} \left[1 \text{ m}^2 10^{-30 \text{ dB}/10 \text{ dB}} + 9 \text{ m}^2 10^{-50 \text{ dB}/10 \text{ dB}} \right] \right) \text{ dB} \\ &= 39,6 \text{ dB} \end{aligned}$$

Abb. 4: Beispiel für die Berechnung des resultierenden Schalldämm-Maßes $R_{w,\text{res}}$ einer Außenwand mit Fenster.

Wie aus dem Beispiel zu ersehen ist, wird das resultierende Schalldämm-Maß von dem Element mit der niedrigsten Schalldämmung bestimmt. Selbst wenn man die Schalldämmung des Mauerwerks beliebig erhöhen würde, wäre in dem oben betrachteten Fall maximal $R_{w,\text{res}} = 40,0 \text{ dB}$ erreichbar.

Wie aus dem obigem Beispiel hervorgeht, erfolgt die Schallübertragung durch Außenwände in der Praxis in vielen Fällen vor allem über die Fenster. Dies gilt selbst dann, wenn die Fenster nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der Außenfläche einnehmen, weil sie im Vergleich zur Wand zumeist eine deutlich geringere Schalldämmung aufweisen. Da sich die akustische Wirkung von WDVS auf die eigentliche Wandfläche beschränkt, ist ihr Einfluss auf die resultierende Schalldämmung in solchen Fällen nur gering.

Die nachfolgende Abbildung demonstriert den Einfluss von Fenstern auf die Schalldämmung von Außenwänden anhand einer Berechnung. Die Rechnung erfolgte für ein Fenster mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von $R_{w,\text{Fenster}} = 35 \text{ dB}$, was es einem im Wohnungsbau üblichen Wert entspricht. Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, wird das resultierende Schalldämm-Maß der Gebäudehülle schon bei einem Fensterflächenanteil von etwa 20 % fast ausschließlich durch die Fenster bestimmt, sofern die Schalldämmung der Wand mindestens $R_{w,\text{Wand}} = 45 \text{ dB}$ beträgt (dieser Wert wird in der Regel auch von leichten Außenwänden erreicht). Wird die Schalldämmung der Wand über

45 dB hinaus erhöht, so verbessert sich das resultierende Schalldämm-Maß nur noch unwesentlich (bei völlig schallundurchlässiger Wand würde $R_{w,res}$ von 40,5 dB auf 42,0 dB ansteigen). Die Anbringung eines WDVS hat in dem betrachteten Fall daher nur einen geringen akustischen Einfluss, der in der Praxis so gut wie keine Rolle spielt.

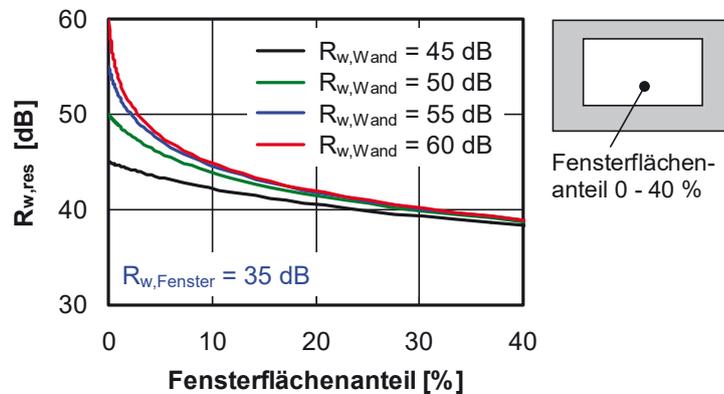


Abb. 5: Resultierendes Schalldämm-Maß einer Außenwand mit Fenster in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil. Bei der Berechnung wurde von einem Fenster mit einer Schalldämmung von $R_{w,Fenster} = 35$ dB (Schallschutzklasse 3 nach VDI 2719 [53]) ausgegangen. Die Berechnung der dargestellten Kurven erfolgte nach Gl. (3), wobei die Schalldämmung der Wandfläche schrittweise von $R_{w,Wand} = 45$ dB bis $R_{w,Wand} = 60$ dB erhöht wurde.

5 Schalldämmung von WDVS

5.1 Aufbau und Klassifizierung von WDVS

Wärmedämm-Verbundsysteme bestehen aus Dämmstoffplatten, die mit Klebemörtel an der Grundwand befestigt und anschließend verputzt werden. Die Verklebung erfolgt oft teilflächig, wobei die prozentuale Klebefläche üblicherweise etwa 40 - 60 % beträgt. Die Putzschicht wird in der Regel mit einem eingebettetem Armierungsgewebe aus Kunststoff verstärkt. Im Gegensatz zu einer zusätzlichen Verdübelung des WDVS, die aus statischen Gründen erforderlich sein kann, hat die Armierung jedoch keinen merklichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften.

Als Dämmstoff wird in den meisten Fällen Polystyrol oder Mineralfaser verwendet. Gelegentlich kommen auch Platten aus Polyurethan-Schaum, Porenbeton oder nachwachsenden Stoffen (Flachs, Hanf, etc.) zum Einsatz. Dies ist jedoch eher die Ausnahme. Bei den üblichen Dämmstoffen sind vier verschiedene Produktgruppen zu unterscheiden (im Folgenden mit den in Klammern angegebenen Abkürzungen bezeichnet):

- expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS),
- elastifiziertes EPS (EPSe),
- Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP),
- Mineralfaser-Lamellenplatten (MFL).

Die aufgeführten Dämmstofftypen unterscheiden sich in ihren Materialeigenschaften und damit auch im akustischen Verhalten. So wird z. B. EPS nach der Herstellung einer mechanischen Vorbehandlung unterzogen, die die Elastizität des Materials erhöht. Dämmplatten aus EPS weisen deshalb bei gleicher Dicke eine geringere dynamische Steifigkeit auf. Der Unterschied zwischen MFP- und MFL-Platten besteht in der Ausrichtung der Fasern: Während sie bei den Putzträgerplatten parallel zur Plattenoberfläche verlaufen, sind sie bei den Lamellenplatten senkrecht zur Oberfläche angeordnet. Hierdurch ist bei den MFP-Platten im Vergleich eine deutliche Absenkung der dynamischen Steifigkeit zu verzeichnen.

In der Praxis kommt es erfahrungsgemäß nicht selten vor, dass nicht alle für die akustische Auslegung von WDVS erforderlichen technischen Daten verfügbar sind. Dies gilt insbesondere für die dynamische Steifigkeit $s' = E_{\text{dyn}} / d$ (mit E_{dyn} = dynamischer Elastizitätsmodul und d = Dämmstoffdicke) der Dämmplatten sowie bei Mineralfaser-Dämmstoffen außerdem für den längenbezogenen Strömungswiderstand r . Um in solchen Fällen dennoch eine grobe Abschätzung zu ermöglichen, kann es sinnvoll sein, die fehlenden Daten durch repräsentative materialspezifische Mittelwerte zu ersetzen. Um hierbei Hilfestellung zu leisten, wurde ein umfangreicher Fundus von akustischen Messdaten statistisch ausgewertet. Die ermittelten Ergebnisse sind in den beiden nachfolgenden Tabellen zusammengefasst:

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	0,5	0,1	0,4 - 0,8
Mineralfaser-Lamellenplatten	6,3	2,9	1,1 - 14,0

Tab. 1: Dynamischer Elastizitätsmodul von bauüblichen Dämmstoffen als Bestandteil von WDVS. Statistische Auswertung von ca. 200 Prüfstandsmessungen. Neben Mittelwert und Standardabweichung ist außerdem der Wertebereich der zugrunde liegenden Daten (Spanne zwischen Minimum und Maximum) mit angegeben.

Material	längenbez. Strömungsw. r [kPa s/m ²]		
	Mittelwert	Standardabweich.	Wertebereich
Mineralfaser-Putzträgerplatten	32	13	20 - 64
Mineralfaser-Lamellenplatten	25	7	17 - 40

Tab. 2: Längenbezogener Strömungswiderstand von Mineralfaser-Dämmstoffen für WDVS. Statistische Auswertung von ca. 70 Prüfstandsmessungen. Gleiche Darstellung wie in Tabelle 1.

5.2 Akustisches Wirkungsprinzip

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, weisen alle WDVS unabhängig vom verwendeten Dämmstoff im Prinzip den gleichen Aufbau auf. Dies gilt – mit Ausnahme von Holzweichfaserplatten – sowohl für die Anbringung an Massiv- als auch an Ständerwänden. Eine Skizze des praxisüblichen Aufbaus ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

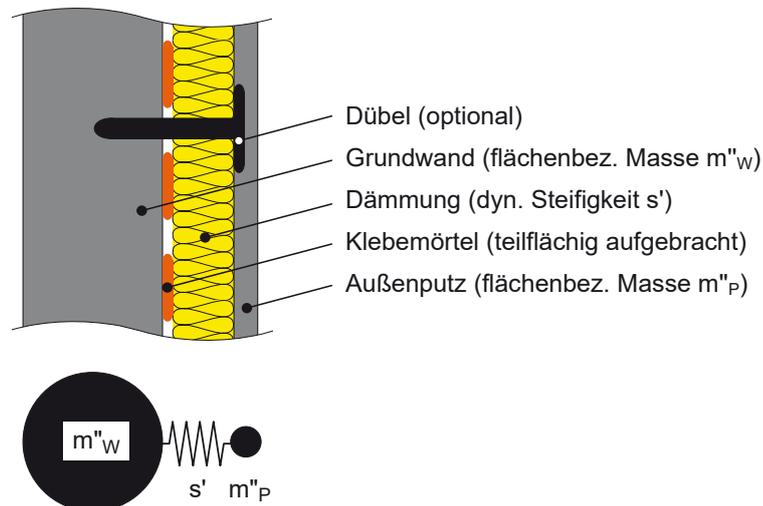


Abb. 6: Prinzipskizze des Aufbaus einer massiven Außenwand mit WDVS. Der untere Teil der Skizze veranschaulicht das akustische Wirkungsprinzip (Masse-Feder-Masse System).

Eine Wand mit WDVS bildet ein schwingungsfähiges System, wobei Grundwand und Putzschicht als Massen und die Wärmedämmung als Feder wirken. Das akustische Verhalten eines solchen Systems wird vor allem durch seine Resonanzfrequenz f_R bestimmt, die von der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht, s' , und den flächenbezogenen Massen von Wand und Putzschicht, m''_w und m''_p , abhängt:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m''_p} + \frac{1}{m''_w} \right)} \quad (4)$$

Für $m''_p \ll m''_w$ (im Massivbau ist diese Voraussetzung in der Praxis fast immer erfüllt) ergibt sich aus obiger Gleichung der vereinfachte Ausdruck:

$$f_R \cong 160 \sqrt{\frac{s'}{m''_p}} \text{ Hz} = 160 \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}}}{d m''_p}} \text{ Hz} \quad (5)$$

In die obige Zahlenwertgleichung, in der E_{dyn} den dynamischen Elastizitätsmodul des Dämmstoffs und d die Dicke der Dämmschicht bezeichnen, sind s' in MN/m^3 , E_{dyn} in MN/m^2 , m''_p in kg/m^2 und d in der Einheit m einzusetzen. Die Resonanzfrequenz ist demnach um so niedriger, je schwerer die Putzschicht, je größer die Dämmstoffdicke

und je weicher der verwendete Dämmstoff ist (weiche Materialien weisen einen niedrigen dynamischen Elastizitätsmodul auf).

Die Schallschutzwirkung von WDVS wird durch die Verbesserung der Schalldämmung

$$\Delta R = R - R_0 \quad (6)$$

beschrieben, wobei R das Schalldämm-Maß der Wand mit WDVS und R_0 die Schalldämmung der ungedämmten Wand bezeichnet. Bei positiven Werten von ΔR erfolgt eine Erhöhung, bei negativen Werten hingegen eine Verminderung der Schalldämmung. Die Verbesserung ΔR ist eine frequenzabhängige Größe und wird in der Bauakustik zumeist als Terzspektrum angegeben.

Obgleich sich das akustische Verhalten von WDVS abhängig von Aufbau und verwendetem Dämmstoff stark voneinander unterscheiden kann, folgt die Verbesserung der Schalldämmung aufgrund der einheitlichen Wirkungsweise einem charakteristischen Frequenzverlauf. Dieser Verlauf, der vor allem von der Resonanzfrequenz f_R sowie in geringerem Maße außerdem von der so genannten Knickfrequenz f_K bestimmt wird, ist in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt:

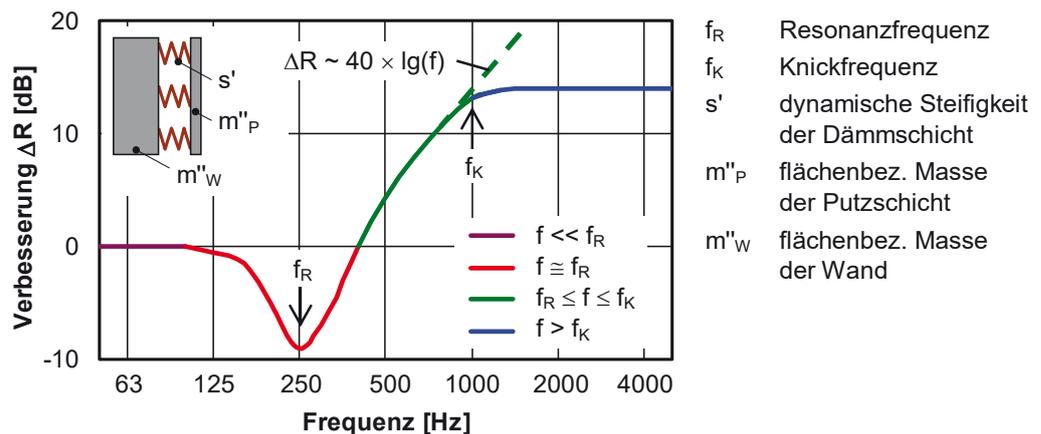


Abb. 7: Verbesserung der Schalldämmung einer Massivwand durch ein WDVS in Abhängigkeit von der Frequenz (schematische Darstellung am Beispiel eines WDVS mit einer Resonanzfrequenz von $f_R = 250$ Hz).

Der Frequenzverlauf lässt sich in vier charakteristische Bereiche unterteilen, die in der Abbildung durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet sind:

$f \ll f_R$: Bei Frequenzen weit unterhalb der Resonanz verhält sich die Vorsatzschale akustisch weitgehend neutral, d. h. es gilt $\Delta R \approx 0$.

$f \approx f_R$: Im Bereich der Resonanzfrequenz treten starke Schwingungen auf, so dass eine Verschlechterung der Schalldämmung erfolgt ($\Delta R < 0$). Die Tiefe des Dämmungseinbruchs hängt von den inneren Verlusten des schwingenden Systems ab und wird mit zunehmender Dämpfung geringer.

$f_R \leq f \leq f_K$: Oberhalb der Resonanzfrequenz steigt die Verbesserung der Schalldämmung theoretisch mit $40 \lg(f/f_R) = 12 \text{ dB/Oktave}$ an. In der Praxis fällt der Anstieg, besonders bei stark bedämpften Systemen, zumeist etwas schwächer aus.

$f > f_K$: Bei hohen Frequenzen tritt infolge der Schallausbreitung im Dämmstoff eine Abflachung oder sogar eine Richtungsumkehr des Anstiegs ein. Die Frequenz, bei der dieser Effekt einsetzt, wird als Knickfrequenz f_K bezeichnet.

Im Bereich unterhalb der Knickfrequenz entspricht die Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS im allgemeinen recht gut dem akustischen Verhalten eines bedämpften Masse-Feder-Systems:

$$\Delta R = 20 \lg \left(\sqrt{\frac{(1 - (f/f_R)^2)^2 + 4D^2(f/f_R)^2}{1 + 4D^2(f/f_R)^2}} \right) \text{ dB} . \quad (7)$$

Die Verbesserung ΔR hängt hierbei neben der Frequenz f lediglich von der Resonanzfrequenz f_R und dem Lehr'schen Dämpfungsmaß D ab, das sich gemäß $D = \eta/2$ aus dem Gesamtverlustfaktor η des schwingenden Systems ergibt. Das akustische Verhalten eines bedämpften Masse-Feder-Systems ist in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht:

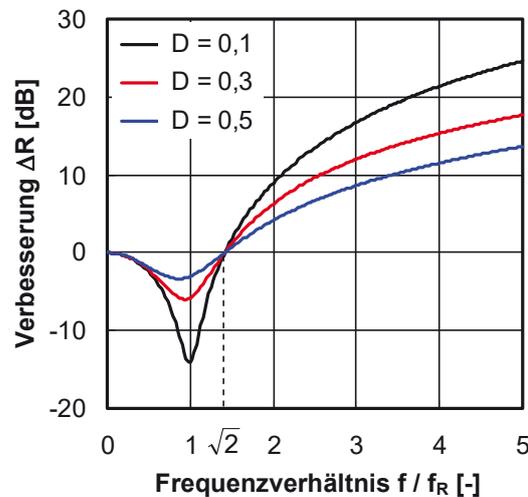


Abb. 8: Verbesserung der Schalldämmung durch ein bedämpften Masse-Feder-System in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis f / f_R , für verschiedene Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes D . Die dargestellten Kurven wurden mit Gl. (7) berechnet. Positive Werte bedeuten eine Verminderung, negative eine Verstärkung der Schallübertragung. Neben der Resonanzfrequenz hat die Dämpfung des Systems maßgebenden Einfluss auf das akustische Verhalten.

Wegen ihres Resonanzverhaltens bewirken WDVS abhängig vom Frequenzbereich grundsätzlich sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der Schalldämmung. Die Verbesserung erfolgt nur in genügendem Abstand oberhalb der Reso-

nanzfrequenz, während im Resonanzbereich selbst eine Verschlechterung eintritt. Liegt die Resonanz zu hoch, so ist statt der angestrebten Erhöhung im Gegenteil eine Abnahme des bewerteten Schalldämm-Maßes zu verzeichnen. Man strebt deshalb bei der akustischen Auslegung von WDVS zumeist eine möglichst niedrige Resonanzfrequenz an. Dies erscheint auf den ersten Blick sinnvoll, ist in der Praxis jedoch oft problematisch, da Außenlärm bei tiefen Frequenzen häufig hohe Pegelanteile aufweist. Fallen die maßgebenden Geräuschanteile in den Resonanzbereich des WDVS, so werden sie verstärkt übertragen und der bauliche Schallschutz verschlechtert sich. Unglücklicherweise ist dieser Effekt im bewerteten Schalldämm-Maß R_w , das laut DIN 4109 als Beurteilungsgröße für den Schallschutz von Außenbauteilen heranzuziehen ist, zumeist nicht sichtbar. Eine realistische Beurteilung der Schallschutzwirkung ergibt sich deshalb zumeist erst dann, wenn neben R_w auch der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ in die Betrachtung einbezogen wird.

5.3 Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS

Maßgebender Kennwert für die akustische Wirkung von WDVS ist die im vorangehenden Abschnitt definierte Verbesserung ΔR . Allerdings handelt es sich hierbei um eine frequenzabhängige Größe, während für die bauakustische Planung Einzahlangaben benötigt werden. Aus diesem Grund definiert man analog zu ΔR die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ΔR_w :

$$\Delta R_w = R_w - R_{w,o} , \quad (8)$$

wobei R_w und $R_{w,o}$ das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand mit und ohne WDVS bezeichnen. In gleicher Weise wird auch die Verbesserung für andere Einzahlangaben, wie z. B. $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ gebildet:

$$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) = (R_w + C_{tr,50-5000}) - (R_w + C_{tr,50-5000})_o . \quad (9)$$

Auch hier repräsentiert der Index o wieder die Grundwand ohne WDVS.

Unter der Voraussetzung $m''_p \ll m''_w$ (d. h. Putzschicht sehr viel leichter als Grundwand) ist die Verbesserung ΔR näherungsweise als bauteilunabhängig anzusehen. In anderen Worten bedeutet dies, dass dasselbe WDVS auf allen Grundwänden akustisch in gleicher Weise wirkt. Diese Tatsache erlaubt es, die Veränderung der Schalldämmung einer Wand durch ein WDVS auf einfache Weise rechnerisch nachzubilden: Man addiert einfach die Verbesserung durch das WDVS, ΔR , terzweise zur Schalldämmung der Grundwand R_o und berechnet für das neue Spektrum das bewertete Schalldämm-Maß R_w . Unter Verwendung von $R_{w,o}$ (also dem bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS) erhält man daraus nach Gl. (8) unmittelbar die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ΔR_w . Die beschriebene Vorgehensweise ist in Abb. 9 am Beispiel von idealisierten Bauteilen veranschaulicht:

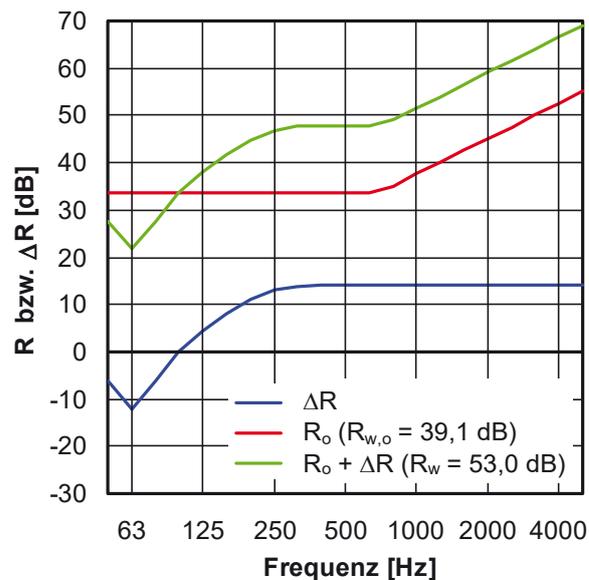


Abb. 9: Rechnerische Bestimmung der Verbesserung ΔR_w durch terzweise Addition von R und ΔR sowie Berechnung der bewerteten Schalldämm-Maße für das Ausgangs- und das Ergebnisspektrum. Für das dargestellte Beispiel wurden zwei idealisierte Bauteile betrachtet: Ein WDVS mit einer Resonanzfrequenz von $f_R = 63$ Hz (blaue Kurve) und eine Grundwand mit $m'' \cong 100$ kg/m² und $R_{w,o} = 39,1$ dB (rote Kurve). Für die resultierende Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ergibt sich $\Delta R_w = R_w - R_{w,o} = 53,0$ dB - 39,1 dB = 13,9 dB.

5.4 Einfluss der Resonanzfrequenz

Auf die große Bedeutung der Resonanzfrequenz für das akustische Verhalten von WDVS wurde bereits hingewiesen. Es wurde auch erwähnt, dass bei niedriger Resonanzfrequenz - zumindest im Hinblick auf das bewertete Schalldämm-Maß R_w - eine akustische Verbesserung eintritt, während eine hohe Resonanzfrequenz eine Verschlechterung der Schalldämmung bewirken kann. Im Folgenden wird dieser Effekt an einem Beispiel veranschaulicht. Dabei wird im Prinzip die gleiche Vorgehensweise wie im vorangehenden Abschnitt verwendet. Es werden jedoch zwei ansonsten gleiche WDVS mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz ($f_R = 125$ Hz und $f_R = 250$ Hz) betrachtet, die rechnerisch mit der gleichen Grundwand kombiniert werden.

Wie aus der Darstellung in Abb. 10 hervorgeht, ist bei der niedrigen Resonanzfrequenz eine Verbesserung der Schalldämmung um $\Delta R_w = 5,4$ dB zu verzeichnen, während bei der hohen Resonanzfrequenz eine Verschlechterung um $\Delta R_w = 1,7$ dB erfolgt. Der Grund für die Verschlechterung des bewerteten Schalldämm-Maßes besteht darin, dass die Resonanz in diesem Fall in einen bauakustisch maßgeblichen Frequenzbereich fällt und dort die Dämmung massiv herabsetzt.

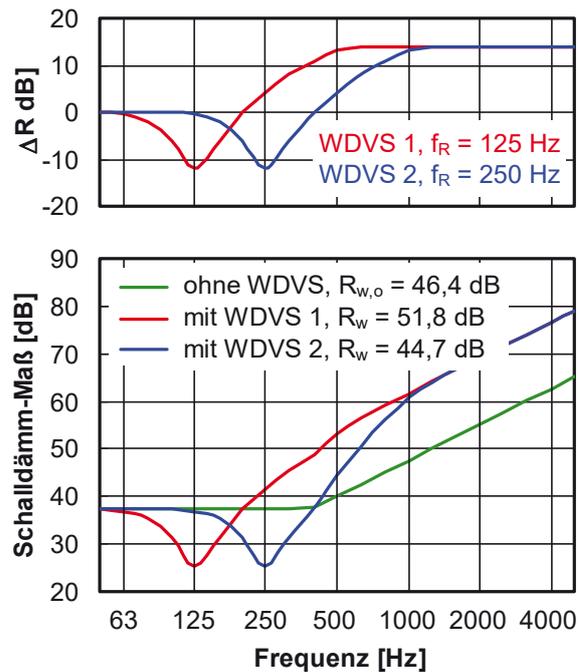


Abb. 10: Einfluss der Resonanzfrequenz auf das bewertete Schalldämm-Maß R_w am Beispiel von drei idealisierten Bauteilen. Rechnerische Kombination von zwei sonst gleichen WDVS mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz ($f_R = 125$ Hz bzw. $f_R = 250$ Hz, rote bzw. blaue Kurve im oberen Teil der Abbildung) mit der gleichen Grundwand ($m'' \cong 180$ kg/m², $R_{w,o} = 46,4$ dB, grüne Kurve im unteren Teil der Abbildung). Für das WDVS mit $f_R = 125$ Hz ergibt sich eine Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von $\Delta R_w = 51,8$ dB - 46,4 dB = 5,4 dB. Bei dem WDVS mit $f_R = 250$ Hz beträgt die Verbesserung $\Delta R_w = 44,7$ dB - 46,4 dB = -1,7 dB, d. h. hier tritt eine Abnahme der Schalldämmung ein.

5.5 Einfluss der Grundwand

In Abschnitt 5.3 wurde darauf hingewiesen, dass die Verbesserung ΔR als näherungsweise beuteilunabhängig anzusehen ist. Wegen der Frequenzabhängigkeit von ΔR gilt diese Aussage allerdings nur für einzelne Frequenzen, in der Bauakustik also für einzelne Terzen. Bei den aus Terzspektren gebildeten Einzahlangaben, also z. B. dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w , trifft die Aussage hingegen nicht zu. Es ist im Gegenteil ein starker Einfluss der Grundwand auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes festzustellen, und zwar dahingehend, dass leichte Wände eine Erhöhung von ΔR_w bewirken, während bei schweren Wänden mit hoher Schalldämmung nur niedrige ΔR_w -Werte erreicht werden. Der Effekt ist zahlenmäßig fast ebenso groß wie der Einfluss der Resonanzfrequenz und muss bei akustischen Berechnungen daher unbedingt berücksichtigt werden.

Die Ursache für den Einfluss der Grundwand auf ΔR_w liegt vereinfacht ausgedrückt im Zusammenspiel der Frequenzspektren von R_o und ΔR , die sich grundlegend voneinander unterscheiden. Hat die Grundwand in dem Frequenzbereich, in dem das WDVS am stärksten wirksam ist, eine hohe Schalldämmung, so ändert sich das bewertete Schall-

dämm-Maß nur wenig, da die insgesamt übertragene Schall-Leistung kaum abnimmt (die maßgebenden Leistungsanteile entstammen den Frequenzbereichen mit niedriger Schalldämmung). Erfolgt die Verbesserung durch das WDVS hingegen in einem Frequenzbereich, in dem die Schalldämmung der Wand gering ist, so ist der Einfluss auf das bewertete Schalldämm-Maß erheblich größer. In Abb. 11 ist dieser Zusammenhang am Beispiel von drei idealisierten Bauteilen (zwei unterschiedlich schweren Wänden und einem WDVS) veranschaulicht.

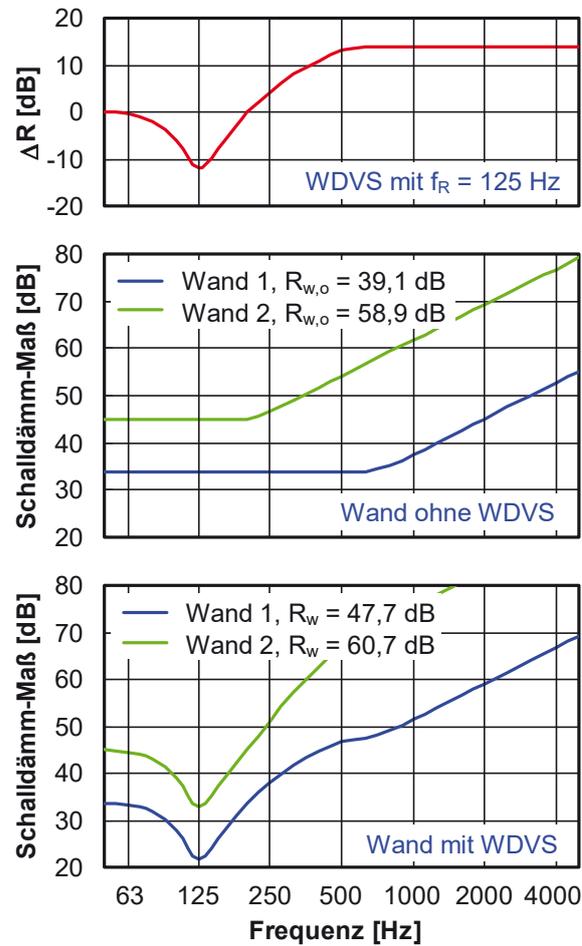


Abb. 11: Einfluss der Grundwand auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch ein WDVS (Berechnung mit idealisierten Bauteilen).

Oben: Verbesserung der Schalldämmung durch ein WDVS mit $f_R = 125$ Hz.

Mitte: Schalldämmkurven von zwei unterschiedlich schweren Grundwänden (flächenbezogene Masse ca. 100 bzw. 400 kg/m²).

Unten: Schalldämmung der beiden Grundwände in Verbindung mit dem WDVS.

Wie sich aus den in der Legende aufgeführten Einzulangaben entnehmen lässt, beträgt die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS bei der leichten Wand $\Delta R_w = 47,7 \text{ dB} - 39,1 \text{ dB} = 8,6 \text{ dB}$, bei der schweren Wand hingegen nur $\Delta R_w = 60,7 \text{ dB} - 58,9 \text{ dB} = 1,8 \text{ dB}$.

5.6 Weitere Einflussgrößen

Neben der Resonanzfrequenz und der Schalldämmung der Grundwand hängt die akustische Wirkung von WDVS von weiteren Einflussgrößen ab. Die drei wichtigsten – Befestigung des WDVS mit Dübeln, prozentualer Klebeflächenanteil und Strömungswiderstand bei Mineralfaser – werden im Folgenden kurz besprochen:

- Verdübelung:** Bei der Befestigung des WDVS mit Dübeln wird die federnde Dämmschicht mechanisch überbrückt, so dass die Schwingungen des Systems gehemmt werden. Dies hat eine Verminderung der akustischen Wirkung im guten wie im schlechten Sinn zur Folge: vorhandene Verbesserungen werden abgeschwächt und Verschlechterungen gemildert.
- Klebefläche:** Bei der üblichen teilflächigen Verklebung zwischen WDVS und Grundwand wirken die verbleibenden luftgefüllten Hohlräume wie eine zusätzliche Feder, die die dynamische Steifigkeit und infolge dessen auch die Resonanzfrequenz herabsetzt. Eine Vergrößerung des prozentualen Klebeflächenanteils führt daher im Allgemeinen zu einer Verminderung der akustischen Wirkung.
- Strömungswid.:** Dämmstoffe aus Mineralfaser weisen eine vergleichsweise hohe innere Dämpfung auf, die in Zusammenhang mit ihrem längenbezogenen Strömungswiderstand steht. Der Strömungswiderstand wirkt sich deshalb ebenfalls auf das akustische Verhalten von WDVS aus, wobei eine Zunahme des Widerstandes normalerweise eine Erhöhung der Schalldämmung bewirkt. Bei Ständerwänden ist der Einfluss des Strömungswiderstandes wegen der höheren Resonanzfrequenz des WDVS und der vergleichsweise großen inneren Dämpfung der Beplankungsplatten allerdings deutlich geringer als bei Massivwänden und braucht deshalb bei der Berechnung der Schalldämmung nicht berücksichtigt zu werden.

Die erwähnten Einflussgrößen werden in dem entwickelten Prognoseverfahren zur Berechnung der Schalldämmung durch entsprechende Korrekturen berücksichtigt.

5.7 WDVS auf Ständerwänden

Massive Wände mit WDVS lassen sich wie schon erwähnt in erster Näherung als Masse-Feder-Masse System auffassen, wobei Wand und Putzschicht die Massen und die Dämmschicht als Feder wirken. Dies gilt im Prinzip auch für WDVS auf Ständerwänden, wobei die Verhältnisse hier allerdings ein wenig komplizierter sind, da – wie in Abb. 12 erkennbar – immer mehrere Massen und Federn vorhanden sind.

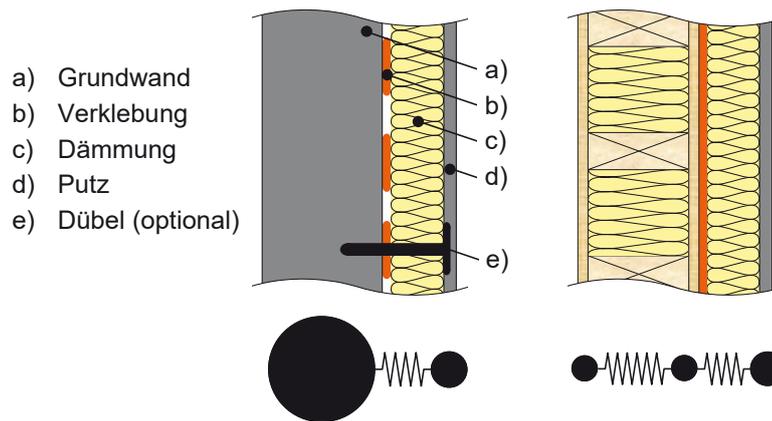


Abb. 12: Massiv- und Ständerwand mit WDVS mit resultierendem akustischen Wirkungsprinzip als Masse-Feder-Masse System.

Im einfachsten Fall besteht eine Ständerwand mit WDVS aus drei Massen und zwei Federn. Ein derartiges System weist zwei Resonanzfrequenzen auf, die sich gemäß der nachfolgenden Beziehung berechnen lassen [54]:

$$f_R = \frac{1}{2^{3/2} \pi} \left\{ \frac{s'_L + s'_D}{m''_A} + \frac{s'_L}{m''_I} + \frac{s'_D}{m''_P} \mp \left[\left(\frac{s'_L + s'_D}{m''_A} + \frac{s'_L}{m''_I} + \frac{s'_D}{m''_P} \right)^2 - 4s'_L s'_D \left(\frac{1}{m''_I m''_A} + \frac{1}{m''_A m''_P} + \frac{1}{m''_I m''_P} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Hierbei bezeichnen s'_L und s'_D die dynamischen Steifigkeiten der Luftschicht im Wandhohlraum und der Dämmschicht des WDVS, während die flächenbezogenen Massen m''_I , m''_A und m''_P der innen- und außenseitigen Beplankung der Ständerwand sowie der Putzschicht des WDVS zugeordnet sind (zur Masse der außenseitigen Beplankung zählt auch der zur Befestigung des WDVS verwendete Klebstoff). Die Ordnung der Resonanz (untere oder obere Resonanzfrequenz) ergibt sich aus dem Vorzeichen vor der eckigen Klammer.

Für Ständerwände mit WDVS gilt normalerweise immer $s'_L \ll s'_D$, d. h. die Luftschicht im Wandhohlraum ist sehr viel weicher als die Dämmschicht des WDVS. Die mit Gl. (10) berechneten Resonanzfrequenzen (insbesondere die Resonanzfrequenz des WDVS) entsprechen in diesem Fall in guter Näherung den Werten, die sich für ein einfaches Masse-Feder-Masse System ergeben würden. Im Folgenden werden deshalb für die Doppelschalenresonanz der Ständerwand, f_D , und die Resonanzfrequenz des WDVS, f_R , vereinfachend die nachfolgend aufgeführten Berechnungsformeln (mit den gleichen Bezeichnungen wie oben) verwendet:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'_L \left(\frac{1}{m''_I} + \frac{1}{m''_A} \right)}, \quad (11)$$

wobei sich die dynamische Steifigkeit der Luftschicht gemäß der Beziehung

$$s'_L = \frac{0,111 \text{ MN/m}^2}{d} \quad (12)$$

aus dem Schalenabstand der Wand d ergibt (um die dyn. Steifigkeit in der Einheit MN/m^3 zu erhalten, ist d in Metern in die Gleichung einzusetzen). Die obige Beziehung gilt für den Fall, dass der Wandhohlraum mit einem offenporigen Dämmstoff mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand von $r \geq 5 \text{ kPa s/m}^2$ gefüllt ist, was in der Praxis fast immer zutrifft.

Für die Resonanzfrequenz des WDVS ergibt sich analog zu Gl. (4) der Ausdruck

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'_D \left(\frac{1}{m''_A} + \frac{1}{m''_P} \right)}, \quad (13)$$

der als Zahlenwertgleichung (in die s'_D in MN/m^3 und m''_A sowie m''_P in kg/m^2 einzusetzen sind) die Form

$$f_R \cong 160 \sqrt{s'_D \left(\frac{1}{m''_A} + \frac{1}{m''_P} \right)} \text{ Hz} \quad (14)$$

annimmt.

6 Versuchsaufbau

Da es äußerst kompliziert und aufwändig ist, die Schalldämmung von Ständerwänden mit WDVS theoretisch zu berechnen, wurden statt dessen systematische Messungen in einem bauakustischen Prüfstand durchgeführt. Um den großen baulichen Aufwand zur Herstellung der Wände und WDVS herabzusetzen und die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu verbessern, wurde ein spezieller Versuchsaufbau verwendet, der sich in zweifacher Hinsicht von üblichen Schalldämm-Messungen an Wänden unterscheidet:

- Anstatt an vollflächigen Wänden wurden die Messungen an einem Wandausschnitt mit einer Fläche von ca. $1,8 \text{ m}^2$ (Abmessungen $B \times H = 1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$) durchgeführt. Aus früheren Versuchen an Metallständerwänden ist bekannt, dass sich das für derartige Ausschnitte ermittelte Schalldämm-Maß nur verhältnismäßig wenig von der Schalldämmung vollflächiger Wände unterscheidet [55]. Außerdem kam es bei den durchgeführten Messungen weniger auf den Absolutwert der Schalldämmung, als vielmehr auf die Differenz der Werte mit und ohne WDVS an. Da sich die akustischen Unterschiede zwischen dem voll- und teilflächigen Wandaufbau bei der Differenzbildung weitgehend aus dem Ergebnis herausheben, ist die reduzierte Prüffläche im vorliegenden Fall nicht nachteilig und beeinträchtigt die Aussagefähigkeit der Ergebnisse nicht.
- Die verwendeten WDVS wurden nicht direkt an den untersuchten Wänden angebracht, sondern als separate Elemente hergestellt, die mehrfach verwendet und

mit unterschiedlichen Wänden kombiniert werden konnten. Dazu wurden die WDVS auf OSB-Platten aufgeklebt, die mit Einschlagmutter und Gewindestangen an den Ständern der Wände befestigt wurden und dort die äußere Beplankung bildeten. Durch diese Vorgehensweise konnte ein- und dasselbe WDVS für sämtliche untersuchten Wände verwendet werden, was nicht nur den Herstellungsaufwand und den erforderlichen Zeitbedarf verminderte, sondern außerdem die Vergleichbarkeit der Messergebnisse beträchtlich verbesserte, da hierdurch eine der größten Fehlerquellen (abweichende Materialeigenschaften und handwerkliche Unterschiede bei der Herstellung gleichartiger WDVS) entfiel.

Nachfolgend wird der verwendete Versuchsaufbau genauer beschrieben, wobei vor allem die akustisch maßgebenden Konstruktionsdetails im Vordergrund stehen. Dabei wird zunächst auf den Aufbau der Grundwände eingegangen und anschließend die Herstellung der WDVS erläutert.

6.1 Herstellung der Grundwände

Zur Messung der Schalldämmung wurden die untersuchten Ständerwände zwischen den Send- und den Empfangsraum eines bauakustischen Wandprüfstandes eingebaut, nachdem die Prüföffnung zuvor mittels einer hochschalldämmenden Maske in Leichbauweise auf die erforderlichen Abmessungen von $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ verkleinert worden war. Der erste Schritt bei der Herstellung der Wände bestand in der Montage der Ständer (Konstruktionsvollholz, Querschnitt $60 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$) in die Prüföffnung. Dies erfolgte mit Hilfe von Stahlwinkeln, die mit den Ständern verschraubt und mit Dübeln an Ober- und Unterseite der Öffnung befestigt wurden. Die Wände umfassten jeweils drei Ständer, wobei zwischen den beiden äußeren Ständern und den seitlichen Wänden der Öffnung ein etwa 1 cm breiter Spalt verblieb, der lose mit Mineralwolle gefüllt wurde. Hierdurch wurde erreicht, dass die Ständer – abgesehen von der Befestigung am oberen und unteren Ende – frei schwingen konnten und hinsichtlich ihres akustischen Verhaltens dem entsprechenden Ausschnitt aus einer großflächigen Wand sehr nahe kamen. Der Achsabstand der Ständer war (der Breite der vorhandenen Prüföffnung geschuldet) mit $58,5 \text{ cm}$ ein wenig kleiner als die sonst üblichen 62 cm , was sich aber kaum auf die Schalldämmung der Wände auswirkt.

Die Wände wurden so in die Prüföffnung (Laibungstiefe ca. 56 cm , mit durchgehender elastischer Trennfuge) eingebaut, dass vor dem WDVS auf der dem Senderraum zugewandten Seite der Öffnung jeweils eine ca. 20 cm tiefe Nische verblieb. Für die Nischentiefe auf der Empfangsraumseite der Öffnung ergaben sich unterschiedliche Werte, die abhängig von der Dicke der eingebauten Wand zwischen 0 cm und 13 cm betragen.

Nach dem Einbau der Ständer wurde zunächst die innenseitige (dem Empfangsraum zugewandte) Beplankung angebracht, die normalerweise – wie in der Praxis üblich – aus zwei Plattenlagen bestand. Die beiden Lagen (OSB-Platte auf der Innen- und Gipskartonplatte auf der Außenseite) wurden jeweils mit Holz- bzw. Schnellbauschrauben in einem Schraubabstand 28 cm an den Ständern befestigt, wobei die Platten nacheinander auf die Ständer aufgeschraubt, aber nicht nochmals untereinander verschraubt

oder verklebt wurden. Der Dämmstoff im Wandhohlraum bestand aus Glaswolle (Isover Akustic TP 1 Trennwandplatten mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand von $r \geq 5 \text{ kPa s/m}^2$) und füllte den Raum zwischen den Ständern (Schalenabstand je nach Aufbau 160 mm oder 100 mm) vollständig aus. Als letzter Schritt erfolgte der Einbau der äußeren Beplankung, die im Normalfall aus einer OSB-Platte (je nach Aufbau mit oder ohne WDVS) bestand. Ein Beispiel für eine der untersuchten Wände ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:



Abb. 13: Beispiel für den Einbau einer Holzständerwand in die Öffnung des Prüfstands (Ansicht vom Senderaum her). Die Ständer und die innenseitige Beplankung sind bereits montiert, die Gefachdämmung und die außenseitige Beplankung mit dem WDVS fehlen noch. Die in den Ständern erkennbaren Bohrungen dienen zur Montage des WDVS mittels Gewindestäben und Einschlagmuttern.

Der zwischen der innenseitigen Beplankung der Wand ($B \times H = 1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$) und den Rändern der Prüföffnung verbleibende 1 cm breite Spalt wurde umlaufend mit dem plastischen Dichtstoff Henkel Teroson RB IX (besser unter der früheren Bezeichnung Terostat IX bekannt) verschlossen. In gleicher Weise erfolgte auch die Abdichtung der außenseitigen Beplankung bzw. des WDVS, so dass die fertig eingebaute Wand jeweils über zwei Dichtungsebenen (zum Sende- und zum Empfangsraum hin) verfügte. Für die Dichtungen wurden je Wand insgesamt etwa 6 kg Terostat IX verwendet.

Neben Holzständerwänden umfasste das durchgeführte Messprogramm außerdem drei Metallständerwände sowie eine Massivholzwand. Der Einbau dieser Wände in die Prüföffnung erfolgte in ähnlicher Weise wie bei den Ständerwänden. Der Aufbau aller untersuchten Wände und WDVS wird später noch im Detail beschrieben.

6.2 Montage der WDVS

Die untersuchten WDVS wurden wie schon erwähnt als separate Bauteile hergestellt und erst später nach der Fertigstellung an den Ständern der Wände befestigt. Hierzu wurden die WDVS auf eine OSB-Platte aufgeklebt, die in eingebautem Zustand – d. h. nach Montage an den Ständern – zugleich die außenseitige Beplankung der Wand bildete (in einem einzigen Fall kam statt der OSB-Platte versuchsweise eine Gipsfaserplatte zum Einsatz).

Die Befestigung der OSB-Platte an den Ständern erfolgte mit in die Platte eingelassenen Einschlagmutter. Die Position dieser Muttern fluchtete mit in den Ständern angebrachten Bohrungen, durch die von der Rückseite der Wand her Gewindestangen (mit M6-Gewinde) geschoben und in die Muttern eingedreht wurden. Kontermuttern, die (unter Verwendung von Unterlegscheiben zur besseren Lastverteilung) auf der innenseitigen Beplankung der Wand anlagen, ermöglichten es, die OSB-Platte an den Ständern festzuziehen. Da sich in jedem Ständer 6 Gewindestangen befanden, erfolgte die Befestigung der Platte an insgesamt $3 \times 6 = 18$ Befestigungspunkten. Hierdurch ergab sich eine äußerst feste Verbindung, die einer bauüblichen Montage mit Schrauben im Hinblick auf Festigkeit und Belastbarkeit in nichts nachstand. Eine schematische Skizze der beschriebenen Befestigung ist in Abb. 14 dargestellt:

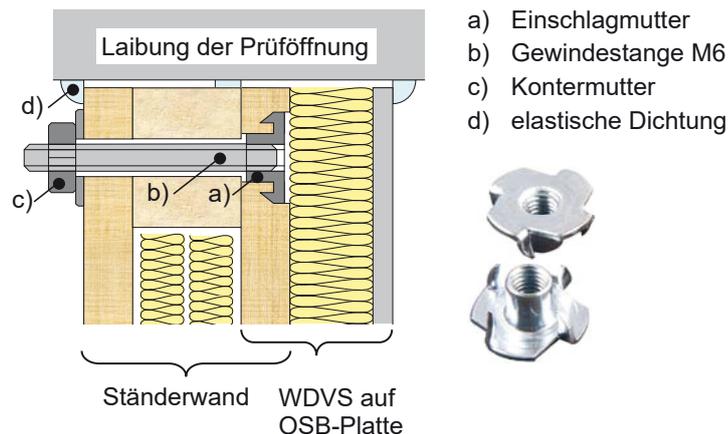


Abb. 14: Montage der untersuchten WDVS (OSB-Platte mit aufgeklebter und verputzter Dämmschicht, $B \times H = 1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$) an den Ständern der Wand mittels Einschlagmuttern und Gewindestäben. Rechts im Bild ist ein Foto der in die OSB-Platte eingelassenen Einschlagmuttern dargestellt.

Der Vorteil der beschriebenen Befestigungsweise besteht zum einen darin, dass dasselbe WDVS mehrfach in Verbindung mit unterschiedlichen Wänden verwendet werden kann. Zum anderen geht die Montage und Demontage des WDVS sehr schnell und einfach vonstatten, ohne dass die Wand hierzu geöffnet oder verändert werden muss. Lediglich die Dichtung zwischen WDVS und Prüföffnung muss bei jedem Umbau entfernt und wieder neu angebracht werden. Mit dem hierzu verwendeten plastischen Dichtstoff Terostat IX ist dies jedoch problemlos möglich. (Zunächst wurde der 1 cm breite Spalt zwischen dem WDVS und der Prüföffnung zusätzlich mit schallabsorbierender Polyesterfaser (Caruso Iso-Bond) gefüllt. Nachdem sich jedoch gezeigt hatte, dass dies so

gut wie keinen Einfluss auf die Schalldämmung hat, wurde auf die Füllung aus Polyesterfaser verzichtet und die Fuge vor dem Abdichten mit Terostat IX lediglich im vorderen Bereich mit Rundschnüren aus Polyurethanschaum verschlossen. Da der Schaumstoff sehr weich ist, ließen sich die Schnüre trotz ihres Durchmessers von 15 mm leicht in die Fuge einschieben.)

Eine Ausnahme von der oben beschriebenen Vorgehensweise war bei der Wand mit getrennten Ständern erforderlich. Um die Entstehung von Körperschallbrücken zwischen den Ständern zu vermeiden, mussten die Kontermuttern, mit denen das WDVS befestigt war, in diesem Fall statt an der rückseitigen Beplankung der Wand an der Rückseite der vorderen Ständer angebracht werden. Dies hatte zur Folge, dass die rückseitige Beplankung für jeden Umbau des WDVS geöffnet und wieder verschlossen werden musste. Obgleich dies selbstverständlich einen erhöhten Arbeitsaufwand mit sich brachte, war der Aufwand dennoch erheblich geringer, als dies bei herkömmlicher Vorgehensweise (d. h. bei Herstellung jeweils neuer WDVS) der Fall gewesen wäre.

Zum Einbau wurde die OSB-Platte mit dem WDVS unter Verwendung eines Hubwagens und einer daran befestigten dünnen Auflage vorsichtig in die Prüföffnung geschoben (siehe Abb. 15). Nach dem Anbringen der Gewindestäbe und dem Anziehen der Muttern konnte die Auflage dann leicht abgesenkt und aus der Öffnung zurückgezogen werden. Im Anschluss mussten noch die Randfugen zwischen WDVS und Prüföffnung mit Terostat IX abgedichtet werden. Danach war der Einbau des WDVS abgeschlossen und die Messung der Schalldämmung konnte erfolgen.

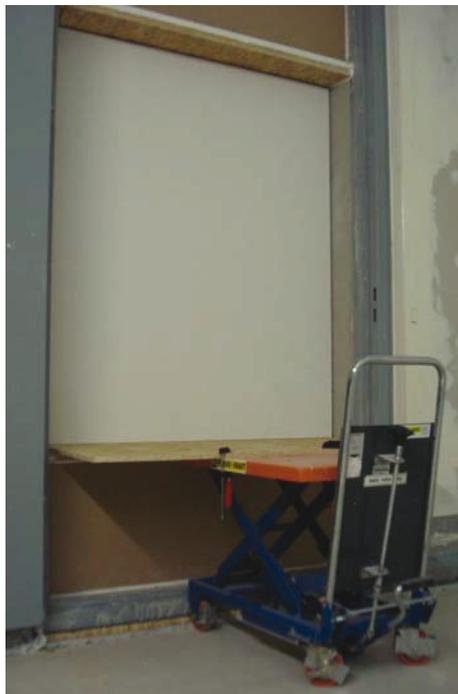


Abb. 14: Einbau eines WDVS in die Prüföffnung mit Hilfe eines Hubwagens (Ansicht vom Senderraum her). Die Befestigung an den Ständern erfolgte mit Gewin-

destäben und Muttern von der dem Empfangsraum zugewandten Seite der Wand (siehe Abb. 15).



Abb. 15: Rückseite einer Ständerwand mit Gewindestäben, Unterlegscheiben und Kontermuttern zur Befestigung des WDVS. Um Undichtigkeiten innerhalb der Wand zu vermeiden, wurden die Muttern im Empfangsraum – zumindest bei Wänden mit hoher Schalldämmung – sicherheitshalber zusätzlich mit Terostat IX abgedichtet.

Eine weitere Ausnahme von der beschriebenen Montageweise bilden WDVS aus Holzweichfaserplatten. Bei derartigen Dämmsystemen ist es üblich, auf die äußere Beplankung der Ständerwand zu verzichten und die Dämmplatten statt dessen mit Dübeln oder Klammern – wie in Abb. 16 schematisch dargestellt – direkt am Ständerwerk zu befestigen:

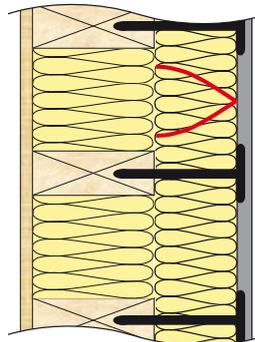


Abb. 16: Montage von WDVS aus Holzweichfaserplatten mit Dübeln direkt am Ständerwerk (ohne äußere Beplankung der Wand). Wegen des Fehlens einer Gegenmasse kann sich im WDVS zwar keine Masse-Feder-Masse Resonanz

ausbilden, es können jedoch stehende Wellen in der Dämmschicht entstehen (in der Abbildung schematisch als rote Linien angedeutet).

Um diese Einbausituation im Prüfstand nachzubilden, wurden die Holzweichfaserplatten mit Dübeln an 60 mm breiten Streifen aus OSB-Platten (gleiche Breite wie die Balken) befestigt. Die Streifen wiesen an den entsprechenden Stellen Einschlagmuttern auf und konnten so in üblicher Weise mit Gewindestangen und Kontermuttern an den Balken angebracht werden.

Holzweichfaserplatten, die direkt am Ständerwerk angebracht sind, verhalten sich akustisch anders als übliche, an der außenseitigen Beplankung der Wand befestigte WDVS. Da die Außenschale als Gegenmasse fehlt, kann sich die für WDVS charakteristische Masse-Feder-Masse Resonanz hier nicht ausbilden. Es können jedoch stehende Wellen in der Dämmschicht auftreten, die auch als Dickenresonanzen bezeichnet werden und im Resonanzbereich gleichfalls eine Verschlechterung der Schalldämmung bewirken. Dies tritt dann ein, wenn die Dämmschichtdicke einem Viertel der Longitudinalwellenlänge im Dämmstoff entspricht (man kann sich dies im Prinzip wie ein einseitig offenes Rohr mit festem Abschluss auf der einen und freiem Austritt auf der gegenüberliegenden Seite vorstellen). Die Resonanzfrequenz der stehenden Welle lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_S = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{s'_D}{d \rho_D}} \sqrt{\frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} , \quad (15)$$

wobei s'_D und ρ_D die dynamische Steifigkeit und die Rohdichte der Dämmschicht mit der Dicke d bezeichnen und μ die Poissonzahl des Dämmstoffs darstellt. Mit der Näherung $\mu = 0,35$ ergibt sich aus der obigen Beziehung die Zahlenwertgleichung

$$f_S \cong 0,317 \sqrt{\frac{s'_D}{m''_D}} \text{ Hz} , \quad (16)$$

in die s'_D in der Einheit MN/m^3 und die flächenbezogene Masse der Dämmschicht m''_D in kg/m^2 einzusetzen sind.

Alle untersuchten WDVS wiesen die gleiche Dämmstoffdicke von etwa 100 mm auf (dies stellt für Ständerwände, die von sich aus über eine höhere Wärmedämmung als Massivwände verfügen, einen typischen Wert dar). Auch die Putzschicht war bei allen Systemen mit etwa 10 kg/m^2 ungefähr gleich schwer. Da die Systeme jedoch aus verschiedenen Dämmstoffen mit unterschiedlicher dynamischer Steifigkeit bestanden, ergaben sich trotz der erwähnten Gemeinsamkeiten hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften beträchtliche Unterschiede. Eine genaue Beschreibung der untersuchten WDVS erfolgt in einem späteren Abschnitt.

6.3 Prüfstand

Der bauakustische Prüfstand, in dem die Messungen durchgeführt wurden, entsprach den Vorgaben nach DIN EN ISO 10140 [6]. Der Senderraum hatte ein Volumen von ca.

61 m³, das Empfangsraumvolumen betrug etwa 69 m³. Zur Erzeugung des Schallfeldes im Senderaum diente eine Dodekaeder-Lautsprecher, der während der Messungen mit einer pneumatischen Vorrichtung hin und her bewegt wurde. Für die Messung des Schallpegels im Sende- und Empfangsraum wurden feste Mikrofonpositionen verwendet, wobei jeweils über sechs verschiedene Positionen gemittelt wurde. Eine Skizze des Prüfstands mit einer in die Prüföffnung eingebauten Wand mit WDVS ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

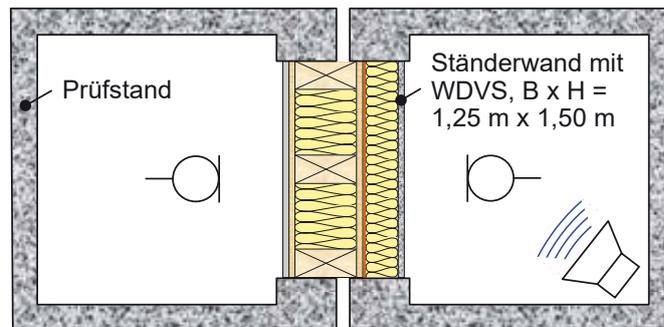


Abb. 17: Messung der Schalldämmung der untersuchten Wände in einem bauakustischen Wandprüfstand nach DIN EN ISO 10140 (schematisch).

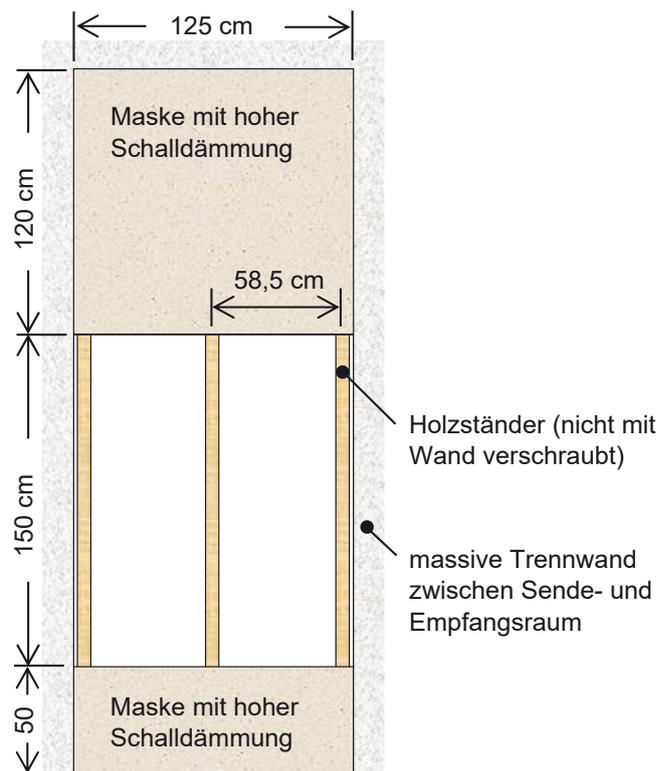


Abb. 18: Einbau der Ständerwände in die Prüföffnung zwischen Sende- und Empfangsraum.

Da die Prüföffnung größer als die Fläche der untersuchten Wände war, wurden die nicht benötigten Teilflächen der Öffnung ober- und unterhalb des Prüfobjekts, wie in

Abb. 18 dargestellt, durch hochschalldämmende Masken in Leichtbauweise verschlossen. In die verbleibende Öffnung mit den Maßen $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ wurden dann die untersuchten Ständerwände (mit je 3 Ständern mit 58,5 cm Achsabstand) eingebaut.

7 Messdurchführung und Vorversuche

7.1 Durchführung und Auswertung der Messungen

Bei den durchgeführten Messungen wurde jeweils die Schalldämmung der Prüfkörper mit und ohne WDVS ermittelt. Die Messungen erfolgten normgerecht nach DIN EN ISO 10140 [6] unter Verwendung einer geeichten bauakustischen Messausrüstung (Messsystem Norsonic RTA 840). Obgleich die Schalldämmung von Wänden im Prinzip von der Richtung des Schalldurchgangs unabhängig ist, treten in der Praxis dennoch kleine Unterschiede auf. Um diese Unterschiede zu eliminieren, wurden die untersuchten Wände einheitlich so in den Prüfstand eingebaut, dass das WDVS - analog zur realen Situation am Bau - dem Senderaum zugewandt war.

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

Da der für die Schalldämm-Messungen verwendete Senderaum P9a gleichzeitig auch Bestandteil eines Deckenprüfstandes ist, sind seine Wände mit Vorsatzschalen verkleidet. Diese Vorsatzschalen haben eine Resonanzfrequenz von 50 Hz, so dass sie bei dieser Frequenz in starkem Maße Schall absorbieren und das Schallfeld im Raum verzerren. Das hat zur Folge, dass sich bei der Messung der Schalldämmung bei 50 Hz systematisch zu hohe Werte ergeben. An und für sich ist das im vorliegenden Fall nicht kritisch, weil sich das Forschungsvorhaben vor allem auf das bewertete Schalldämm-Maß der untersuchten Wände konzentriert, das für den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz gebildet wird. Die überhöhten Messwerte bei 50 Hz können aber bei der Berechnung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ zu Abweichungen führen. Deshalb wurden die Messwerte rechnerisch korrigiert, indem der für das Schalldämm-Maß bei 50 Hz gemessene Wert einheitlich bei allen Wänden um 8,8 dB abgesenkt wurde. Die Korrektur von 8,8 dB wurde ermittelt, indem das Schalldämm-Maß bei 50 Hz unter Verwendung des Massegesetzes aus dem bei 63 Hz gemessenen Wert berechnet wurde. Anschließend wurde die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert gebildet und über alle vorhandenen Messungen gemittelt.

Einen wichtigen Ausgangswert, um die Schalldämmung von Wänden mit WDVS zu berechnen, stellt die dynamische Steifigkeit der verwendeten Dämmstoffplatten dar, da sie in starkem Maße die Resonanzfrequenz des WDVS bestimmt. Daher erfolgten im Rahmen des Forschungsvorhabens neben den Schalldämm-Messungen auch Messungen zur Ermittlung der dynamischen Steifigkeit. Hierbei wurde das Messverfahren nach DIN EN 29052-1 [7] eingesetzt, das zwar eigentlich für Trittschalldämmstoffe vorgesehen ist, aber mangels geeigneter alternativer Messmethoden im vorliegenden Fall auch für die verwendeten Wärmedämmstoffe herangezogen wurde. Die hierdurch entstehenden Abweichungen wurden bei der Berechnung der Resonanzfrequenz nachträglich mittels einer geeigneten Korrektur berücksichtigt (hierauf wird später noch genauer eingegangen).

7.2 Grundgeräusch und Grenzdämmung

Da die untersuchten Ständerwände teilweise eine recht hohe Schalldämmung erreichten, war es in einigen Fällen erforderlich, den Einfluss der Grenzdämmung (also den Anteil des über die Einbaumasken und die Prüfstandsflanken vom Sende- in den Empfangsraum übertragenen Schalls) rechnerisch zu korrigieren. Dies erfolgte in üblicher Weise nach dem in DIN EN ISO 10140 beschriebenen Verfahren, wobei vor allem der mittlere und hohe Frequenzbereich betroffen war. In Abb. 19 sind die Grenzdämmung der Prüfanordnung und das Schalldämm-Maß der Wand mit der höchsten gemessenen Schalldämmung einander gegenübergestellt.

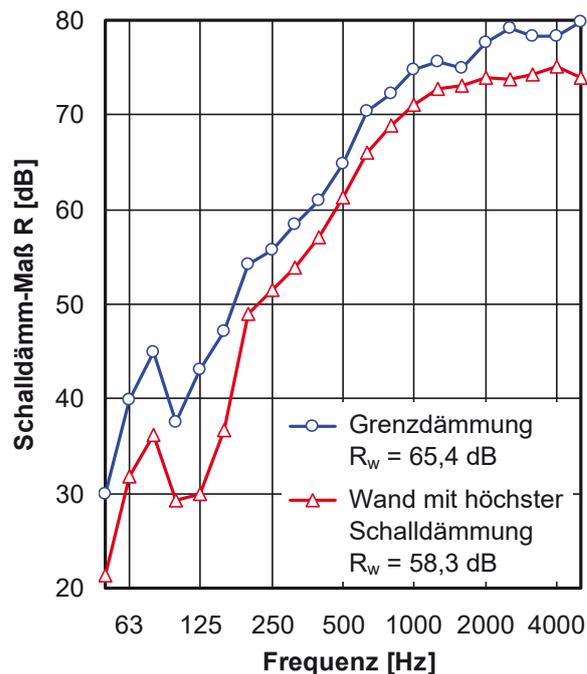


Abb. 19: Wand mit der höchsten gemessenen Schalldämmung (Wand HS3 mit WDVS aus MFP) im Vergleich zur Grenzdämmung der Prüfanordnung.

Wie aus der obigen Abbildung zu entnehmen ist, ist auch bei der Wand mit der höchsten gemessenen Schalldämmung der Abstand zur Grenzdämmung noch ausreichend groß, um zuverlässige Schalldämm-Messungen zu ermöglichen. Allerdings ist hier eine

rechnerische Grenzdämmungskorrektur erforderlich, die in dem betrachteten Fall bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß eine Erhöhung des gemessenen Wertes um 0,9 dB bewirkt.

Neben der Grenzdämmung kann auch das im Empfangsraum des Prüfstands vorhandene Grundgeräusch die gemessene Schalldämmung beeinträchtigen, sofern zwischen dem Mess-Signal und dem Grundgeräuschpegel kein ausreichender Abstand besteht. Da der für die Messungen verwendete Prüfstand über eine gute akustische Abschirmung nach außen verfügte und deshalb einen niedrigen Grundgeräuschpegel aufwies, war der Einfluss des Grundgeräuschs im vorliegenden Fall zumeist vernachlässigbar. Merkliche Auswirkungen auf die Messwerte waren nur bei Wänden mit hoher Schalldämmung im Frequenzbereich oberhalb von etwa 2000 Hz zu verzeichnen (siehe Beispiel in Abb.20). Falls erforderlich wurde hier (analog zur Grenzdämmung) gleichfalls eine rechnerische Korrektur durchgeführt oder – als bevorzugte Maßnahme – die Messung mit erhöhter Schall-Leistung des Lautsprechers (z. B. durch Verwendung von Terzrauschen statt rosa Rauschen) wiederholt. Dies war aber, wie schon erwähnt, nur ausnahmsweise in wenigen Fällen erforderlich.

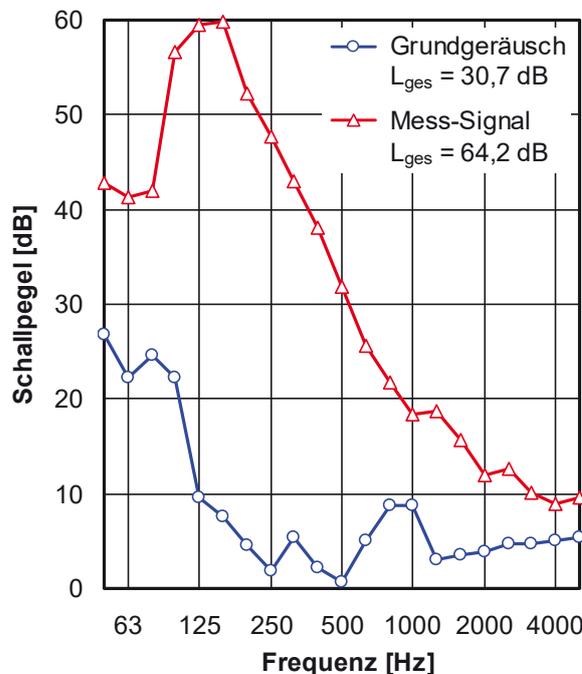


Abb. 20: Resultierender Schallpegel im Empfangsraum des Prüfstands bei einer Schalldämm-Messung an einer Wand mit hoher Schalldämmung (Wand HS3 mit WDVS aus MFP) im Vergleich zu dem im Raum vorhandenen Grundgeräuschpegel. In der Legende zu den Kurven ist jeweils der zugehörige Gesamtschallpegel L_{ges} mit angegeben.

7.3 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der ermittelten Messergebnisse hängt weniger von der Messung selbst (durch Verwendung gleichbleibender Mikrofon- und Lautsprecherpositionen sind die akustischen Messwerte sehr gut reproduzierbar) als vielmehr vor allem von den

Randbedingungen beim Einbau der Wand in die Prüföffnung ab. Dies betrifft z. B. die Befestigung der Ständer im unteren und oberen Bereich der Öffnung, die Montage der Beplankungsplatten und des WDVS sowie die Abdichtung der Randfugen. Um den akustischen Einfluss der Einbaubedingungen zu überprüfen, wurde eine Wand mit WDVS nach Messung der Schalldämmung vollständig aus dem Prüfstand entfernt und anschließend erneut in die Prüföffnung eingebaut. Wie aus den in Abb. 21 dargestellten Ergebnissen zu entnehmen ist, besteht zwischen der ersten und der zweiten Messung kaum ein Unterschied, so dass von einer guten Reproduzierbarkeit der gemessenen Schalldämmung auszugehen ist.

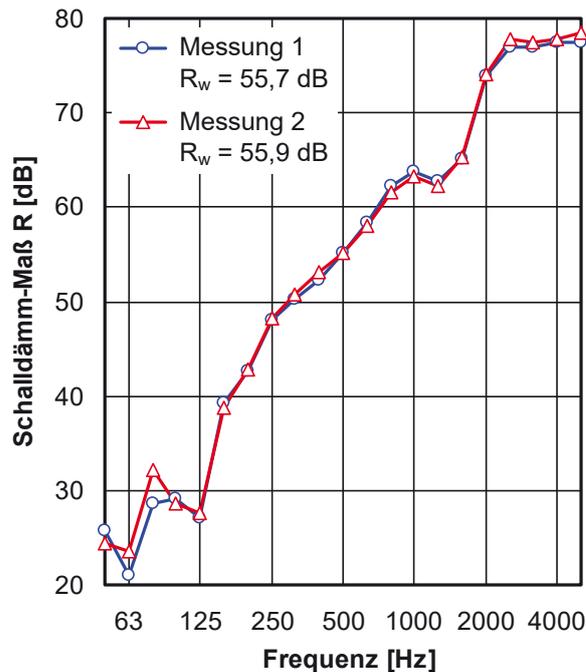


Abb. 21: Schalldämm-Maß einer Ständerwand mit WDVS (Wand HS3 mit WDVS aus XPS) vor und nach vollständiger Demontage und erneutem Einbau in die Prüföffnung.

Eine weitere im Rahmen der Voruntersuchungen durchgeführte Messung beschäftigte sich mit der Abdichtung des zwischen dem WDVS und dem Rand der Prüföffnung verbleibenden umlaufenden Spaltes (Breite ca. 10 mm, Tiefe ca. 125 mm). Um unerwünschte akustische Resonanzen zu vermeiden, wurde der Spalt in der Anfangsphase des Projekts zunächst vollständig mit eingeschobenen Streifen aus schallabsorbierender Polyesterfaser (Caruso Iso-Bond) gefüllt. Da sich das Einbringen der Polyesterfaser jedoch als schwierig und aufwändig erwies, wurde versuchsweise darauf verzichtet und die vordere Öffnung des Spaltes stattdessen mit einer Rundschnur aus weichem Polyurethanschaum verschlossen, auf die dann außenseitig zur luftdichten Versiegelung Terostat IX aufgebracht wurde (da der Schaumstoff sehr weich war, ließen sich die Schnüre trotz ihres Durchmessers von 15 cm leicht in den Spalt einschieben). Wie aus der nachfolgenden Abbildung zu ersehen ist, unterschieden sich die Messergebnisse mit und ohne Schallabsorptionsmaterial im Spalt fast nicht voneinander. Wegen des geringeren Herstellungsaufwandes erfolgten alle weiteren Messungen deshalb mit unbedämpftem Spalt.

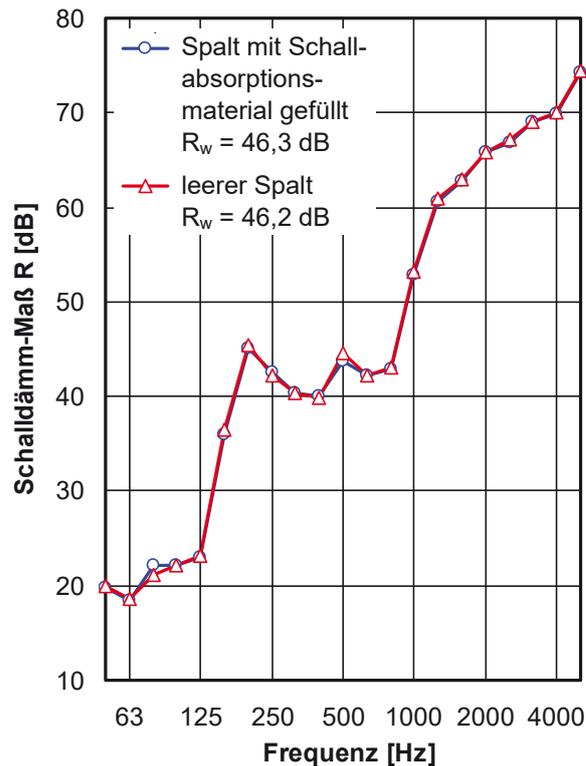


Abb. 22: Schalldämm-Maß einer Ständerwand mit WDVS (Wand HS1 mit verdübeltem WDVS aus EPS). Bei der ersten Messung war der umlaufende Spalt zwischen dem WDVS und den Rändern der Prüföffnung vollständig mit Schallabsorptionsmaterial (Caruso Iso-Bond) gefüllt, bei der zweiten Messung wurde er hingegen leer gelassen.

8 Untersuchte Konstruktionen

Um den akustischen Einfluss von WDVS auf Holz- und Leichtbauwände zu untersuchen, wurden Messungen an sieben verschiedenen Wänden in Kombination mit zehn unterschiedlichen WDVS durchgeführt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die untersuchten Konstruktionen vorgestellt, wobei zunächst die Grundwände und anschließend die WDVS beschrieben werden.

8.1 Grundwände

Bei den sieben untersuchten Wänden handelte es sich um sechs Ständerwände (je drei Wände mit Holz- und Metallständern) sowie eine Massivholzwand. Zur Beplankung der Ständerwände wurden verschiedene Arten von Baustoffplatten verwendet, die im vorliegenden Bericht mit den nachfolgenden Abkürzungen bezeichnet werden:

OSB-Platte: Grobspanplatte (Oriented Strand Board), $d = 15,0 \text{ mm}$, $m'' = 9,0 \text{ kg/m}^2$.

GKB-Platte: Gipskarton-Bauplatte Typ Knauf GKB, $d = 12,5 \text{ mm}$, $m'' = 8,5 \text{ kg/m}^2$, $E = 1500 \text{ MN/m}^2$, $B' = 270 \text{ Nm}$ (die für den dynamischen Elastizitätsmodul E und die Biegesteifigkeit je Breite B' angegebenen Werte wurden aus

der gemessenen Koinzidenzfrequenz der Platten ($f_g = 3150$ Hz) mit einer Poissonzahl von $\mu = 0,3$ berechnet).

GKF-Platte: Gipskartonplatte mit erhöhter Dichte (Knauf Diamant X GKF), $d = 12,5$ mm, $m'' = 12,9$ kg/m², $E = 3500 - 4500$ MN/m² (Herstellerangabe).

Die Befestigung der Beplankungsplatten an den Ständern erfolgte mit Holzbauschrauben (bei den OSB-Platten) bzw. Schnellbauschrauben (bei den GKB- und GKF-Platten) mit einem Schraubabstand von jeweils 28 cm. Bei zweilagiger Beplankung wurden die beiden Plattenlagen, wie in der Praxis üblich, jeweils mit den Ständern, jedoch nicht zusätzlich untereinander verschraubt. Der Hohlraum der Ständerwände war in allen Fällen vollständig mit Mineralwolle gefüllt (Trennwandplatte Isover Akustic TP1, längenbezogener Strömungswiderstand $r \geq 5$ kNs/m⁴, lose eingestellt).

Abhängig von der Art des Ständerwerks werden die untersuchten Holzständerwände mit den Abkürzungen HS1 bis HS3 und die Metallständerwände mit MS1 bis MS3 bezeichnet. Für die Massivholzwand wird die Bezeichnung MHW verwendet. Nachfolgend ist der Aufbau der verschiedenen Wände genauer beschrieben:

Wand HS1

innere Beplankung: zweilagig, 15,0 mm OSB (innen) + 12,5 mm GKB (außen),
Ständerwerk: Konstruktionsvollholz (KVH), Fichte, $\rho = 470$ kg/m³, $B \times D = 160$ mm x 60 mm, Achsabstand 58,5 cm, $m'' = 10,8$ kg/m²,
äußere Beplankung: 15,0 mm OSB,
Angaben zur Wand: Gesamtdicke 202,5 mm, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. 37,3 kg/m², Gesamtmasse Beplankung ca. 26,5 kg/m², Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 54,4$ Hz.

Wand HS2

Gleicher Aufbau wie Wand HS1, jedoch mit einlagiger innenseitiger Beplankung und zusätzlicher Installationsebene:

innere Beplankung: 15,0 mm OSB,
Installationsebene: vertikale Lattung aus Konstruktionsvollholz (KVH), Fichte, $\rho = 470$ kg/m³, $B \times D = 60$ mm x 60 mm, Achsabstand 58,5 cm, $m'' = 4,1$ kg/m², mit 12,5 mm GKB beplankt, Hohlraum vollständig mit Mineralwolle gefüllt,
Angaben zur Wand: Gesamtdicke 262,5 mm, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. 41,4 kg/m², Gesamtmasse Beplankung ca. 26,5 kg/m², Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 62,5$ Hz für die Wand bzw. $f_D \cong 103,5$ Hz für die Installationsebene.

Wand HS3

Gleicher Aufbau wie Wand HS1, aber mit getrennten Ständern:

Ständerwerk: Konstruktionsvollholz (KVH), Fichte, $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$, zwei Ständer mit $B \times D = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, Abstand zwischen den Ständern 40 mm , Achsabstand $58,5 \text{ cm}$, $m'' = 8,1 \text{ kg/m}^2$,

Angaben zur Wand: Gesamtdicke $202,5 \text{ mm}$, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. $34,6 \text{ kg/m}^2$, Gesamtmasse Beplankung ca. $26,5 \text{ kg/m}^2$, Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 54,4 \text{ Hz}$.

Wand MS1

innere Beplankung: zweilagig, $15,0 \text{ mm OSB}$ (innen) + $12,5 \text{ mm GKB}$ (außen),

Ständerwerk: Knauf UA-Profil 100/40/2 aus Stahlblech (Flanschbreite 40 mm , Blechstärke 2 mm), $B \times D = 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, Achsabstand $59,5 \text{ cm}$, $m'' = 6,0 \text{ kg/m}^2$,

äußere Beplankung: $15,0 \text{ mm OSB}$,

Angaben zur Wand: Gesamtdicke $142,5 \text{ mm}$, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. $32,5 \text{ kg/m}^2$, Gesamtmasse Beplankung ca. $26,5 \text{ kg/m}^2$, Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 68,8 \text{ Hz}$.

Wand MS2

Gleicher Aufbau wie Wand MS1, aber mit außenseitiger Beplankung aus GKF- anstatt aus OSB-Platten:

äußere Beplankung: $12,5 \text{ mm GKF}$,

Angaben zur Wand: Gesamtdicke $140,0 \text{ mm}$, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. $36,4 \text{ kg/m}^2$, Gesamtmasse Beplankung ca. $30,4 \text{ kg/m}^2$, Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 61,5 \text{ Hz}$.

Wand MS3

Gleicher Aufbau wie Wand MS2, aber innenseitige Beplankung aus OSB- plus GKB-Platten durch zwei Lagen aus GKF-Platten ersetzt:

innere Beplankung: $2 \times 12,5 \text{ mm GKF}$,

Angaben zur Wand: Gesamtdicke $137,5 \text{ mm}$, Gesamtmasse (inkl. Ständer) ca. $44,7 \text{ kg/m}^2$, Gesamtmasse Beplankung ca. $38,7 \text{ kg/m}^2$, Doppelschalenresonanz (Rechenwert) $f_D \cong 57,2 \text{ Hz}$.

Wand MHW

innere Bekleidung: $12,5 \text{ mm GKB}$,

Wandkern: Brettsperrholz, Fichte, $\rho = 469 \text{ kg/m}^3$, $d = 100 \text{ mm}$, $m'' = 46,9 \text{ kg/m}^2$, E-Modul = 12000 MN/m^2 (Herstellerangabe),

äußere Bekleidung: $15,0 \text{ mm OSB}$,

Angaben zur Wand: Gesamtdicke 127,5 mm, Gesamtmasse ca. 64,4 kg/m², Koinzidenzfrequenz (Rechenwert) $f_g \cong 120$ Hz.

In der nachfolgenden Abbildung sind die beschriebenen Wände in einer Übersicht jeweils als horizontaler Schnitt dargestellt:

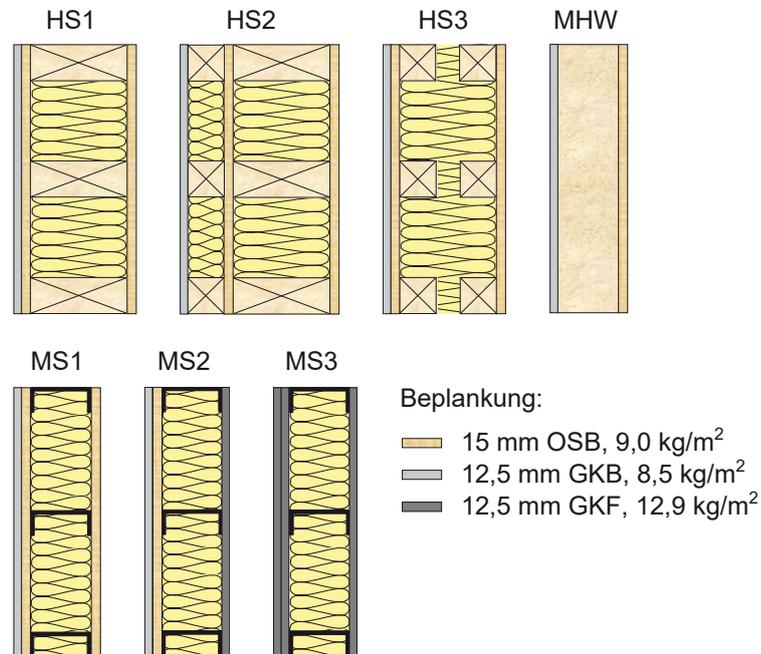


Abb. 23: Schematische Darstellung der untersuchten Leichtbauwände mit den verwendeten Kurzbezeichnungen (Breite maßstäblich, Höhe gestaucht). Um die Wände an die vorhandene Prüföffnung anzupassen, musste der Achsabstand der Ständer von den üblichen 62,5 cm auf einen Wert von 58,5 cm (bei den Holzständerwänden HS1 bis HS3) bzw. 59,5 cm (bei den Metallständerwänden MS1 bis MS3) verringert werden.

8.2 WDVS

Insgesamt wurden zehn verschiedene WDVS untersucht, die sich hinsichtlich des verwendeten Dämmstoffs sowie durch die Art der Befestigung (mit oder ohne zusätzliche Dübel) voneinander unterschieden. Die WDVS bestanden jeweils aus 100 mm dicken Dämmstoffplatten, die vollflächig auf eine geeignete Trägerplatte (OSB- oder Gipsfaserplatte) aufgeklebt wurden. Die Trägerplatte mit dem fertigen WDVS wurde später mittels integrierter Einschlagmuttern an den Ständern der Grundwand befestigt und bildete die außenseitige Beplankung der Wand. Als Klebstoff für das WDVS diente ein flexibler Dispersionskleber, wie er auch in der Praxis vielfach Verwendung findet (Brillux WDVS Polykleber 3574 mit einer Trockendichte von ca. 1400 kg/m³). Das Auftragen des Klebstoffs erfolgte mit einer Zahntraufel in einer Schichtdicke von ca. 2,5 mm, so dass sich für die Klebeschicht eine flächenbezogene Masse von etwa 3,5 kg/m² ergab. Vor dem Auftragen des Klebers wurde die Oberfläche der Grundwand mit Haftgrund versiegelt und zusätzlich zur Verbesserung der Haftung mit etwas Quarzsand bestreut.

Die Putzschicht der untersuchten WDVS wies einheitlich eine Dicke von etwa 8 mm auf und verfügte – wie der Praxis üblich – über eine Verstärkung aus eingebettetem Armierungsgewebe. Der Putz bestand aus Brillux WDVS Pulverkleber 3550 (mineralische Klebe- und Armierungsmasse) mit einer Trockendichte von ca. 1450 kg/m³, was bei 8 mm Putzdicke rechnerisch einer flächenbezogenen Masse von etwa 11,5 kg/m² entspricht. Obgleich das Auftragen des Putzes zur Gewährleistung einer einheitlichen Schichtdicke mit Hilfe von Anputzleisten (auch als Putzschiene bezeichnet) erfolgte, konnte dieser Wert bei den hergestellten WDVS nicht exakt eingehalten werden, sondern bewegte sich in einem Bereich von etwa 11 ± 2 kg/m².

Die meisten der untersuchten WDVS wurden in zweifacher Ausfertigung sowohl mit als auch ohne Dübel hergestellt. Ausnahmen bildeten lediglich das auf eine Gipsfaserplatte aufgeklebte System aus EPSe (hier wurde auf Dübel verzichtet) und die untersuchten Holzweichfaserplatten, die ohne Trägerplatte und Klebstoff mit Dübeln direkt an den Ständern der Wand befestigt wurden (um eine mehrfache Verwendung des WDVS zu ermöglichen, befanden sich zwischen Dämmschicht und Ständern auch hier OSB-Platten mit Einschlagmutter, die allerdings die Form vertikaler Streifen mit gleicher Breite wie die Ständer hatten). Soweit die Befestigung des WDVS zusätzlich mit Dübeln erfolgte, kamen handelsübliche Tellerdübel (Ejot ejotherm STR, Tellerdurchmesser 60 mm, Schraubenlänge 140 mm, mit Polystyrol-Abdeckung über dem Schraubenkopf) zum Einsatz, wobei die Dübelteller direkten Kontakt mit der Putzschicht hatten. Die Befestigungsschrauben der Dübel wurden direkt in die Trägerplatte geschraubt und die auf der Rückseite überstehenden Spitzen mit einem Trennschleifer abgeschnitten. Die Positionierung der Dübel auf der Platte erfolgte in zufälliger Weise (mit annähernd gleichmäßiger Verteilung über die Plattenoberfläche), war aber bei allen WDVS gleich. Insgesamt waren etwa sechs Dübel pro Quadratmeter Wandfläche vorhanden.



Abb. 24: Aufnahme der zur Befestigung der WDVS verwendeten Dübel (der abgebildete Polystyrol-Propfen wird nach dem Anziehen der Befestigungsschraube in den Dübel eingeschoben und verhindert das Entstehen einer Wärmebrücke zwischen Schraubenkopf und Putzschicht). Eine zusätzliche Befestigung des WDVS mit Dübeln ist laut Bauordnung erforderlich, wenn Gebäudehöhe und / oder Windsog vorgegebene Grenzen überschreiten.

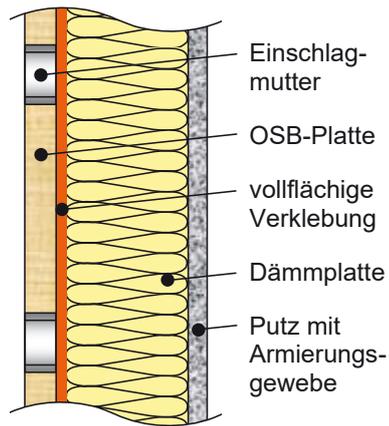


Abb. 25: Schematische Darstellung der Trägerplatte mit WDVS (im dargestellten Beispiel ohne zusätzliche Befestigung mit Dübeln).

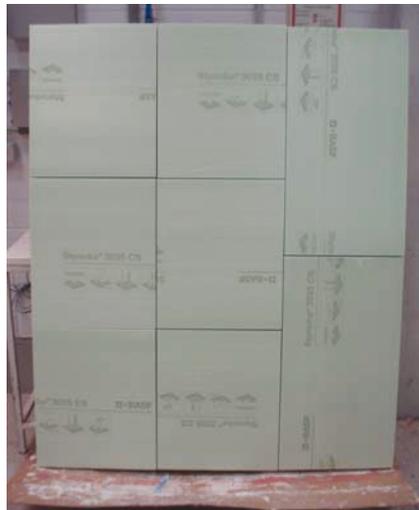


Abb. 26: Zusammensetzung der Dämmschicht eines WDVS aus fugenlos verlegten Teilstücken (hier am Beispiel von XPS-Platten).

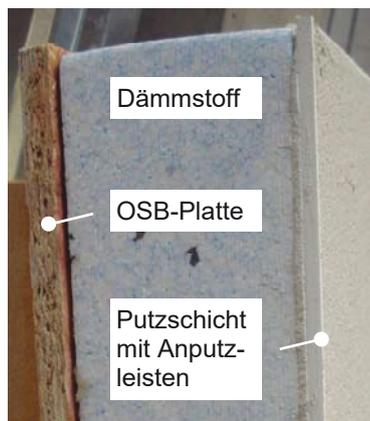


Abb. 27: Fertiges auf eine OSB-Platte aufgeklebtes WDVS aus EPS (linke obere Ecke des 1,23 m x 1,48 m großen Aufbaus).

Die untersuchten WDVS bestanden aus verschiedenen Dämmstoffen, die im Text mit den nachfolgenden Abkürzungen bezeichnet werden:

- XPS: extrudierter Polystyrol-Hartschaum (BASF Styrodur 3035 CS),
- EPS: expandiertes Polystyrol (FEMA Weiss-Blau EPS 035 WDV WDVS-Fassaden-dämmplatten),
- EPSe: elastifiziertes expandiertes Polystyrol (Sto-Dämmplatte Top32 Silent – EPSe 032 WDV SILVER EF),
- MFP: Mineralfaser-Putzträgerplatten (Rockwool Coverrock II, Steinwolle, Faserrichtung parallel zur Plattenoberfläche),
- HWF Holzweichfaserplatten (Gutex Thermowall Holzweichfaser-Dämmplatten).

Eine Übersicht über alle untersuchten WDVS ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Dämmstoff	Trägerplatte	Dübel		dyn. Steifigkeit [MN/m³]	Masse Dämmstoff [kg/m²]	Resonanz-freq. [Hz]
		ohne	mit			
XPS	OSB	X	X	145	3,2	1400
EPS	OSB	X	X	39	2,0	740
EPSe	OSB	X	X	18	1,5	360
EPSe	GKF	X		18	1,5	350
MFP	OSB	X	X	7	12,3	150
HWF	---		X	36	15,6	630

Tab. 3: Aufbau der untersuchten WDVS mit Messwerten für die dynamische Steifigkeit und die Masse der Dämmschicht sowie die resultierende Resonanzfrequenz des Systems.

Zur Herstellung der WDVS wurde die Trägerplatte auf eine ebene Unterlage gelegt und die mit Klebstoff beschichteten Dämmung auf die Plattenoberfläche gedrückt. Im Gegensatz zu einer fertigen Ständerwand, bei der die Beplankung fest mit den Ständern verschraubt ist, ergab sich hierbei das Problem, dass sich die Trägerplatte infolge des Feuchteintrags durch den Klebstoff in der Mitte leicht aufwölbte. Dies betraf insbesondere die verwendeten OSB-Platten und ließ sich auch durch vorherige Imprägnierung der Plattenoberfläche nicht völlig vermeiden [56]. Zwar bildete sich die Wölbung nach Trocknung des Klebstoffs wieder weitgehend zurück, sie bewirkte aber, dass sich vor allem im Randbereich der Platten keine vollständige Verklebung zwischen Trägerplatte und Dämmstoff ergab. Die resultierende Klebeschicht entsprach damit einer – auch in der Praxis vielfach üblichen – teilflächigen Verklebung des WDVS, wobei der Klebeflächenanteil schätzungsweise bei etwa 50 % lag. Für die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS ist dies von nicht unerheblicher Bedeutung, da die akustische Wirkung von WDVS den vorliegenden Erkenntnissen zufolge – sowohl im Massiv- als auch im Leichtbau – mit abnehmender Klebefläche merklich anwächst.

Um dies zu überprüfen, wurde bei einem der WDVS der Klebstoff mit einer geeigneten Lochmaske aufgetragen, so dass sich eine genau definierte Klebefläche in Form der in der Praxis üblichen Punkt-Wulst-Anordnung ergab, bei der der verklebte Flächenanteil ca. 40 % der Gesamtfläche der Trägerplatte betrug. Wie aus Abb. 28 zu ersehen ist, besteht zwischen dem normalen Auftragen des Klebstoffs mit einer Zahnkelle (also im Prinzip vollflächiger Verklebung) und der Verwendung einer Lochmaske mit 40 % Klebefläche hinsichtlich der akustischen Eigenschaften fast kein Unterschied. Dies zeigt, dass sich die untersuchten WDVS tatsächlich wie teilflächig verklebte Systeme mit einem Klebeflächenanteil von etwa 40 % bis 50 % verhielten.

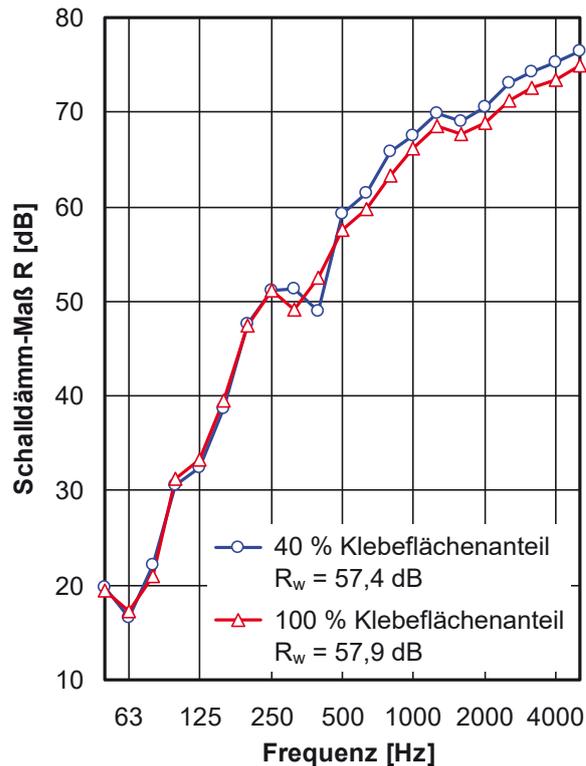


Abb. 28: Schalldämmung einer Wand mit WDVS bei unterschiedlicher Verklebung der Dämmschicht (vollflächig mit Zahnkelle oder teilflächig mit Lochmaske). Die dargestellten Werte wurden an der Wand HS1 in Verbindung mit einem WDVS aus MFP (ohne Dübel) gemessen.

9 Messergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten akustischen Messungen vorgestellt. Hierbei wird zunächst mit den Grundwänden ohne WDVS begonnen. Anschließend werden dann die akustischen Eigenschaften der untersuchten WDVS diskutiert, wobei als maßgebender akustischer Kennwert die Verbesserung der Schalldämmung der Wand durch das WDVS betrachtet wird. Wegen der großen Anzahl der Messungen beschränken sich die dargestellten Messdaten auf eine Auswahl der wichtigsten Ergebnisse. Die Auswahl erfolgte derart, dass alle für die praktische bauakustische Planung wichtigen Effekte beschrieben und erläutert werden.

9.1 Grundwände ohne WDVS

Die sieben untersuchten Grundwände umfassten drei Holzständerwände (Wände HS1 bis HS3), drei Metallständerwände (Wände MS1 bis MS3) sowie eine Massivholzwand (Wand MHW). Abgesehen von der Wand HS3, die über getrennte Doppelständer verfügte, waren alle anderen Ständerwände aus Einfachständern aufgebaut, so dass hier eine direkte Körperschallübertragung zwischen der innen- und außenseitigen Beplankung über das Ständerwerk vorhanden war.

Der Wertebereich der technischen und akustischen Eigenschaften der untersuchten Wände beträgt:

Wanddicke:	$127,5 \text{ mm} \leq d \leq 262,5 \text{ mm}$,
flächenbezogene Masse:	$26,5 \text{ kg/m}^2 \leq m''_{\text{ges}} \leq 64,4 \text{ kg/m}^2$,
bewertetes Schalldämm-Maß	$38,4 \text{ dB} \leq R_w \leq 53,9 \text{ dB}$.

Der oben angegebene Wert der flächenbezogenen Masse bezieht sich ausschließlich auf die Beplankung der Wände (Masse aller vorhandenen Beplankungslagen einschließlich Installationsebene). Die Masse der Ständer und der Gefachdämmung ist akustisch nur von untergeordneter Bedeutung und wird deshalb bei den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt. Bei den Holzständerwänden HS1 und HS2 kamen Ständer aus Konstruktionsvollholz mit einem Querschnitt von $L \times B = 160 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ zum Einsatz, die verwendeten Metallständer bestanden aus UA-Profilen mit den Abmessungen $L \times B = 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. Die Wand HS3 verfügte über Holzständer mit einem Querschnitt von $L \times B = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, die in einem Abstand von 40 mm angeordnet waren, so dass sich – wie bei den beiden anderen Holzständerwänden – ein Schalenabstand von 160 mm ergab. Der Wandhohlraum war jeweils vollständig mit Schallabsorptionsmaterial (Trennwandplatten aus Glaswolle) gefüllt.

Die für die untersuchten Wände gemessenen Schalldämmkurven sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Aus den ermittelten Messergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Trotz des unterschiedlichen Schalenabstandes der Wände unterscheidet sich die Schalldämmung der Holzständerwände HS1 und HS2 (Schalenabstand 160 mm) nur verhältnismäßig von den Metallständerwänden MS1 bis MS3 (Schalenabstand 100 mm). Das ist darauf zurückzuführen, dass die Schallübertragung zwischen der innen- und außenseitigen Schale zu einem großen Teil über das Ständerwerk erfolgt, so dass der Schalenabstand nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- Die etwas höhere Schalldämmung der Wände MS2 und MS3 ist vermutlich vor allem darauf zurückzuführen, dass die Beplankung dieser beiden Wände im Vergleich zu den anderen Ständerwänden eine größere flächenbezogene Masse aufweist ($30,4 \text{ kg/m}^2$ bei Wand MS2 und $38,7 \text{ kg/m}^2$ bei Wand MS3 gegenüber $26,5 \text{ kg/m}^2$ bei den übrigen Ständerwänden).

- Die Schalldämmung der Wand HS3 fällt wegen des getrennten Ständerwerks vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen deutlich größer als bei den übrigen Wänden aus.
- Obgleich sie mit $64,4 \text{ kg/m}^2$ die größte flächenbezogene Masse aufweist, ist die Schalldämmung der Massivholzwand MHW wegen ihrer einschaligen Bauweise von allen untersuchten Wänden mit Abstand am geringsten.

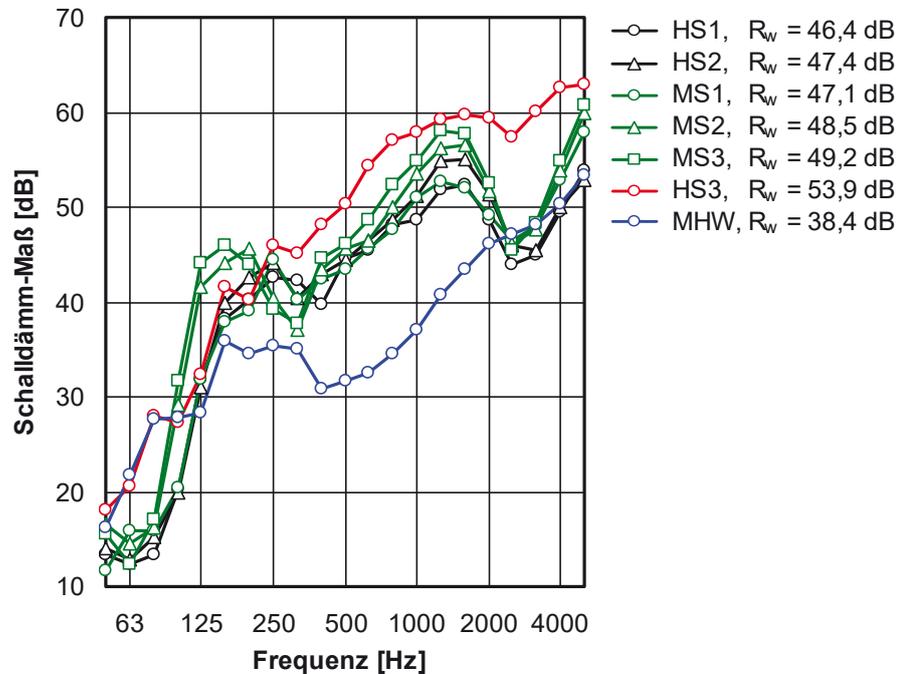


Abb. 29: Schalldämmung der untersuchten Grundwände in Abhängigkeit von der Frequenz.

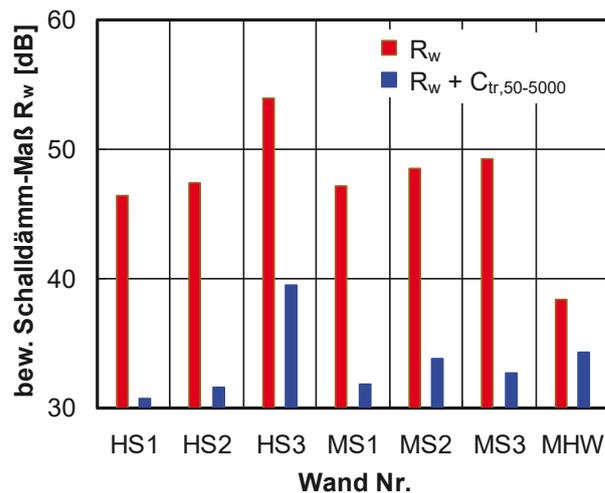


Abb. 30: Wichtigste Einzulangaben zu den in Abb. 29 dargestellten Schalldämmkurven (bewertetes Schalldämm-Maß R_w und Summe aus R_w und dem Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$).

Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Schalldämmkurven spiegelt sich auch in den zugehörigen Einzahlangaben in Abb. 30 wieder. Da die Ständerwände konstruktionsbedingt im tieffrequenten Bereich im Vergleich zu den mittleren und hohen Frequenzen nur eine verhältnismäßig geringe Schalldämmung aufweisen, bewirkt die Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ für tieffrequenten Verkehrslärm erwartungsgemäß eine deutliche Absenkung des resultierenden Einzahlwertes (Differenz zwischen den roten und den blauen Balken in Abb. 30). Bei der Massivholzwand MHW ist diese Absenkung wegen der einschaligen Bauweise wie zu erwarten deutlich schwächer ausgeprägt.

9.2 Akustischer Einfluss von WDVS

Die zehn untersuchten WDVS wiesen alle die gleiche Dämmschichtdicke von $d = 100$ mm auf und unterschieden sich auch im Hinblick auf die Putzschicht ($d \cong 8$ mm, $m'' \cong 10$ kg/m²) kaum voneinander. Da sie aber aus verschiedenen Dämmstoffen bestanden, die hinsichtlich ihrer dynamischen Steifigkeit große Differenzen aufwiesen, ergaben sich für die Resonanzfrequenz und damit auch für den Einfluss der WDVS auf die Schalldämmung der Grundwand beträchtliche Unterschiede. Der genaue Aufbau der untersuchten WDVS ist in Abschnitt 8.2, Tab. 3 dargestellt. Nachfolgend werden die wichtigsten Messergebnisse für die untersuchten Wände und WDVS genauer beschrieben und erläutert.

9.2.1 WDVS ohne Wand

Da WDVS normalerweise einen festen Bestandteil der Wand bilden, lagen für WDVS als separates Bauteil ohne Wand bislang keine akustischen Messdaten vor. Durch den hier verwendeten speziellen Messaufbau wurden solche Messungen erstmals möglich, wobei die als Trägerkonstruktion verwendete OSB-Platte ersatzweise die Funktion der Grundwand als Gegenmasse übernahm. Die OSB-Platte weist im Gegensatz zu den untersuchten Ständerwänden – zumindest in dem für WDVS maßgebenden Frequenzbereich bis etwa 1600 Hz – einen glatten und weitgehend stetigen Verlauf der Schalldämmkurve ohne größere Schwankungen auf (siehe Abb. 31). Deshalb tritt der akustische Einfluss des WDVS hier besonders klar und deutlich in Erscheinung, so dass sich die an den WDVS ohne Wand gemessenen Kurven z. B. sehr gut zur Bestimmung der Resonanzfrequenz des WDVS eignen.

Die für die verschiedenen WDVS ohne Wand gemessenen Schalldämmkurven sind in Abb. 32 wiedergegeben. Der typische Einbruch der Schalldämmkurve im Bereich der Resonanzfrequenz ist bei allen WDVS deutlich erkennbar. Er erinnert in seinem Verlauf stark an die entsprechenden Messkurven für Massivwände, was zur Hoffnung berechtigt, dass sich die für Massivwände mit WDVS entwickelten Berechnungsverfahren vom Prinzip her auch auf leichte Ständerwände übertragen lassen.

Gut zu erkennen ist auch, wie sich die Resonanzfrequenz des WDVS mit zunehmender Steifigkeit der Dämmschicht zu höheren Frequenzen hin verschiebt. Die niedrigste Resonanzfrequenz von $f_R \cong 150$ Hz ist bei den Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP) zu verzeichnen. Der höchste Wert von $f_R \cong 1400$ Hz ergibt sich für extrudierten Polystyrol-

Hartschaum (XPS). Mit ansteigender Resonanzfrequenz vermindert sich erwartungsgemäß die resultierende Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes (von $\Delta R_w = 13,8$ dB bei MFP auf $\Delta R_w = 3,4$ dB bei XPS). Der Frequenzverlauf der Verbesserung entspricht im Wesentlichen dem aus dem Massivbau bekannten Verhalten. Allerdings ist auch unterhalb der Resonanz eine merkliche Erhöhung der Schalldämmung zu verzeichnen, was darauf zurückzuführen ist, dass das WDVS – im Gegensatz zum Massivbau – einen merklichen Zuwachs der Bauteilmasse der Wand bewirkt.

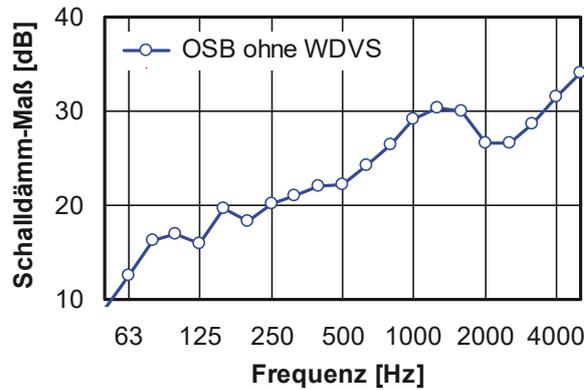


Abb. 31: Schalldämm-Maß der zur Befestigung der WDVS verwendeten OSB-Platten mit $d = 15,0$ mm und $m'' = 9,0$ kg/m² in Abhängigkeit von der Frequenz. Die zugehörigen Einzahlangaben lauten: $R_w = 27,1$ dB und $R_w + C_{tr,50-5000} = 23,6$ dB.

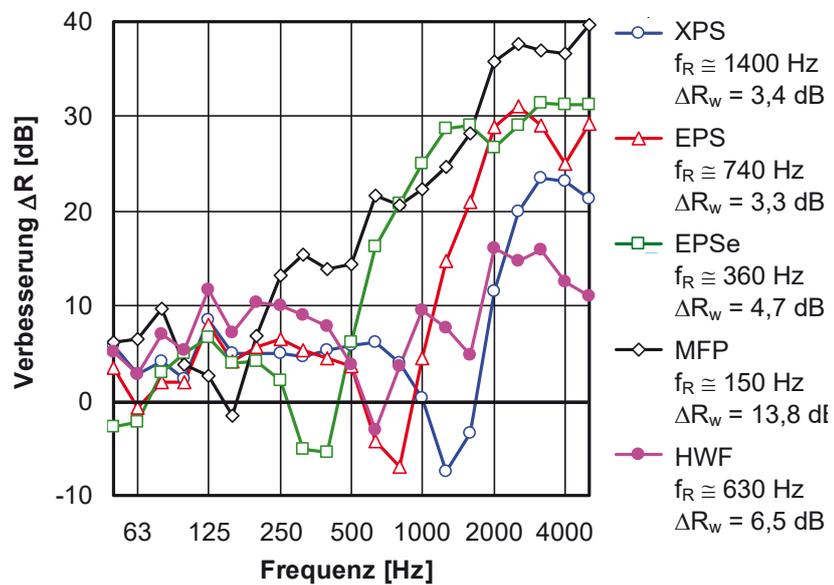


Abb. 32: Verbesserung der Schalldämmung der verwendeten OSB-Platte durch Montage unterschiedlicher WDVS (die Montage erfolgte in allen dargestellten Fällen ohne Dübel). In der Legende sind neben der Kurzbezeichnung des Dämmstoffs außerdem die aus den Messkurven abgelesene Resonanzfrequenz f_R sowie die resultierende Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w mit angegeben.

Die Holzweichfaserplatten (HWF, violette Kurve in Abb. 32) stellen insofern einen Sonderfall dar, als es sich bei der auftretenden Resonanz um keine Masse-Feder-Masse Schwingung sondern um stehende Wellen in der Dämmschicht handelt (näheres hierzu siehe Abschnitt 6.2). Deshalb ist zwar auch hier ein ausgeprägter Resonanzeinbruch erkennbar, der Kurvenverlauf unter- und oberhalb der Resonanz unterscheidet sich jedoch deutlich von den übrigen Kurven. Die Resonanzfrequenz des WDVS aus HWF bewegt sich mit $f_R \cong 630$ Hz ungefähr in gleicher Größenordnung wie bei dem Dämmsystem aus EPS ($f_R \cong 740$ Hz).

Bei allen in Abb. 32 dargestellten Kurven erfolgte die Befestigung des WDVS an der OSB-Platte ohne Dübel (also ausschließlich durch Verklebung). Bei zusätzlicher Verwendung von Dübeln ändert sich die Resonanzfrequenz erwartungsgemäß kaum. Deshalb sind die entsprechenden Kurven hier nicht dargestellt. Der akustische Einfluss von Dübeln wird später noch genauer betrachtet.

9.2.2 Resonanzfrequenz

Da die Resonanzfrequenz den wichtigsten akustischen Parameter zur Beschreibung des akustischen Verhaltens von WDVS darstellt, ist es erforderlich, ihren Wert möglichst zuverlässig und genau zu ermitteln. Die einfachste Möglichkeit hierzu besteht darin, die Resonanzfrequenz aus dem Dämmungsminimum der in Abb. 32 dargestellten Messkurven abzulesen. Dies ist mit recht guter Genauigkeit möglich, indem man den Kurvenverlauf unter- und oberhalb des Einbruchs lokal extrapoliert oder (hier nicht dargestellt) statt der üblichen Terzband-Analyse Messungen mit erhöhter Frequenzauflösung durchführt.

Bei der akustischen Planung von Bauten stehen im Normalfall natürlich keine Messwerte zur Bestimmung der Resonanzfrequenz zur Verfügung. Statt dessen muss die Resonanzfrequenz aus den vorhandenen Bauteildaten vorherberechnet werden. Dies erfolgt mit der in Gl. (13) angegebenen Formel, in die die flächenbezogene Masse von Grundplatte und Putzschicht sowie die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht eingehen. Um zu überprüfen, wie genau die auf diese Weise berechneten Ergebnisse sind, wurden die aus Abb. 32 ermittelten Messwerte und die zugehörigen Rechenwerte der Resonanzfrequenz miteinander verglichen.

Der Vergleich ist in Abb. 33 dargestellt, wobei die berechnete Resonanzfrequenz auf der X-Achse und die gemessenen Werte auf der Y-Achse aufgetragen sind. Im optimalen Fall – d. h. wenn Rechnung und Messung übereinstimmen – sollten alle Punkte auf der gestrichelten Geraden mit der Bezeichnung "Y = X" liegen. Bei WDVS mit niedriger Resonanzfrequenz trifft dies auch in guter Näherung zu. Bei hoher Resonanzfrequenz liegen die Messergebnisse hingegen erheblich über den berechneten Werten. Die Ursachen für diese Abweichungen sind im wesentlichen in der dynamischen Steifigkeit des Dämmstoffs zu suchen, die als wichtigster Parameter in die verwendete Berechnungsformel eingeht.

Die dynamische Steifigkeit von Wärmedämmstoffen wird messtechnisch bestimmt, wobei – mangels anderer genormter Verfahren – in der Praxis fast immer die in DIN EN

29052-1 [7] beschriebene Messmethode herangezogen wird. Diese Methode ist jedoch eigentlich für Trittschalldämmstoffe unter schwimmenden Estrichen bestimmt, weshalb sich bei der Anwendung auf Wärmedämmstoffe vor allem bei steifen Materialien systematische Abweichungen ergeben. Die beiden wichtigsten Ursachen für diese Abweichungen sind:

- Bei dem Messverfahren nach DIN EN 29052-1 wird die dynamische Steifigkeit des untersuchten Dämmstoffs nicht frequenzabhängig, sondern bei einer festen Frequenz gemessen. Der gemessene Wert wird dann vereinfachend auch für alle anderen Frequenzen herangezogen, wodurch ein mehr oder weniger großer Fehler entsteht, da die dynamische Steifigkeit der meisten Dämmstoffe mit zunehmender Frequenz anwächst [25, 57, 58]. Da die Frequenz, bei der die Messung nach DIN EN 29052-1 erfolgt, normalerweise erheblich unter der Resonanzfrequenz üblicher WDVS liegt, ist die in die Berechnungsformel für die Resonanzfrequenz eingesetzte dynamische Steifigkeit geringer als der tatsächlich bei dieser Frequenz vorhandene Wert. Dies bewirkt, dass sich bei der Berechnung eine zu niedrige Resonanzfrequenz ergibt. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist dabei um so größer, je steifer der Dämmstoff und je höher die Resonanzfrequenz des WDVS ist.
- Die Messung nach DIN EN 29052-1 erfolgt unter Last, wobei die untersuchte Dämmstoffprobe mit einer Auflage mit einer flächenbezogenen Masse von $m'' \cong 200 \text{ kg/m}^2$ beschwert wird. Durch diese verhältnismäßig hohe Last wird der Dämmstoff beträchtlich komprimiert, was auch Auswirkungen auf seine Steifigkeit hat. Bei Trittschalldämmstoffen, die am Bau teilweise hohen Lasten ausgesetzt sind, ist diese Vorgehensweise zweifellos sinnvoll. Bei Wärmedämmstoffen, auf die normalerweise keine oder nur geringen statischen Lasten einwirken, entstehen dadurch jedoch Fehler.

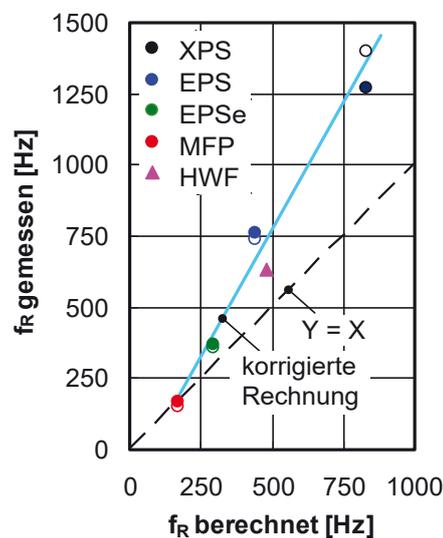


Abb. 33: Vergleich zwischen der berechneten und der gemessenen Resonanzfrequenz der untersuchten WDVS. Bei den leeren Symbolen war das WDVS nur mit Klebstoff an der Wand befestigt, bei den ausgefüllten Symbolen zusätzlich auch noch mit Dübeln.

Wegen der aus Abb. 33 ersichtlichen Abweichungen zwischen der berechneten und der gemessenen Resonanzfrequenz ist eine nachträgliche Korrektur der Rechenwerte erforderlich. Da über die Frequenzabhängigkeit der elastischen Eigenschaften von Dämmstoffen bislang kaum Angaben vorliegen, erfolgt die Korrektur auf rein rechnerischer Basis (durch Addition eines linearen Ausdrucks, der nur von der berechneten Resonanzfrequenz abhängt) und wird vereinfachend gleichermaßen für alle Arten von Dämmstoffen angewandt. Durch die Korrektur geht die gestrichelte Linie in Abb. 33 in die türkisfarbene Linie über, so dass sich eine deutlich verbesserte Übereinstimmung zwischen der berechneten und der gemessenen Resonanzfrequenz ergibt.

Da die Resonanz des WDVS abhängig von der Art der Anbringung – auf der Außenschale der Wand (bei XPS, EPS, EPSe und MFP) oder direkt auf dem Ständerwerk (bei HWF) – entweder auf einer Masse-Feder-Masse Schwingung oder aber auf stehenden Wellen in der Dämmschicht beruht, ergeben sich für die Resonanzfrequenz gemäß den Ausführungen in Abschnitt 6.2 unterschiedliche Berechnungsformeln. Die erforderliche Korrektur ist jedoch die gleiche, da die dynamische Steifigkeit in beiden Fällen auf gleiche Weise in die Formel eingeht.

Bei der Berechnung der Resonanzfrequenz wird zunächst mit Gl. (18) oder Gl. (19) die theoretische Frequenz $f_{R,t}$ ermittelt und diese dann durch eine Korrektur zur Berücksichtigung der systematischen Abweichungen bei der Messung der dynamischen Steifigkeit nach DIN EN 29052-1 mittels Gl. (17) in die tatsächliche Resonanzfrequenz f_R überführt. Die entsprechenden Berechnungsformeln lauten:

$$f_R = \begin{cases} 1,79 f_{R,t} - 122 \text{ Hz} & \text{für } f_{R,t} \geq 170 \text{ Hz} \\ f_{R,t} & \text{für } f_{R,t} < 170 \text{ Hz} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{mit } f_{R,t} \cong 160 \sqrt{s'_D \left(\frac{1}{m''_A} + \frac{1}{m''_P} \right)} \text{ [Hz]} \quad \text{für Montage auf der Außenschale,} \quad (18)$$

$$f_{R,t} \cong 0,317 \sqrt{\frac{s'_D}{m''_D}} \text{ [Hz]} \quad \text{für Montage auf den Ständern,} \quad (19)$$

s'_D = dynamische Steifigkeit der Dämmschicht des WDVS in MN/m³,
 m''_P = Masse der Putzschicht des WDVS in kg/m²,
 m''_A = Masse der Außenschale der Wand (inkl. Klebstoff) in kg/m²,
 m''_D = Masse der Dämmschicht des WDVS in kg/m².

Die beiden Gleichungen (18) und (19) wurden bereits in den Abschnitten 5.7 und 6.2 erwähnt und sind hier zur besseren Übersicht noch einmal aufgeführt. Sie entsprechen der "klassischen" Berechnungsweise für die Resonanzfrequenz von WDVS. Wegen der oben erläuterten Abweichungen bei der dynamischen Steifigkeit müssen die mit diesen Gleichungen ermittelten Werte unter Verwendung von Gl. (17) anschließend noch korrigiert werden.

9.2.3 Gleiche Wand mit verschiedenen WDVS

Nachfolgend wird am Beispiel von zwei typischen Grundwänden demonstriert, wie sich unterschiedliche WDVS auf die Schalldämmung von Leichtbauwänden auswirken. Beim ersten Beispiel (Wand HS1) handelt es sich um eine Holzständerwand in üblicher Bauweise, beim zweiten Beispiel (Wand MHW) um eine Massivholzwand mit 125,5 mm Dicke und einer flächenbezogenen Masse von 64,4 kg/m². Dargestellt ist in beiden Fällen die Verbesserung des Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS.

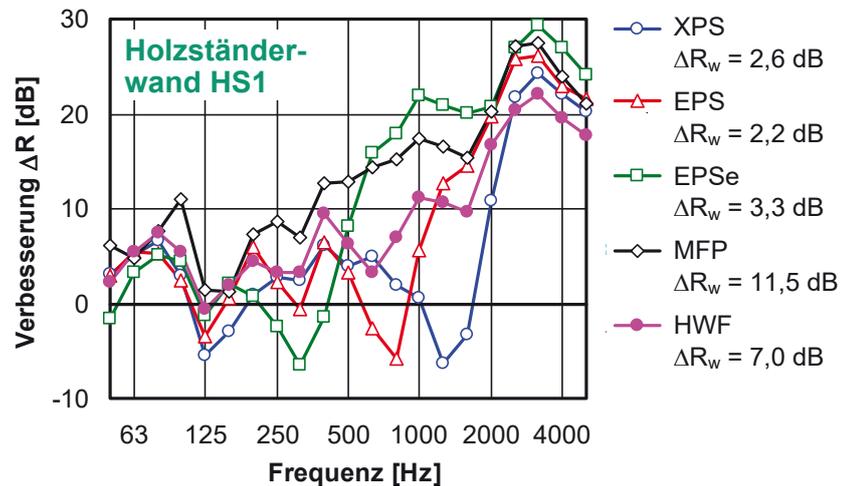


Abb. 34: Verbesserung der Schalldämmung der Holzständerwand HS1 durch unterschiedliche WDVS. Die Montage der dargestellten WDVS erfolgte in allen Fällen ohne Dübel.

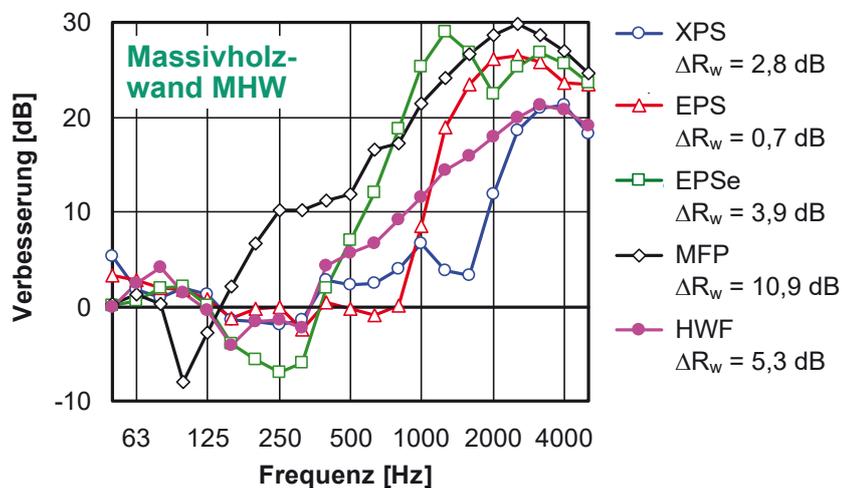


Abb. 35: Verbesserung der Schalldämmung der Massivholzwand MHW durch unterschiedliche WDVS.

Im Vergleich zu den Messungen an den WDVS ohne Wand (Abb. 32, Verbesserung der Schalldämmung der verwendeten OSB-Platte durch verschiedene WDVS) weisen die oben dargestellten Messkurven stärkere Schwankungen auf und die Resonanzeffekte erscheinen weniger deutlich ausgeprägt. Wegen der größeren Wandmasse sind die Re-

sonanzeinbrüche bei der Massivholzwand gegenüber der Holzständerwand zumeist zu etwas tieferen Frequenzen hin verschoben. Die OSB-Platte und die Ständerwand unterscheiden sich hinsichtlich der Lage der Resonanzfrequenzen erwartungsgemäß hingegen kaum.

Abgesehen von den erwähnten Unterschieden weisen die Messungen an den verschiedenen Wänden jedoch auch viele Gemeinsamkeiten auf. So ist z. B. die Rangfolge der verschiedenen WDVS im Hinblick auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes in allen Fällen weitgehend gleich und auch beim Frequenzverlauf der Verbesserung sind viele Ähnlichkeiten vorhanden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass sich alle untersuchten Wände und WDVS nach Entwicklung geeigneter Formeln zur Berücksichtigung der vorhandenen akustischen Einflussgrößen durch ein einheitliches Berechnungsmodell für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes beschreiben lassen.

Bei fast allen untersuchten Wänden fällt auf, dass die WDVS aus Holzweichfaserplatten (HWF) im Verhältnis zu ihrer Resonanzfrequenz eine ungewöhnlich starke Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes bewirken. Dies ist auf den abweichenden Frequenzverlauf der Schalldämmkurve zurückzuführen, der im Gegensatz zu den übrigen WDVS, wie bereits mehrfach erwähnt, nicht durch ein Masse-Feder-Masse System, sondern durch stehende Wellen in der Dämmschicht hervorgerufen wird. In dem zu entwickelnden Berechnungsmodell muss dieser Effekt selbstverständlich in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

9.2.4 Gleiches WDVS auf unterschiedlichen Wänden

Für die akustische Betrachtung von WDVS ist wesentlich, dass das gleiche WDVS bei Montage an verschiedenen Wänden bezogen auf des Frequenzspektrum der Schalldämmung jeweils die gleiche Verbesserung erbringt. Im Massivbau ist diese Voraussetzung im Normalfall in guter Näherung erfüllt. Da dies erheblichen Einfluss auf die Entwicklung geeigneter Berechnungsverfahren hat, soll nachfolgend überprüft werden, ob diese Aussage auch für WDVS auf Leichtbauwänden zutrifft.

Um einen direkten Vergleich der verschiedenen Kurven zu ermöglichen, wurden Messwerte für dasselbe WDVS auf unterschiedlichen Wänden zusammengestellt und gemeinsam in einem Diagramm zusammengefasst. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für ein Dämmsystem aus expandiertem Polystyrol (EPS), in Abb. 37 sind die Werte für elastifiziertes EPS (EPS_e) dargestellt. Aufgetragen ist in beiden Fällen wie gehabt die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS.

Wie aus den Abbildungen zu entnehmen ist, zeigen die untersuchten WDVS analog zum Massivbau auch bei der Anbringung auf unterschiedlichen Leichtbauwänden ein akustisch ähnliches Verhalten. Dies gilt auch für die Holzständerwand HS3 mit getrenntem Ständerwerk und für die Massivholzwand MHW. Natürlich gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven, der Frequenzverlauf und der Betrag der Schalldämmung stimmen aber im Wesentlichen überein. Dies gilt auch im Vergleich zur Montage des WDVS auf einer Massivwand, die in Abb. 36 zur Veranschaulichung ebenfalls mit

eingezeichnet ist (hier liegt die Resonanzfrequenz zwar erwartungsgemäß etwas niedriger, der Frequenzverlauf der Verbesserung ist aber ähnlich).

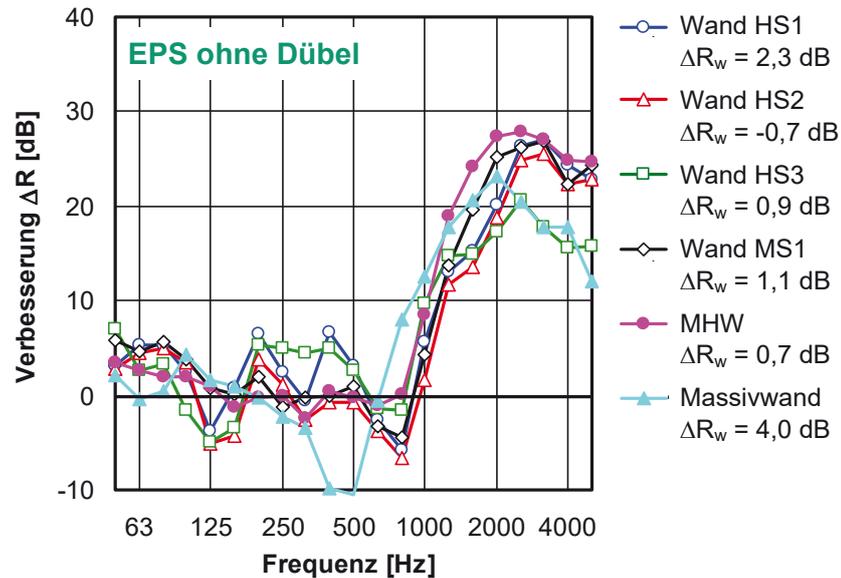


Abb. 36: Verbesserung der Schalldämmung verschiedener Leichtbauwände durch dasselbe WDVS aus EPS. Die Montage des WDVS erfolgte durch Verklebung ohne zusätzliche Dübel. Zum Vergleich ist außerdem eine Messkurve für ein ähnliches WDVS auf einer Massivwand (Stahlbeton, $m'' \cong 315 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54,5 \text{ dB}$) mit eingezeichnet.

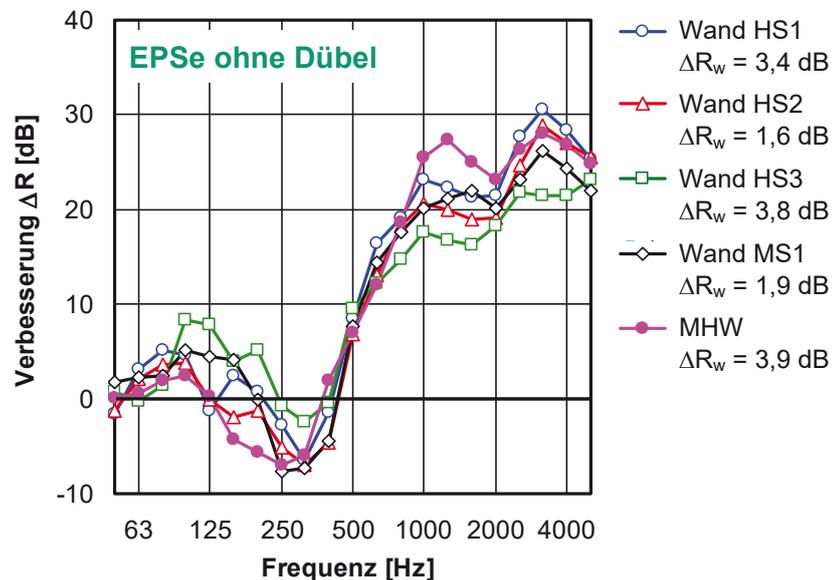


Abb. 37: Verbesserung der Schalldämmung verschiedener Leichtbauwände durch dasselbe WDVS aus EPSe. Die Montage des WDVS erfolgte durch Verklebung ohne zusätzliche Dübel.

In Anbetracht der dargestellten Messergebnisse ist davon auszugehen, dass ein ähnliches akustisches Berechnungsmodell, wie es für den Massivbau bereits existiert, auch

für WDVS auf Holz- und Leichtbauwänden entwickelt werden kann. Die akustischen Voraussetzungen hierfür sind erfüllt und die vorhandenen Erfahrungen aus dem Massivbau können dabei als Ausgangspunkt dienen.

9.2.5 Einfluss von Dübeln

Der Einfluss von Dübeln auf die Schalldämmung von Wänden mit WDVS lässt sich am besten erkennen, wenn man zwei ansonsten gleiche Aufbauten, die sich lediglich durch die zusätzliche Befestigung des WDVS mit Dübeln voneinander unterscheiden, miteinander vergleicht. In der nachfolgenden Abbildung ist dies am Beispiel von zwei verschiedenen Dämmstoffen dargestellt:

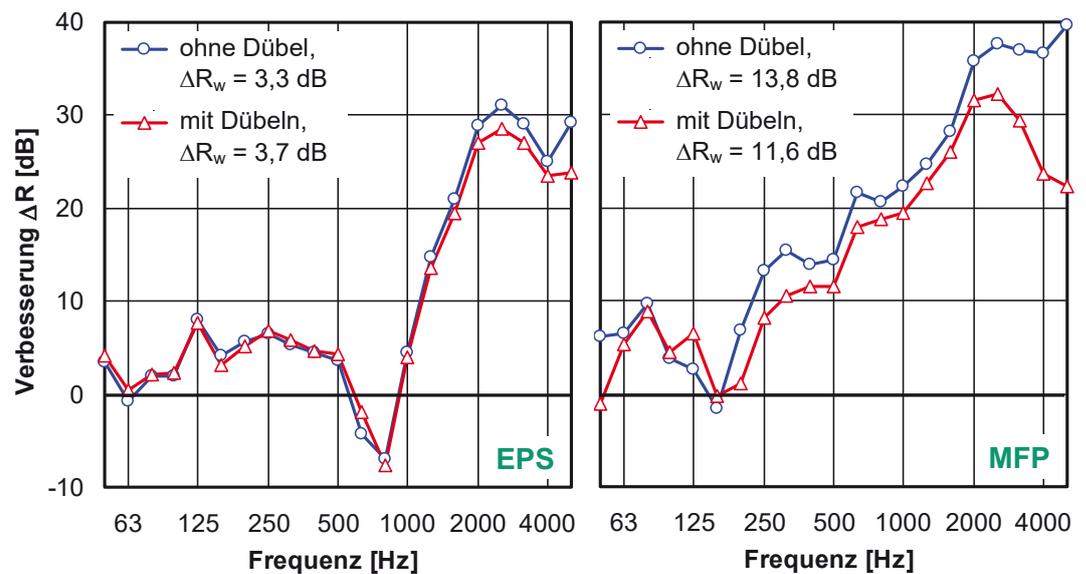


Abb. 38: Verbesserung der Schalldämmung der als Wandaußenschale verwendeten OSB-Platte bei Anbringung eines WDVS mit und ohne Dübel unter ansonsten gleichen Bedingungen. Links im Bild die Messergebnisse für ein Dämmsystem aus Polystyrol (EPS), rechts die Ergebnisse für Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP). Es wurden jeweils etwa sechs Dübel je Quadratmeter Wandfläche verwendet, wobei der Dübelteller in die Putzschicht eingebettet war. Eine genaue Beschreibung der Verdübelung ist Abschnitt 8.2 zu entnehmen.

Die in der der obigen Abbildung erkennbaren Effekte entsprechen im Wesentlichen dem bereits aus dem Massivbau bekannten akustischen Verhalten von Dübeln:

- Bei einem WDVS mit steifer Dämmschicht (wie z. B. bei dem in Abb. 38 dargestellten Dämmsystem aus EPS) bilden die Dämmplatten eine starre Verbindung zwischen der Putzschicht und der Wand, über die in starkem Maß Körperschall von außen nach innen übertragen wird. Eine zusätzlichen Versteifung der Verbindung durch Dübel verstärkt die Körperschallübertragung daher nur noch unwesentlich. Dübel verhalten sich in diesem Fall also akustisch weitgehend neutral. In bestimm-

ten Fällen können sich durch zusätzliche Verdübelung des WDVS sogar leichte Verbesserungen der Schalldämmung ergeben.

- Besteht das WDVS hingegen aus einer Dämmschicht mit niedriger dynamischer Steifigkeit (dies ist bei dem obigen MFP-System der Fall), so verhält sich die Dämmschicht wie eine weiche Feder, die eine wirksame akustische Entkopplung zwischen Putzschicht und Wand bewirkt. Bei der zusätzlichen Befestigung des WDVS mit Dübeln entstehen Körperschallbrücken, die eine starre Verbindung zwischen dem Putz und der Wand herstellen und auf diese Weise einen zusätzlichen Schallübertragungsweg schaffen. Dies hat eine Verringerung der akustischen Wirkung des WDVS zur Folge und bewirkt, dass die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS, ΔR_w , mehr oder weniger stark herabgesetzt wird.

Im Vergleich zum Massivbau sind die durch Dübel hervorgerufenen akustischen Effekte bei Holzständer- und Leichtbauwänden normalerweise allerdings erheblich schwächer ausgeprägt. Das liegt daran, dass WDVS auf Leichtbauwänden in der Regel eine geringere Dämmstoffdicke und damit eine niedrigere dynamische Steifigkeit als bei massiven Wänden aufweisen. Sowohl die Verbesserung als auch die Verschlechterung der Schalldämmung durch das WDVS fällt deshalb im Leichtbau im allgemeinen deutlich geringer als im Massivbau aus.

9.2.6 Einzahlangaben

Für die bauliche Schallschutzplanung spielt der Frequenzverlauf der Schalldämmung im allgemeinen nur eine untergeordnete Rolle. Maßgebend sind vielmehr die zugehörigen Einzahlangaben, und zwar in erster Linie das bewertete Schalldämm-Maß R_w , weshalb sich das entwickelte Berechnungsmodell auch auf diese Größe beschränkt. In den beiden nachfolgenden Diagrammen sind die entsprechenden Angaben für alle untersuchten Wände dargestellt, wobei neben R_w außerdem auch die Summe $R_w + C_{tr,50-5000}$ aufgeführt ist ($C_{tr,50-5000}$ ist der Spektrum-Anpassungswert für tieffrequente Geräusche, wie z. B. innerstädtischen Straßenverkehrslärm). Angegeben ist jeweils die Verbesserung der entsprechenden Einzahlangabe durch das WDVS, also ΔR_w bzw. $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind auf der X-Achse jeweils die sieben untersuchten Grundwände dargestellt. Die zugehörigen Balken repräsentieren die an der jeweiligen Wand angebrachten WDVS, wobei die verschiedenen Farben der Balken die unterschiedlichen Dämmstoffarten (siehe Legende rechts im Bild) bezeichnen. Handelt es sich um einen schraffierten Balken, so war das WDVS nur aufgeklebt. Bei einem ausgefüllten Balken war es hingegen zusätzlich mit Dübeln befestigt.

Wie sich unmittelbar erkennen lässt, fällt die Verbesserung der Schalldämmung bei Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ zumeist geringer aus, als wenn man das bewertete Schalldämm-Maß alleine betrachtet. Dies gilt vor allem für WDVS mit niedriger dynamischer Steifigkeit. Bei Auswertung aller vorhandenen Messdaten ergeben sich folgende Werte:

ΔR_w : Wertebereich: -2,1 dB bis 12,3 dB,
 Mittelwert: 3,8 dB,

$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$: Wertebereich: 0,1 dB bis 6,9 dB,
Mittelwert: 3,0 dB.

Im Vergleich zum Massivbau weist ΔR_w bei Leichtbauwänden im Mittel etwa den gleichen Wert auf. Der Wertebereich im Leichtbau ist jedoch kleiner (bei WDVS auf Massivwänden sind Werte im Bereich von etwa $-10 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 20 \text{ dB}$ möglich) und Verschlechterungen der Schalldämmung sind seltener und fallen betragsmäßig erheblich geringer aus. Noch deutlicher sind die Unterschiede bei $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$: hier liegt der Mittelwert bei massiven Wänden bei -2,6 dB und im Gegensatz zum Leichtbau, wo $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ nur positive Werte annimmt, können sich Verschlechterungen von bis zu etwa -7 dB ergeben [22, 25].

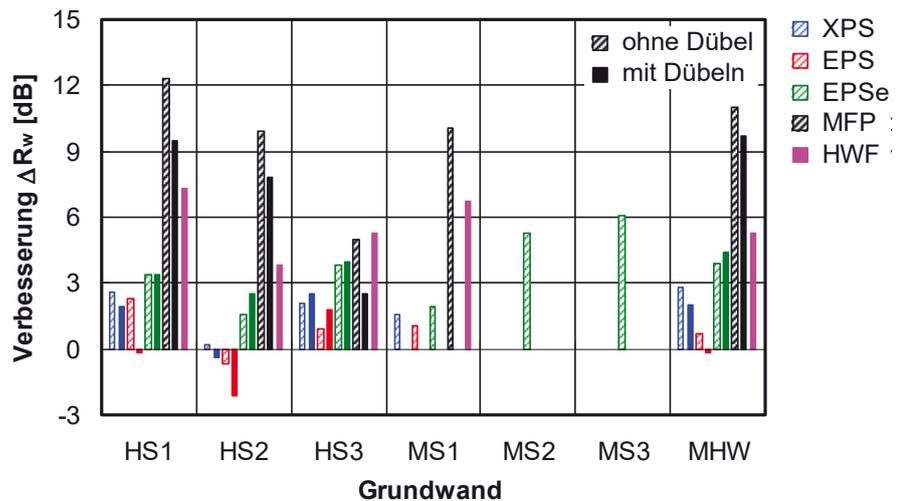


Abb. 39: Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS für alle zur Entwicklung des Berechnungsmodells untersuchten Wände (insgesamt 43 verschiedene Leichtbauwände).

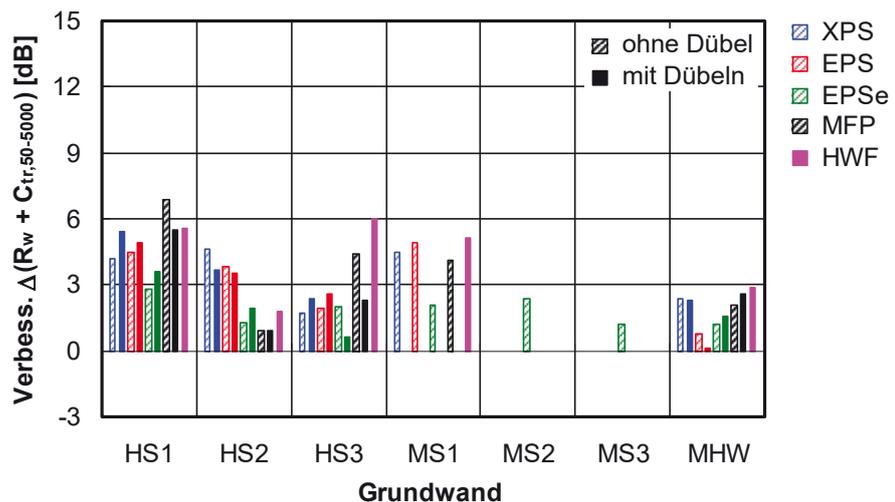


Abb. 40: Verbesserung der Summe $R_w + C_{tr,50-5000}$ durch das WDVS für alle zur Entwicklung des Berechnungsmodells untersuchten Wände.

10 Berechnungsmodell

Der nachfolgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem wichtigsten und schwierigsten Teil des Forschungsvorhabens, bei dem es darum geht, ein Berechnungsmodell für die Vorhersage der Schalldämmung von Holz- und Leichtbauwänden mit WDVS zu entwickeln. Da frequenzabhängige Berechnungen zu aufwändig wären und in der baulichen Schallschutzplanung normalerweise ohnehin keine Anwendung finden, konzentrieren sich die Überlegungen auf das bewertete Schalldämm-Maß als zentraler bauakustischer Planungs- und Beurteilungsgröße. Als Berechnungsergebnis dient die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS, ΔR_w . Ist das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand, $R_{w,o}$, bekannt (z. B. aus Herstellerangaben oder Messungen), so lässt sich daraus nach der Beziehung $R_w = R_{w,o} + \Delta R_w$ auf einfache Weise die resultierende Schalldämmung der Wand mit WDVS bestimmen.

Neben dem bewerteten Schalldämm-Maß spielt bei Außenbauteilen zur Beurteilung der realen Schallschutzwirkung auch der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ eine wichtige Rolle (z. B. bei tieffrequentem Außenlärm, wie er etwa durch innerstädtischen Straßenverkehr hervorgerufen wird). Daher wäre es wünschenswert, auch hierfür ein Berechnungsmodell zur Verfügung zu haben. Leider sind die akustischen Verhältnisse in dem für $C_{tr,50-5000}$ maßgebenden Bereich tiefer Frequenzen jedoch sehr kompliziert, so dass die Entwicklung eines geeigneten Modells im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wegen des hierfür erforderlichen großen Aufwandes leider nicht möglich war. Ersatzweise wurde eine akustische und statistische Analyse des vorhandenen Datenbestandes durchgeführt, aus der sich wertvolle Aussagen über die Schallschutzwirkung der untersuchten Leichtbauwände bei tiefen Frequenzen ergaben. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse, die in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben werden, können als nützliches Hilfsmittel bei der bauakustischen Planung von Leichtbauwänden mit WDVS dienen.

Die Entwicklung des Berechnungsmodells für ΔR_w erfolgte in mehreren Schritten, die nachfolgend zunächst in kurzer Form beschrieben und später im Detail erläutert werden:

- a) Zunächst wurde überprüft, inwieweit vorhandene akustische Berechnungsverfahren für WDVS als Hilfsmittel bei der Modellentwicklung herangezogen werden können. Neben dem bewährten Verfahren für Massivwände mit außenseitiger Wärmedämmung [20] betrifft dies in erster Linie ein im Jahr 2006 im ift Rosenheim entwickeltes semiempirisches Modell für Holzständerwände mit WDVS [49]. Bislang wurde dieses Modell nur wenig eingesetzt, da es auf einem verhältnismäßig geringen Bestand an Messdaten beruht (also bislang noch nicht ausreichend validiert ist) und außerdem nur einen Teil der bauüblichen Außenwandkonstruktionen abbildet. Um zu überprüfen, inwieweit sich die Formeln des Modells für die weiteren Betrachtungen nutzen lassen, werden Genauigkeit und Anwendungsbereich des Modells in Abschnitt 10.1 näher untersucht.
- b) Der nächste Entwicklungsschritt bestand darin, die maßgebenden konstruktiven Einflussgrößen für die akustischen Eigenschaften von Leichtbauwänden mit WDVS zu identifizieren und Formeln zur Beschreibung ihrer akustischen Wirkung abzulei-

ten. Dies erfolgte im Normalfall durch eine entsprechende Messreihe, bei der die betrachtete Größe systematisch variiert und die übrigen Einflussgrößen konstant gehalten wurden. In Abschnitt 10.2 wird dies beispielhaft für die Resonanzfrequenz des WDVS als wichtigste akustische Einflussgröße demonstriert.

- c) Bei der eigentlichen Modellentwicklung wurden die für die verschiedenen Einflussgrößen abgeleiteten Formeln mit variablen Vorfaktoren versehen und zu einer Gesamtformel zusammengefasst. Anschließend wurden die Vorfaktoren dann so variiert, dass sich für den für die Entwicklung herangezogenen Datensatz die bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergab. Das fertige Modell mit allen erforderlichen Formeln und Beschreibung der erforderlichen Eingangsdaten ist in Abschnitt 10.3 dargestellt.
- d) Wenn man sich auf den für die Modellentwicklung verwendeten Datensatz beschränkt, liefert das entwickelte Berechnungsverfahren – abhängig von Umfang und Variantenreichtum der Daten – naturgemäß immer etwas genauere Ergebnisse als bei Anwendung in der baulichen Praxis. Daher ist es sinnvoll (sofern die Möglichkeit besteht) die Berechnungsgenauigkeit an einem unabhängigen Satz von Messdaten zu überprüfen. Im vorliegenden Fall war diese Möglichkeit gegeben, da einer der beteiligten Industriepartner hierfür geeignete Wände zur Verfügung stellte. Die Ergebnisse der durchgeführten Validierung sind in Abschnitt 10.4 beschrieben.
- e) Neben Angaben zur Vorhersagegenauigkeit des Berechnungsverfahrens, die sich aus der statistischen Auswertung der zwischen Mess- und Rechenwerten vorhandenen Abweichungen ableiten lassen, ist es außerdem wichtig, den Anwendungsbereich des Verfahrens zu definieren und einzugrenzen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass das Verfahren auf Konstruktionen angewendet wird, für die es nicht geeignet ist, wodurch unter Umständen erhebliche Fehler entstehen können. Entsprechende Angaben zur Berechnungsgenauigkeit und zum Anwendungsbereich sind in Abschnitt 10.5 dargestellt.

10.1 Vorhandenes Modell des ift

Im Jahr 2006 wurde vom ift Rosenheim im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Auftrag der DGfH ein semiempirisches Berechnungsverfahren für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Holzständerwänden durch WDVS entwickelt [49]. Obgleich das Verfahren auf einem verhältnismäßig geringen Datenbestand von lediglich zwölf Wänden beruht und nur für einen Teil der bauüblichen Wandkonstruktionen anwendbar ist, liefert es dennoch wichtige Informationen für die hier durchgeführte Modellentwicklung. Deshalb wird im Folgenden überprüft, wie gut das Verfahren bei den im durchgeführten Forschungsvorhaben untersuchten Wänden anwendbar ist.

Obgleich die einzelnen Formeln verhältnismäßig einfach sind, ist das ift-Modell insgesamt recht umfangreich, da zwischen verschiedenen Arten von Wänden, Dämmstoffen und Montageweisen des WDVS (mit jeweils eigener Berechnungsformel) unterschieden wird. Deshalb wird das Modell hier nicht im Detail beschrieben, sondern ist lediglich in verkürzter Darstellung (als Auszug aus dem Forschungsbericht des ift) in Anhang A1 enthalten. Hinsichtlich der Details des Berechnungsmodells wird auf den Originalbericht

verwiesen [49]. Um die Berechnung durchführen zu können, werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- 1) Art der Grundwand (Holzständer- oder Massivholzwand),
- 2) Dämmstofftyp (EPS, EPS_e, MF oder HWF),
- 3) Montageweise des WDVS (auf der äußeren Beplankung der Wand oder direkt auf dem Ständerwerk),
- 4) Kontakt zwischen WDVS und Wand (vollflächige oder punktförmige Verklebung bzw. Verschraubung),
- 5) bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand,
- 6) Resonanzfrequenz des WDVS,
- 7) dynamische Steifigkeit der Dämmschicht (nur bei HWF-Systemen).

Im Gegensatz zu den Ausführungen in Abschnitt 9.2.2 erfolgt die Berechnung der Resonanzfrequenz des WDVS beim ift-Modell in herkömmlicher Weise – d. h. nach Gl. (13) – ohne Korrektur für die Frequenzabhängigkeit der dynamischen Steifigkeit. Gleiches gilt selbstverständlich auch für die dynamische Steifigkeit selbst, für die der nach DIN EN 29052-1 gemessene Wert herangezogen wird. Berücksichtigt man dies und setzt die entsprechenden Eingangsdaten in das ift-Modell ein, so erhält man Rechenwerte für ΔR_w , die man mit den entsprechenden Messwerten vergleichen kann.

In der nachfolgenden Abbildung ist dieser Vergleich für die untersuchten Wände dargestellt. Die Konstruktionen, für die das ift-Modell nicht anwendbar ist (die Metallständerwände und das Dämmsystem aus XPS), wurden zuvor aus dem Datensatz entfernt. Auf der X-Achse der Abbildung sind die sieben untersuchten Grundwände dargestellt. Die zugehörigen Messpunkte repräsentieren die an der jeweiligen Wand angebrachten WDVS.

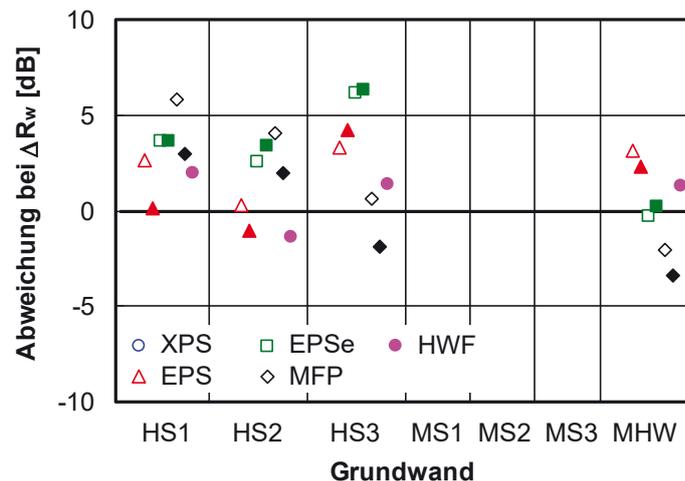


Abb. 41: Abweichung zwischen Messung und Rechnung (Messwert minus Rechenwert) für die mit dem ift-Modell berechnete Verbesserung ΔR_w . Bei den offenen Symbolen war das WDVS nur aufgeklebt, bei den ausgefüllten Symbolen war es zusätzlich mit Dübeln befestigt. Insgesamt handelt es sich um 32 verschiedene Wandaufbauten.

Die für das ift-Modell durchgeführten Untersuchungen (Vergleich von Messung und Berechnung) erbrachten folgende Ergebnisse:

- Im vorgesehenen Anwendungsbereich beschreibt das ift-Modell die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Leichtbauwänden durch WDVS recht gut (Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung $\sigma = 2,5$ dB). Das Modell überschätzt die Verbesserung zwar im Mittel um 1,9 dB (dies ist im obigen Diagramm aus der Lage der Messpunkte relativ zur Null-Linie gut zu erkennen), da es sich dabei um eine systematische Abweichung handelt, ließe sie sich durch Addition einer entsprechenden Korrektur aber leicht beheben.
- Zwischen den verschiedenen Arten von Wänden und WDVS bestehen hinsichtlich der Berechnungsgenauigkeit soweit erkennbar keine besonderen Unterschiede.
- Wird das ift-Modell – über den vorgesehenen Einsatzbereich hinaus – auch auf andere Wandkonstruktionen angewandt (Metallständerwände sowie Dämmsysteme mit besonders steifer Dämmschicht, wie z. B. XPS) so steigen die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung allerdings beträchtlich an. Die Unterschiede können dann bis zu etwa 15 dB betragen (für das WDVS aus XPS auf der Massivholzwand MHW) und die Standardabweichung erreicht einen Wert von $\sigma = 3,7$ dB (bezogen auf alle 43 untersuchten Wände).

Hieraus ergibt sich, dass das ift-Modell im hierfür vorgesehenen Einsatzbereich ein nützliches Werkzeug darstellt, um die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Leichtbauwänden durch WDVS vorherzubestimmen. Die verwendeten Formeln können als Grundlage zur Weiterentwicklung und Optimierung des Berechnungsverfahrens herangezogen werden. Die Weiterentwicklung ist erforderlich, um die Berechnungsgenauigkeit noch weiter zu verbessern und vor allem auch, um den derzeit noch beschränkten Anwendungsbereich zu erweitern, so dass ein möglichst großer Anteil der praxisüblichen Wandkonstruktionen erfasst wird.

10.2 Einfluss der Resonanzfrequenz des WDVS

Um zu untersuchen, wie sich ein bestimmter Konstruktionsparameter auf die Verbesserung der Schalldämmung auswirkt, wird der betrachtete Parameter systematisch variiert, während alle übrigen Einflussgrößen konstant gehalten werden. Im Folgenden wird dies am Beispiel der wichtigsten Einflussgröße – der Resonanzfrequenz des WDVS – exemplarisch beschrieben. Um den akustischen Einfluss der Resonanzfrequenz auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes zu bestimmen, werden Messungen an unterschiedlichen WDVS, die nacheinander an derselben Wand angebracht wurden, miteinander verglichen. Da die WDVS aus Dämmstoffen mit verschiedener dynamischer Steifigkeit bestehen, ansonsten aber über die gleiche Dämmstoffdicke und eine gleichartige Putzschicht verfügen, unterscheiden sie sich im Wesentlichen nur hinsichtlich ihrer Resonanzfrequenz.

In Abb. 42 ist eine Darstellung der entsprechenden Ergebnisse für die Holzständerwand HS1 wiedergegeben. In der Abbildung ist die Verbesserung ΔR_w über der Resonanzfrequenz f_R aufgetragen, wobei jeder Punkt ein anderes WDVS bezeichnet (von links nach

rechts: MFP, EPSe, EPS und XPS). Das Dämmsystem aus Holzweichfaserplatten (HWF) wurde zunächst ausgespart, da es sich wegen der Montage direkt an den Ständern akustisch anders als die übrigen WDVS verhält. Es ist gut zu erkennen, dass die Verbesserung mit steigender Resonanzfrequenz kontinuierlich abnimmt. Der Frequenzverlauf lässt sich in guter Näherung durch die Beziehung $\Delta R_w \sim 1/f_R^2$ beschreiben (rote Linie in Abb. 42).

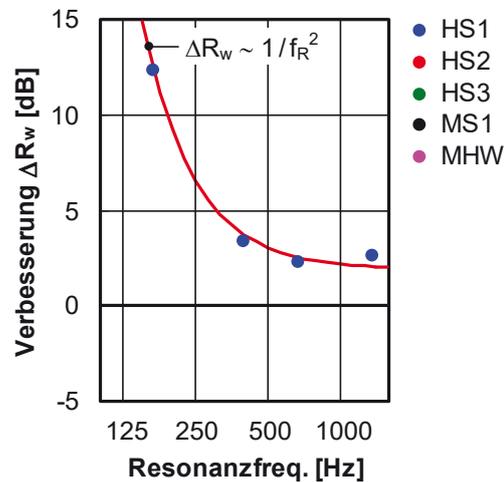


Abb. 42: Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS, ΔR_w , in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz des WDVS für die Holzständerwand HS1. Die Darstellung beschränkt sich auf WDVS, die ohne zusätzliche Dübel befestigt wurden.

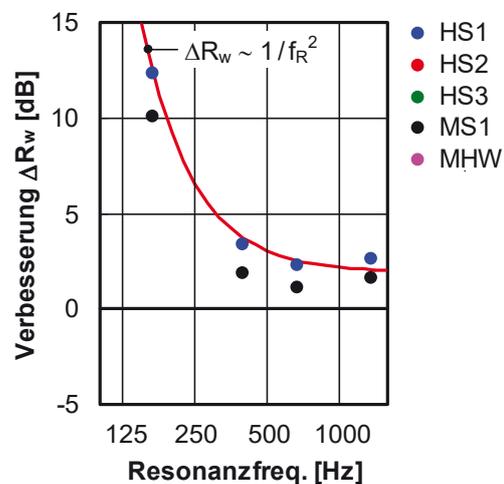


Abb. 43: Gleiche Darstellung wie in Abb. 42. Neben den Messwerten für die Holzständerwand HS1 sind zusätzlich (als schwarze Punkte) auch noch die Ergebnisse für die Metallständerwand MS1 mit eingezeichnet

In Abb. 43 sind neben den Ergebnissen für die Wand HS1 außerdem auch noch die Messwerte für die Wand MS1 dargestellt. Wie zu erkennen ist, folgen auch diese Werte näherungsweise der Beziehung $\Delta R_w \sim 1/f_R^2$ und sind gegenüber der ersten Wand lediglich in der Höhe verschoben. Dies deutet darauf hin, dass es sich bei der Abnahme von

ΔR_w proportional zu $1/f_R^2$ um eine allgemeine Beziehung handelt, die näherungsweise für alle WDVS und alle Leichtbauwände gilt (sie ist übrigens in ähnlicher Form auch bei Massivwänden zu finden).

Betrachtet man alle untersuchten Wände und WDVS (mit Ausnahme der zusätzlich mit Dübeln befestigten Systeme), so ist der Zusammenhang $\Delta R_w \sim 1/f_R^2$ in der Tat auch hier erkennbar, wenn auch natürlich mit einer größeren Streuung der Werte. Aus der entsprechenden Darstellung in Abb. 44 ergeben sich folgende Aussagen:

- Die Verbesserung ΔR_w folgt für alle WDVS auf Leichtbauwänden (sowohl Ständer- als auch Massivholzkonstruktionen) näherungsweise der Beziehung $\Delta R_w \sim 1/f_R^2$.
- Deutliche Abweichungen von diesem Zusammenhang sind zu verzeichnen, wenn das WDVS statt auf der Außenschale der Wand direkt an den Ständern befestigt wird, was bei den untersuchten Holzweichfaserplatten (leere Kreise in Abb. 44) zu- trifft. Die Abweichungen sind auf die unterschiedlichen akustischen Eigenschaften dieser Montageweise (Resonanz infolge stehender Wellen in der Dämmschicht an- statt von Masse-Feder-Masse Schwingungen) zurückzuführen. Sie lassen sich weit- gehend beheben, indem man die Resonanzfrequenz für die Holzweichfaseryste- me rechnerisch um den Faktor $1/2,9$ absenkt (siehe Abb. 45).
- Größere Abweichungen treten außerdem auf, wenn WDVS mit niedriger Reso- nanzfrequenz auf Wänden mit getrenntem Ständerwerk (Wand HS3) oder auf Massivholzwänden (Wand MHW) angebracht werden. Diese Abweichung müssen in dem zu entwickelnden Berechnungsmodell durch geeignete Korrekturen be- rücksichtigt werden.

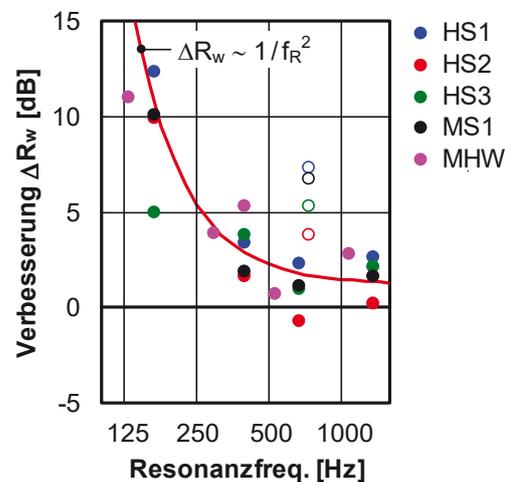


Abb. 44: Gleiche Darstellung wie in Abb. 42, jedoch für alle untersuchten Konstruktionen (mit Ausnahme der zusätzlich mit Dübeln befestigten Dämmsysteme). Um welche Wand es sich jeweils handelt, geht aus der Farbe des entsprechenden Messpunktes hervor. Bei den leeren Kreisen handelt es sich um Dämmsysteme aus Holzweichfaserplatten.

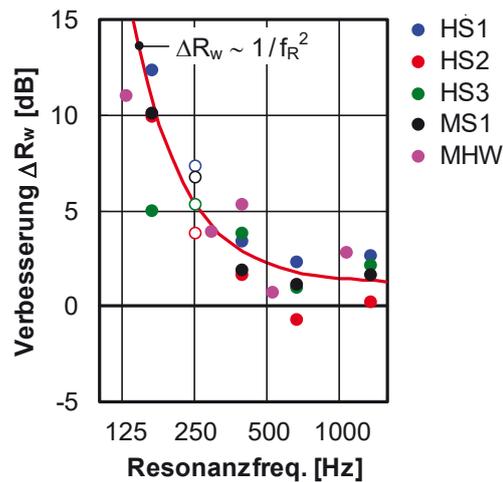


Abb. 45: Gleiche Darstellung wie in Abb. 44. Die Resonanzfrequenz der aus Holzweichfaserplatten bestehenden Dämmsysteme (leere Kreise) wurde jedoch rechnerisch um den Faktor 1/2,9 absenkt.

10.3 Berechnungsformeln

In ähnlicher Weise wie bei der im vorangehenden Abschnitt für die Resonanzfrequenz des WDVS beschriebenen Vorgehensweise wurden auch für die anderen akustisch maßgebenden Konstruktionsparameter semiempirische Formeln zur Beschreibung des jeweiligen Einflusses auf die Verbesserung ΔR_w abgeleitet. Anschließend wurden alle Formeln unter Verwendung variabler Vorfaktoren zu einem Gesamtmodell zusammengefasst und das Modell durch Variation der Faktoren in möglichst optimaler Weise an die vorhandenen Messdaten angepasst. Im Folgenden wird das fertige Modell mit allen für die Berechnung erforderlichen Formeln und Eingangsdaten beschrieben. Die Anwendung des Modells erfolgt in drei Schritten:

- 1) Zunächst wird die Resonanzfrequenz des WDVS berechnet, wofür abhängig von der Montageweise (Befestigung des WDVS an der Außenschale der Wand oder am Ständerwerk) entweder Gl. (21) oder Gl. (22) verwendet wird. Der auf diese Weise berechnete theoretische Wert $f_{R,t}$ wird dann anschließend unter Verwendung von Gl. (20) in die tatsächliche Resonanzfrequenz f_R überführt (die Gleichungen (20) bis (22) stimmen mit den in Abschnitt 9.2.2 enthaltenen Formeln überein und wurden hier der besseren Übersicht halber noch einmal wiederholt).
- 2) Handelt es sich um ein (ohne Außenschale) direkt an den Ständern der Wand befestigtes WDVS, so ist die im vorangehenden Schritt berechnete Resonanzfrequenz f_R vor der weiteren Verwendung zusätzlich mit dem Faktor $1/2,9 \cong 0,345$ zu multiplizieren.
- 3) Im nächsten Schritt wird aus der ermittelten Resonanzfrequenz unter Verwendung der Gleichungen (23) bis (27) die Verbesserung des bewerteten Schalldämmmaßes der Wand durch das WDVS, ΔR_w , berechnet. Neben der Resonanzfrequenz f_R wird hierzu lediglich das bewertete Schalldämmmaß der Grundwand ohne WDVS, $R_{w,o}$, benötigt. Die Berechnung erfolgt in gleicher Weise für alle Arten von

Leichtbauwänden und WDVS, d. h. der Wandaufbau und die Art des Dämmstoffs gehen nicht direkt in die Berechnungsformeln ein.

- 4) Das resultierende Schalldämm-Maß der Wand mit WDVS ergibt sich gemäß Abschnitt 5.3 aus der Beziehung $R_w = R_{w,o} + \Delta R_w$. Für das bewertete Schalldämm-Maß der Wand ohne WDVS wird man – sofern vorhanden – zumeist auf Messwerte zurückgreifen. Gegebenenfalls kann $R_{w,o}$ aber auch berechnet werden, z. B. nach dem in [49] beschriebenen (allerdings ziemlich aufwändigen und komplizierten) Verfahren. Dies ist jedoch nicht Bestandteil des hier durchgeführten Forschungsvorhabens.

Die zur Berechnung der Resonanzfrequenz f_R und der Verbesserung ΔR_w benötigten Formeln lauten:

- a) Berechnung der Resonanzfrequenz des WDVS f_R

$$f_R = \begin{cases} 1,79 f_{R,t} - 122 \text{ Hz} & \text{für } f_{R,t} \geq 170 \text{ Hz} \\ f_{R,t} & \text{für } f_{R,t} < 170 \text{ Hz} \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{mit } f_{R,t} \cong 160 \sqrt{s'_D \left(\frac{1}{m''_A} + \frac{1}{m''_P} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad \text{für Montage auf der Außenschale,} \quad (21)$$

$$f_{R,t} \cong 0,317 \sqrt{\frac{s'_D}{m''_D}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{für Montage auf den Ständern,} \quad (22)$$

s'_D = dynamische Steifigkeit der Dämmschicht des WDVS in MN/m^3 ,
 m''_P = Masse der Putzschicht des WDVS in kg/m^2 ,
 m''_A = Masse der Außenschale der Wand (inkl. Klebstoff) in kg/m^2 ,
 m''_D = Masse der Dämmschicht des WDVS in kg/m^2 .

- b) Berechnung der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Wand durch das WDVS ΔR_w

$$\Delta R_w = \Delta R_{w,G} + K_{\text{Wand}} + K_{\text{Dübel}} + K_{\text{Montage}} \quad (23)$$

$$\text{mit } \Delta R_{w,G} = \left(\frac{512}{f_R} \right)^2 + 3,6 \quad [\text{dB}] \quad (24)$$

$$K_{\text{Wand}} = -0,09 R_{w,o} - \left(\frac{93 \sqrt{(R_{w,o} - 46)^2}}{f_R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (25)$$

$$K_{\text{Dübel}} = \begin{cases} -440/f_R + 0,4 \quad [\text{dB}] & \text{mit Dübeln} \\ 0 & \text{ohne Dübel} \end{cases} \quad (26)$$

$$K_{\text{Montage}} = \begin{cases} 10,2/\lg(f_R) - 1,2 \quad [\text{dB}] & \text{bei teilflächiger Befestigung} \\ 0 & \text{bei vollflächiger Verklebung} \end{cases} \quad (27)$$

f_R = Resonanzfrequenz des WDVS in Hz
 $R_{w,o}$ = bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand in dB

Bei der Berechnung von ΔR_w mit den Gleichungen (23) bis (27) bildet der Grundwert $\Delta R_{w,G}$, der nur von der Resonanzfrequenz des WDVS abhängt und vom Prinzip her die Verbesserung für eine typische Grundwand mit einem üblichen WDVS repräsentiert, den Ausgangspunkt. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen werden zu dem Grundwert verschiedene Korrekturen addiert:

- Durch die Korrektur K_{Wand} wird berücksichtigt, dass die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS in starkem Maße von der Schalldämmung der Grundwand abhängt (je niedriger die Schalldämmung der Wand, desto besser wirkt das WDVS).
- Die Korrektur $K_{Dübel}$ wird angewandt, wenn das WDVS neben der Verklebung zusätzlich mit Dübeln an der Wand befestigt wird (dies gilt auch dann, wenn die Befestigung – wie bei Holzweichfaserplatten üblich – ausschließlich mit Dübeln oder Klammern erfolgt). Voraussetzung dabei ist, dass der Dübelteller direkten mechanischen Kontakt mit der Putzschicht hat, so dass eine Körperschallbrücke zwischen Putz und Wand entsteht (Körperschallbrücken setzen die Entkopplungswirkung der Dämmschicht herab und vermindern auf diese Weise den akustischen Einfluss von WDVS). Bei versenkten Dübeln ist dies in der Regel nicht der Fall, so dass hier mit $K_{Dübel} = 0$ gerechnet werden kann. Die Art und die Anzahl der Dübel (bauaufsichtlich vorgeschrieben sind in der Regel mindestens vier Dübel je Quadratmeter) spielen bei den Betrachtungen in erster Näherung keine Rolle.
- Die Korrektur $K_{Montage}$ berücksichtigt, dass WDVS bei teilflächiger Befestigung im Vergleich zu einer vollflächigen Verklebung in der Regel eine höhere Verbesserung der Schalldämmung bewirken. Von einer teilflächigen Befestigung ist erfahrungsgemäß dann auszugehen, wenn der Klebefläche weniger als etwa die Hälfte der Gesamtfläche des WDVS beträgt (für eine genauere Berücksichtigung des Klebeflächenanteils fehlen bislang die Daten). Um eine teilflächige Befestigung handelt es sich auch dann, wenn das WDVS – wie bei Holzweichfaserplatten – ausschließlich mit Dübeln oder Klammern befestigt wird.

Für die Berechnung der Verbesserung ΔR_w (einschließlich der Resonanzfrequenz f_R) werden folgende Angaben bzw. Eingangsdaten benötigt:

- 1) Montageweise des WDVS (auf der Außenschale der Grundwand oder direkt auf den Ständern),
- 2) Befestigung des WDVS mit oder ohne Dübel (es zählen nur Dübel, die eine direkte mechanische Verbindung zur Putzschicht haben),
- 3) Kontakt zwischen WDVS und Wand (voll- oder teilflächige bzw. punktförmige Verklebung bzw. Verschraubung),
- 4) s'_D = dynamische Steifigkeit der Dämmschicht des WDVS,
- 5) m''_A = flächenbezogene Masse der Außenschale der Grundwand (einschließlich des zur Befestigung des WDVS verwendeten Klebstoffs),
- 6) m''_P = flächenbezogene Masse der Putzschicht des WDVS,
- 7) $R_{w,o}$ = bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS.

Wird das WDVS direkt am Ständerwerk angebracht, so sind die Massen der Außenschale und der Putzschicht, m''_A und m''_P , akustisch bedeutungslos (eine Außenschale ist in diesem Fall ohnehin nicht vorhanden). Statt dessen geht die flächenbezogene Masse der Dämmschicht des WDVS, m''_D , in die Berechnung der Resonanzfrequenz ein, wobei bei der Ermittlung von m''_D nur der Dämmstoff selbst (ohne Klebstoff, Putz oder Dübel) zu berücksichtigen ist.

Wendet man die beschriebenen Formeln auf den zur Modellentwicklung herangezogenen Datensatz (insgesamt 43 verschiedene Leichbauwände mit WDVS) an, so ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung. Die resultierenden Abweichungen zwischen Mess- und Rechenwerten sind in Abb. 46 aufgetragen, wobei die verwendeten Grundwände auf der X-Achse dargestellt sind und die verschiedenen Messpunkte die untersuchten WDVS repräsentieren (bei den offenen Symbolen erfolgte die Befestigung des WDVS ohne Dübel, bei den ausgefüllten Symbolen war das WDVS zusätzlich mit Dübeln befestigt):

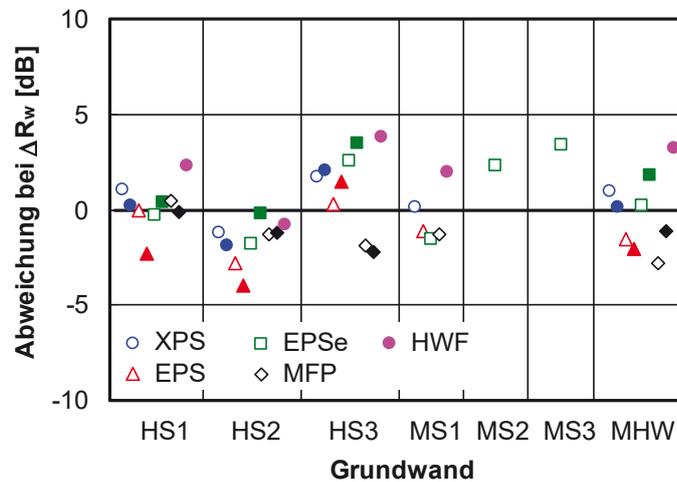


Abb. 46: Abweichung zwischen Messung und Rechnung (Messwert minus Rechenwert) für das zur Vorherberechnung der Verbesserung ΔR_w entwickelte Modell. Gleiche Darstellung wie in Abb. 41. Dargestellt sind sämtliche für die Modellentwicklung herangezogenen Aufbauten (insgesamt 43 verschiedene Wände mit WDVS).

Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 10.1 beschriebenen Modell des ift (mit der zugehörigen Berechnungsgenauigkeit in Abb. 41) ist die die mittlere Abweichung zwischen Messung und Rechnung in der obigen Abbildung gleich Null. Dies ist auch nicht anders zu erwarten, da das neue Berechnungsverfahren auf Grundlage des betrachteten Datensatzes entwickelt und optimal daran angepasst wurde. Andererseits vermindert sich aber auch die Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung beträchtlich ($\sigma = 1,9$ dB beim IBP- gegenüber $\sigma = 2,5$ dB beim ift-Modell), so dass insgesamt von einer deutlich verbesserten Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung auszugehen ist. Die wichtigsten Eigenschaften des neu entwickelten Modell lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Leichtbauwänden durch WDVS entwickelte Berechnungsverfahren weist im Vergleich zu ähnlichen Modellen aus anderen Bereichen der Bauakustik eine gute Genauigkeit auf. Bezogen auf den zur Modellentwicklung verwendeten Datensatz (insgesamt 43 verschiedene Leichtbauwände mit WDVS) ergibt sich eine Standardabweichung von $\sigma = 1,9$ dB. Die mittlere Abweichung zwischen Messung und Rechnung verschwindet, wobei sich die Werte im Bereich von -4,0 dB bis 3,8 dB (betragsmäßig größte Abweichung mit negativem und positivem Vorzeichen) bewegen.
- Das Berechnungsverfahren ist für alle bauüblichen Leichtbauwände – sowohl Ständer- als auch Massivholzwände – und die meisten normalen WDVS anwendbar. Dabei ergibt sich unabhängig von der Bauweise in allen Fällen eine ähnliche Berechnungsgenauigkeit. Die verwendeten Formeln stimmen von wenigen Ausnahmen abgesehen für alle Konstruktionen überein.
- Die wichtigste Eingangsgröße für das Modell ist die Resonanzfrequenz des WDVS, die vor allem von der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht bestimmt wird. Die Berechnungsgenauigkeit des Modells hängt deshalb insbesondere davon ab, wie zuverlässig die vorhandenen Angaben zur dynamischen Steifigkeit sind. In den meisten Fällen handelt es sich um Herstellerangaben, die auf Messungen nach DIN EN 29052-1 beruhen. Da bei der Anwendung dieses Messverfahrens auf Wärmedämmstoffe systematische Abweichungen auftreten, muss die aus den Messwerten berechnete Resonanzfrequenz wie in Abschnitt 9.2.2 beschrieben nachträglich rechnerisch korrigiert werden. Die entsprechende Korrektur ist in den oben aufgeführten Berechnungsformeln – in Form von Gl. (20) – bereits enthalten.

10.4 Validierung an unabhängigem Datensatz

Die im vorangehenden Abschnitt enthaltenen Aussagen zur Genauigkeit des entwickelten Berechnungsverfahrens bezogen sich auf den zur Modellentwicklung herangezogenen Datensatz von insgesamt 43 Wänden. Die hierbei erreichte Genauigkeit ist naturgemäß (selbst bei umfangreichen Datensätzen) immer etwas höher, als bei Anwendung des Verfahrens auf beliebige Wände aus der baulichen Praxis. Um zuverlässige Aussagen über die Berechnungsgenauigkeit in der Praxis zu gewinnen, ist es deshalb falls möglich sinnvoll, das Modell an einem unabhängigen Satz von Daten zu überprüfen.

Im vorliegenden Fall wurden hierzu von einem der am Projekt beteiligten Industriepartner (der Firma Sto) dreizehn zusätzliche Wände bereitgestellt. Die Wände wiesen die gleichen Abmessungen wie die zuvor untersuchten Aufbauten ($B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$) auf, so dass die Schalldämm-Messungen im gleichen Prüfstand und unter den gleichen Randbedingungen wie die vorangehenden Messungen erfolgen konnten. Die Herstellung der einzelnen Wände erfolgte im Werk der Firma Sto in Stühlingen. Von dort wurden die Wände von einer Spedition zum IBP in Stuttgart transportiert und in den für die Untersuchungen verwendeten bauakustischen Prüfstand eingebaut.

Die Auswahl der dreizehn Wände und WDVS erfolgte gemeinschaftlich durch die Firma Sto und das IBP. Dabei wurde darauf geachtet, dass in der getroffenen Auswahl neben

bauüblichen Konstruktionen auch einige Wände vertreten waren, die in der Praxis weniger häufig anzutreffen sind. Hierdurch sollte erreicht werden, dass die ausgewählten Wände soweit möglich das gesamte Spektrum der am Bau vertretenen Konstruktionen umfassen. Wenn das Berechnungsverfahren für alle diese Wände anwendbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass für seinen Einsatzbereich in der Praxis keine wesentlichen Einschränkungen bestehen.

Eine genaue Beschreibung der dreizehn hergestellten Wände wäre für den vorliegenden Bericht zu umfangreich. Deshalb sind die wichtigsten Angaben zu den Wänden in der nachfolgenden Tabelle in kurzer Form zusammengefasst:

Wand Nr.	WDVS			Grundwand		
	Putz	Dämmschicht	s' [MN/m ³]	äußere Beplankung	Gefachdämmung	Ständer
1	8 mm	100 mm EPS	30	12 mm OSB	Glaswolle	60/100
2	10 mm	60 mm MFP	10	12 mm OSB	Glaswolle	60/100
3	4 mm	60 mm MFL (Speedlamelle)	120	12,5 mm GF	Glaswolle	60/240
4	10 mm	140 mm MFP	5	15 mm OSB	Glaswolle	60/140
5	4 mm	60 mm EPS	48	15 mm OSB	Steinwolle	60/140
6	8 mm	60 mm EPSe	15	15 mm OSB	Zellulose	60/140
7	10 mm	80 mm MFL (Speedlamelle)	100	15 mm OSB	Holzwole	60/140
8	8 mm	140 mm EPS	22	15 mm OSB	Glaswolle	60/200
9	6 mm	80 mm MFL (Speedlamelle)	100	13 mm Spanplatte	Glaswolle	60/160
10	10 mm	140 mm MFP	5	13 mm Spanplatte	Glaswolle	60/160
11	8 mm	60 mm HWF (M039, 120 kg/m ³)	18,5	-	Steinwolle	60/140
12	8 mm	60 mm HWF (M046, 185 kg/m ³)	37,1	-	Steinwolle	60/140
13	8 mm	60 mm HWF (M050, 220 kg/m ³)	41,6	-	Steinwolle	60/140

Wand Nr.	Fortsetzung Grundwand				
	innere Beplankung 1	Installationsebene		innere Beplankung 2	innere Beplankung 3
1	12 mm OSB	-	-	-	-
2	12 mm OSB	Steinwolle 60 mm	60 mm Lattung	22 mm Spanplatte	12,5 mm GF
3	22 mm Spanplatte	-	-	12,5 mm GF	-
4	15 mm OSB	-	-	12,5 mm GKB	-
5	15 mm OSB	-	-	12,5 mm GKB	-
6	15 mm OSB	-	-	12,5 mm GKB	-
7	15 mm OSB	-	-	12,5 mm GKB	-
8	15 mm OSB	-	-	12,5 mm GKB	-
9	13 mm Spanplatte	-	-	12,5 mm GKB	-
10	13 mm Spanplatte	-	40 mm Lattung	12,5 mm GKB	-
11	15 mm OSB	-	-	-	-
12	15 mm OSB	-	-	-	-
13	15 mm OSB	-	-	-	-

Tab. 4: Übersicht über die dreizehn zusätzlich untersuchten Wände (es handelte sich ausschließlich um Holzständerwände) mit Angaben zum Aufbau des WDVS und der Grundwand.

Neben den bereits in den vorangehenden Untersuchungen verwendeten und in Abschnitt 8.2 beschriebenen Dämmstoffen (EPS, EPSe, MFP und HWF) wurden bei den zusätzlich untersuchten Wänden für das WDVS außerdem Mineralfaser-Lamellenplatten (MFL) eingesetzt. Bei diesen Dämmplatten verläuft die Faserrichtung senkrecht zur Plattenoberfläche, wodurch sich eine große dynamische Steifigkeit ergibt, so dass das WDVS eine entsprechend hohe Resonanzfrequenz aufweist. Abgesehen von den Dämmsystemen aus HWF, die mit Klammern an den Ständern angebracht waren, erfolgte die Befestigung der übrigen WDVS ohne Dübel. Sämtliche betrachteten Wände waren Holzständerwände, die über 60 mm breite Ständer aus Konstruktionsvollholz mit

einer Dicke zwischen 100 mm und 240 mm verfügten. Hier die wichtigsten Eigenschaften der dreizehn untersuchten Wände:

Grundwände:

Wanddicke:	$124 \text{ mm} \leq d \leq 287 \text{ mm}$,
flächenbezogene Masse:	$14,5 \text{ kg/m}^2 \leq m''_{\text{ges}} \leq 43,1 \text{ kg/m}^2$,
bewertetes Schalldämm-Maß:	$44,3 \text{ dB} \leq R_w \leq 54,4 \text{ dB}$.

WDVS:

Dämmstoff:	EPS, EPSe, MFP, MFL oder HWF,
Dämmstoffdicke:	$60 \text{ mm} \leq d \leq 140 \text{ mm}$,
Dicke der Putzschicht:	$4 \text{ mm} \leq d \leq 10 \text{ mm}$,
Masse der Putzschicht:	$5,6 \text{ kg/m}^2 \leq m'' \leq 11,2 \text{ kg/m}^2$,
Resonanzfrequenz (Messung):	$150 \text{ Hz} \leq f_R \leq 1250 \text{ Hz}$,
Verbesserung ΔR_w :	$-2,2 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 7,9 \text{ dB}$,
Verbesserung $\Delta(R_w + C_{\text{tr},50-5000})$:	$-3,4 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 4,3 \text{ dB}$.

Wände mit WDVS:

Wanddicke:	$223 \text{ mm} \leq d \leq 393 \text{ mm}$,
flächenbezogene Masse:	$26,4 \text{ kg/m}^2 \leq m''_{\text{ges}} \leq 66,1 \text{ kg/m}^2$,
bewertetes Schalldämm-Maß:	$43,4 \text{ dB} \leq R_w \leq 57,5 \text{ dB}$.

Die obigen Angaben zur flächenbezogenen Masse der untersuchten Wände beziehen sich ausschließlich auf die Beplankung der Wände und das WDVS. Die Masse der Ständer und der Gefachdämmung sind nicht enthalten, da sie akustisch nur von untergeordneter Bedeutung sind.

Berechnet man die Schalldämmung der dreizehn Wände mit dem neu entwickelten Verfahren, so sind im Vergleich zu den im vorangehenden Abschnitt genannten Angaben erwartungsgemäß größere Unterschiede zwischen Rechnung und Messung zu verzeichnen. Die Standardabweichung steigt von $\sigma = 1,9 \text{ dB}$ auf $2,6 \text{ dB}$ an und mit einer mittleren Abweichung von $-0,3 \text{ dB}$ treten außerdem – wenn auch nur geringfügige – systematische Unterschiede in Erscheinung. Gleichzeitig vergrößert sich der Wertebereich der Abweichungen – allerdings ebenfalls nur geringfügig – auf $-3,5 \text{ dB}$ bis $5,2 \text{ dB}$.

Die Verminderung der Genauigkeit bei Anwendung des Berechnungsmodells auf einen unabhängigen Datensatz ist demnach als merklich aber nicht gravierend einzustufen. Im Übrigen ist die verminderte Genauigkeit auch darauf zurückzuführen, dass die für die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht verfügbaren Eingangsdaten teilweise nicht auf eigenen Messungen, sondern auf Herstellerangaben beruhten und deshalb eine erhöhte Unsicherheit aufwiesen. Dies ist daraus zu ersehen, dass sich die Berechnungsgenauigkeit spürbar erhöht, wenn man für die Resonanzfrequenz statt des aus der dynamischen Steifigkeit berechneten Wertes den aus der gemessenen Schalldämmkurve ermittelten Wert in das Berechnungsmodell einsetzt (bezogen auf die Standardabweichung von $\sigma = 2,6 \text{ dB}$ auf $2,2 \text{ dB}$).

10.5 Anwendungsgrenzen und Genauigkeit

Das entwickelte Berechnungsverfahren ist für alle herkömmlichen Ständerwände (mit Holz- oder Metallständern) anwendbar, sofern die Beplankung aus bauüblichen Werkstoffen (z. B. Spanplatten, OSB-Platten oder Gipskartonplatten) besteht und keine baulichen Besonderheiten (elastisch befestigte Beplankungsplatten, etc.) vorhanden sind. Es gilt auch für Wände mit getrenntem Ständerwerk, Wände mit Installationsebene sowie außerdem für übliche Massivholzwände.

Für das WDVS sind alle herkömmlichen Dämmstoffe zulässig (EPS, elastifiziertes EPS, Putzträger- und Lamellenplatten aus Mineralfaser sowie Holzweichfaserplatten). Die Montage kann sowohl auf der außenseitigen Beplankung der Wand (Normalfall) als auch direkt auf dem Ständerwerk (bei Holzweichfaserplatten) erfolgen, wobei zur Befestigung auch Dübel verwendet werden können. Für alternative Dämmstoffe, wie z. B. Flachs, Hanf oder Jute, liegen keine Messergebnisse vor. Aus den Erfahrungen bei Massivwänden lässt sich aber schließen, dass das Verfahren – zumindest näherungsweise – auch hierfür anwendbar sein sollte [27].

Bei der statistischen Berechnungsgenauigkeit des Modells kommt es darauf an, welchen Datensatz man bei der Bestimmung der zwischen Messung und Rechnung vorhandenen Abweichungen zugrunde legt. Die höchste Genauigkeit ergibt sich erwartungsgemäß, wenn man sich auf die zur Modellentwicklung herangezogenen Daten (43 Wände) beschränkt. Bei Verwendung eines unabhängigen Datensatzes (13 Wände) nimmt die Genauigkeit demgegenüber merklich ab und bei Einbeziehung aller vorhandenen Daten (insgesamt 56 Wände) erhält man ein Ergebnis, das zwischen den beiden anderen Fällen liegt. Eine Übersicht über die Berechnungsgenauigkeit für die drei beschriebenen Fälle ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Wände	Wertebereich der Abweichungen	mittlere Abweich.	Standard-abw. σ
BBSR (43)	$-4,0 \text{ dB} \leq \Delta R_{w,\text{Messung}} - \Delta R_{w,\text{Rechnung}} \leq 3,8 \text{ dB}$	0,0 dB	1,9 dB
Sto (13)	$-3,5 \text{ dB} \leq \Delta R_{w,\text{Messung}} - \Delta R_{w,\text{Rechnung}} \leq 5,2 \text{ dB}$	-0,3 dB	2,6 dB
alle (56)	$-4,0 \text{ dB} \leq \Delta R_{w,\text{Messung}} - \Delta R_{w,\text{Rechnung}} \leq 5,2 \text{ dB}$	-0,1 dB	2,1 dB

Tab. 5: Statistische Angaben zur Berechnungsgenauigkeit bei der Bestimmung der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS, ΔR_w .

In der Praxis dürfte die Berechnungsgenauigkeit vermutlich eher im Bereich der für alle vorhandenen Daten ermittelten Angabe, also bei einer Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung von etwa $\sigma = 2,1 \text{ dB}$ liegen. In Anbetracht der Vielfalt der untersuchten Wände und WDVS und der komplizierten akustischen Verhältnisse ist dieses Ergebnis als durchaus zufriedenstellend anzusehen. Das zeigt sich auch, wenn zum Vergleich die durchschnittliche Unsicherheit von Schalldämm-Messungen in bauakustischen Prüfständen betrachtet, die nach DIN EN ISO 12999-1 [59] bei $\sigma = 1,2 \text{ dB}$ liegt. Auch beim vorhandenen Berechnungsmodell für Massivwände mit WDVS bewegt sich die Standardabweichung mit $\sigma = 2,0 \text{ dB}$ auf ähnlichem Niveau wie bei den Ständer-

wänden [20]. Für die meisten praktischen Anwendungen (bauliche Schallschutzplanung, etc.) reicht diese Genauigkeit im Normalfall erfahrungsgemäß völlig aus.

Im Falle einer Gaußschen Normalverteilung, von der man im vorliegenden Fall in guter Näherung ausgehen kann, hat die Standardabweichung im Hinblick auf die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung folgende statistische Bedeutung:

- mit 68,3 % Wahrscheinlichkeit liegt die Abweichung im Bereich von $\pm\sigma$,
- mit 95,4 % Wahrscheinlichkeit liegt die Abweichung im Bereich von $\pm 2\sigma$,
- mit 99,7 % Wahrscheinlichkeit liegt die Abweichung im Bereich von $\pm 3\sigma$.

11 Zusammenfassung

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) verbessern nicht nur die thermische Isolation der Gebäudehülle, sondern verändern außerdem in starkem Maße die Schalldämmung der Außenwand, wobei abhängig vom jeweiligen Aufbau sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung erfolgen kann. Beim baulichen Schallschnachweis müssen WDVS daher stets berücksichtigt werden, wofür geeignete bauakustische Planungswerkzeuge erforderlich sind. Im Gegensatz zum Massivbau, wo seit langem zuverlässige Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung zur Verfügung stehen, waren derartige Werkzeuge für den Leichtbau bislang nicht vorhanden. Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens war es deshalb, ein zuverlässiges akustisches Prognoseverfahren für Holz- und Leichtbauwände mit WDVS zu entwickeln.

Den wichtigsten akustischen Kennwert für WDVS bildet die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS, ΔR_w , die sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann (bei negativen Werten tritt eine Verschlechterung der Schalldämmung ein). Wirkt tieffrequenter Außenlärm, wie z. B. innerstädtischer Straßenverkehr, auf die Wand ein, so kann zur verbesserten Beurteilung der Schallschutzwirkung zusätzlich der entsprechende Spektrum-Anpassungswert nach DIN EN ISO 717-1 in die Betrachtung einbezogen werden. In diesem Fall dient die Verbesserung $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ als geeignete akustische Beurteilungsgröße.

Den Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens bildete eine Messreihe, bei der die Schalldämmung von Leichtbauwänden mit WDVS systematisch untersucht wurde. Die Messungen erfolgten in einem bauakustischen Prüfstand, wobei ein spezieller Prüfaufbau mit demontierbarem WDVS und verkleinerter Prüffläche Verwendung fand. Der Aufbau ermöglichte es, mit verhältnismäßig geringem baulichen Aufwand eine große Anzahl von Messungen durchzuführen. Insgesamt wurden 56 verschiedene Wände untersucht, die folgende Konstruktionen umfassten:

- Grundwände: 16 Holzständerwände, 3 Metallständerwände und eine Massivholzwand,
- Dämmsysteme: 23 WDVS aus verschiedenen Dämmstoffen (XPS, EPS, elastifiziertes EPS, Putzträger- und Lamellenplatten aus Mineralfaser sowie Holz-

weichfaser) mit unterschiedlicher Putz- und Dämmstoffdicke, teilweise zusätzlich mit Dübeln befestigt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messreihe dienen als Grundlage, um das akustische Verhalten von Leichtbauwänden mit WDVS zu analysieren und unter Verwendung der hierbei gewonnenen Erkenntnisse ein Berechnungsmodell für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS zu entwickeln. Die wichtigsten Ergebnisse des durchgeführten Forschungsvorhabens lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS treten bei den untersuchten Leichtbauwänden Werte im Bereich von $-2,2 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 12,3 \text{ dB}$ auf. Der Mittelwert liegt bei 3,3 dB. Der angegebene Wertebereich ist nur etwa halb so breit, wie dies früheren Untersuchungen zufolge im Massivbau der Fall ist. Verschlechterungen der Schalldämmung durch das WDVS sind im Leichtbau seltener und beschränken sich auf erheblich niedrigere Werte. Die Unterschiede sind vor allem auf die geringere Dämmstoffdicke (und die daraus resultierende höhere Resonanzfrequenz) im Leichtbau zurückzuführen, die den akustischen Einfluss von WDVS gegenüber massiven Wänden erheblich herabsetzt.
- Abgesehen von der zumeist geringeren Dämmstoffdicke verhalten sich WDVS auf Leichtbauwänden akustisch in vieler Hinsicht ähnlich wie im Massivbau. So weist z. B. die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS in beiden Fällen den gleichen charakteristischen Frequenzverlauf mit dem typischen Dämmungsminimum im Bereich der Resonanzfrequenz auf. Deshalb lassen sich die aus dem Massivbau bekannten akustischen Zusammenhänge vom Grundsatz her in der Regel auch auf den Leichtbau übertragen.
- Die wichtigste akustische Einflussgröße für WDVS im Leichtbau ist die Resonanzfrequenz: je niedriger die Resonanzfrequenz, desto größer die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes der Grundwand durch das WDVS. Wichtig ist außerdem das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand, da der akustische Einfluss von WDVS bei Wänden mit hoher Schalldämmung erheblich abnimmt. Die zusätzliche Befestigung mit Dübeln vermindert die akustische Wirkung von WDVS demgegenüber nur vergleichsweise wenig und auch nur dann, wenn der Dübelteiler direkten Kontakt mit der Putzschicht hat. Da beim Einsatz von Dübeln Körperschallbrücken zwischen WDVS und Wand entstehen, beschränkt sich die Wirkung von Dübeln vor allem auf WDVS mit weicher Dämmschicht, während der Einfluss bei steifen Dämmstoffen weitgehend zu vernachlässigen ist. Alle erwähnten Zusammenhänge sind übrigens analog auch aus dem Massivbau bekannt.
- Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse wurde ein einfaches, semiempirisches Prognoseverfahren entwickelt, mit dem sich die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Leichtbauwänden durch WDVS aus den Bauteildaten vorherberechnen lässt. Für die Vorhersagegenauigkeit des Verfahrens (Differenz zwischen Messung und Rechnung) ergibt sich eine Standardabweichung von etwa $\sigma = 2,1 \text{ dB}$, wobei sich die Unterschiede im Bereich von $-4,0 \text{ dB}$ bis $5,2 \text{ dB}$ (betragsmäßig größte Abweichung mit negativem und positivem Vorzeichen) bewegen. Die genannte Berechnungsgenauigkeit liegt in etwa gleicher Größenordnung

wie bei anderen bauakustischen Prognoseverfahren und reicht für die praktische Anwendung (z. B. im Bereich der baulichen Schallschutzplanung) im Normalfall völlig aus.

- Der Anwendungsbereich des entwickelten Berechnungsverfahrens umfasst alle herkömmlichen Holz- und Metallständerwände, sofern die Beplankung aus bauüblichen Werkstoffen (z. B. Spanplatten, OSB-Platten oder Gipskartonplatten) besteht und keine baulichen Besonderheiten (elastisch befestigte Beplankungsplatten, etc.) vorhanden sind. Es gilt auch für Wände mit getrenntem Ständerwerk, Wände mit Installationsebene sowie außerdem für übliche Massivholzwände. Das WDVS kann aus allen herkömmlichen Fassaden-Dämmstoffen bestehen und zusätzlich auch mit Dübeln befestigt sein. Auch die direkte Montage der Dämmung an den Ständern (bei Holzweichfaserplatten üblich) wird durch das Verfahren erfasst.
- Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass es mit verhältnismäßig wenigen Eingangsdaten auskommt und dass die verwendeten Berechnungsformeln von wenigen Ausnahmen abgesehen in gleicher Weise für alle Konstruktionen gelten. Da die Unterscheidung zwischen verschiedenen Bauweisen und Konstruktionsvarianten entfällt, ergibt sich ein kompaktes und übersichtliches Modell, das in der Praxis einfach anzuwenden ist. Der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ wurde nicht in das Berechnungsverfahren einbezogen, da der hierfür erforderliche Aufwand zu groß gewesen wäre. Dies ist jedoch auch nicht unbedingt notwendig, da in diesem Fall auch ohne Berechnung in der Regel ausreichende Angaben für die bauliche Schallschutzplanung vorhanden sind (siehe unten).
- Das entwickelte Verfahren kann selbstverständlich auch zur Optimierung der Schalldämmung von Leichtbauwänden mit WDVS genutzt werden. Da WDVS im Leichtbau wie schon erwähnt einen deutlich geringeren akustischen Einfluss als im Massivbau haben, ist allerdings auch das vorhandene Optimierungspotenzial entsprechend geringer. Die höchste Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes wird bei Verwendung weicher Dämmstoffe mit entsprechend niedriger Resonanzfrequenz des WDVS erreicht. Hierbei verschlechtert sich jedoch oft die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen (kenntlich daran, dass $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ negative Werte annimmt), so dass für die Praxis in den meisten Fällen eher eine Resonanzfrequenz im mittleren Bereich (ca. 250 Hz bis 500 Hz) zu empfehlen ist.
- Bei der Schallschutzplanung von Bauten wird die Resonanzfrequenz des WDVS rechnerisch aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht bestimmt. Der hierfür verwendete Wert der dynamischen Steifigkeit beruht im Normalfall (da keine anderen genormten Verfahren verfügbar sind) auf einer Messung nach DIN EN 29052-1. Da diese Norm eigentlich für Trittschall- und nicht für Wärmedämmstoffe bestimmt ist, ergibt sich ein systematischer Fehler, der eine Korrektur der berechneten Resonanzfrequenz erforderlich macht. Diese Korrektur, die vor allem bei steifen Dämmstoffen zur Anwendung kommt, ist bereits in dem entwickelten Berechnungsmodell enthalten.
- Bei Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ (bei tieffrequentem Außenlärm, wie z. B. innerstädtischem Straßenverkehr, im Hinblick auf eine adäquate Beurteilung der Schallschutzwirkung zu empfehlen) ergibt sich für die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS ein Wertebereich von $-3,4 \text{ dB} \leq$

$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) \leq 6,9$ dB mit einem Mittelwert von 2,5 dB. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass negative Werte der Verbesserung nur bei 3 der 56 untersuchten Wände zu verzeichnen waren, wobei es sich in allen Fällen um WDVS aus Mineralfaser-Putzträgerplatten mit besonders niedriger dynamischer Steifigkeit handelte. Bei der bauakustischen Schallschutzplanung sollte man deshalb für solche Systeme sicherheitshalber von einer Verbesserung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) = -3$ dB ausgehen. Für alle übrigen WDVS kann in erster Näherung ein Wert von 0 dB angesetzt werden, wodurch man sich in jedem Fall auf der sicheren Seite bewegt.

Als wichtigstes Ergebnis des durchgeführten Forschungsvorhabens steht nun auch für den Leichtbau – in ähnlicher Weise wie im Massivbau – ein validiertes und zuverlässiges Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung von Wänden mit WDVS zur Verfügung. Die akustischen Einflüsse und Zusammenhänge wurden untersucht und sind nun auch für WDVS auf Leichtbauwänden weitgehend verstanden. Für den Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ wurden geeignete Planungshinweise zur Vermeidung von baulichen Schallschutzmängeln erarbeitet.

Nach der Veröffentlichung des Forschungsberichts – bzw. nach Publikation der Forschungsergebnisse in einer geeigneten Fachzeitschrift – kann das entwickelte Berechnungsverfahren unmittelbar in der Praxis angewendet werden (z. B. in der bauakustischen Planung, bei der Erstellung von Schallschutznachweisen, etc.). Die erforderlichen Berechnungsformeln sind verhältnismäßig einfach und erfordern keine besonderen mathematischen Kenntnisse. Alle für die Berechnung erforderlichen Erklärungen und Angaben sind im Bericht vorhanden.

Längerfristig ist geplant, das entwickelte Modell – analog zum vorhandenen Verfahren für den Massivbau – in die bauakustische Normung einzubringen (das akustische Berechnungsmodell für Massivwände mit WDVS, das vom IBP vor einigen Jahren im Rahmen eines vom BBSR geförderten Forschungsvorhabens entwickelt wurde, wird derzeit in DIN 4109-34 [60] integriert). Das IBP ist in dem hierfür zuständigen Normungsgremium (NABau) vertreten und kann dies auch für den Holz- und Leichtbau in die Wege leiten. Allerdings benötigen derartige Normungsaktivitäten erfahrungsgemäß einen ausreichenden zeitlichen Vorlauf.

12 Verwendung der Forschungsmittel

Die vom BBSR zur Verfügung gestellten Forschungsmittel wurden sparsam und ausschließlich für den vorgesehenen Verwendungszweck eingesetzt. Einsparungen wurden z. B. dadurch erreicht, dass die für die messtechnischen Untersuchungen erforderlichen Prüfaufbauten in modularer Bauweise hergestellt wurden und dadurch in unterschiedlicher Weise kombiniert und mehrfach verwendet werden konnten. Auch der Einsatz eines Messaufbaus mit verkleinerter Prüffläche trug maßgeblich zur Kosteneinsparung bei. Ohne die genannten Maßnahmen wäre die umfangreiche Messreihe an Leichtbauwänden mit WDVS, die den Hauptteil und die Grundlage des durchgeführten Forschungsvorhabens bildete, in dem verfügbaren Kostenrahmen nicht möglich gewesen. Umfang und Durchführung der Messreihe (Die Messungen erfolgten in einem hierfür

angepassten bauakustischen Prüfstand im IBP) entsprachen im Wesentlichen der geplanten und im Forschungsantrag beschriebenen Vorgehensweise.

Alle angefallenen Ausgaben – sowohl Sachmittel als auch Personalkosten – waren zur Erreichung des Forschungszieles notwendig und bewegten sich innerhalb des hierfür erforderlichen und angemessenen Rahmens. Die verwendeten Sachmittel dienten ausschließlich zur Herstellung und Umgestaltung von Prüfgegenständen sowie der Beschaffung des benötigten Verbrauchsmaterials. Investitionen in Einrichtungen, die nach Abschluss des durchgeführten Forschungsvorhabens weiter genutzt werden können, wurden nicht getätigt.

Die angestrebten Ziele des Forschungsvorhabens wurden in vollem Umfang erreicht. Dies betrifft vor allem die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Vorherberechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Leichtbauwänden mit WDVS. Außerdem wurden die für das akustische Verhalten von WDVS maßgebenden Einflussgrößen identifiziert und ihre Wirkung mit mathematischen Formeln beschrieben. Weiterhin erbrachten die durchgeführten Untersuchungen neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen WDVS und dem Spektrum-Anpassungswert für tieffrequente Geräusche, so dass die entsprechende Problematik bei der Schallschutzplanung im Leichtbau künftig besser berücksichtigt werden kann.

13 Literatur

- [1] Mantau, U.; Kaiser, C.: Konjunkturelle Entwicklungen im Bauwesen und künftige Marktchancen im Holzbau. Thünen Report 9 (2013).
- [2] Straßenverkehrslärm - Eine Hilfestellung für Betroffene. ALD - Arbeitsring Lärm der DEGA. ALD-Schriftenreihe, Band 1 / 2010.
- [3] Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2013. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau (2013).
- [4] Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland - Fokus Verkehrslärm. Forschungsverbund Leiser Verkehr (2013).
- [5] DIN EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (Juni 2013).
- [6] DIN EN ISO 10140-1 bis -5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand (Dez. 2010 bis Dez. 2016).
- [7] DIN EN 29052-1: Akustik - Bestimmung der dynamischen Steifigkeit - Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (Aug. 1992).
- [8] Rückward, W.: Einfluß von Wärmedämm-Verbundsystemen auf die Luftschalldämmung. Bauphysik 4 (1982), H. 2, S. 54 - 56.
- [9] Rückward, W.: Luftschalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen - leichte und schwere Putzschichten im Vergleich. Bauphysik 4 (1982), H. 5, S. 161 - 165.

- [10] Paulmann, K.: Neue Untersuchungen zur Luftschalldämmung von Wänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Bauphysik 16 (1994), H. 4, S. 115 - 121.
- [11] Scholl, W.: Schallschutz mit Wärmedämm-Verbundsystemen aus elastifiziertem Polystyrol (System "Marmorit Warm-Wand polimell"). Bericht B-BA 2/1998 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP).
- [12] Scholl, W.: Schalldämmung mit Wärmedämm-Verbundsystemen, Teil 1: Systeme mit elastifizierten Polystyrol-Dämmplatten. Bauphysik 21 (1999), H. 1, S. 20 - 28.
- [13] Frommherz, J.: Modellierung der Schalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit LAYERS. Diplomarbeit im Studiengang Bauphysik der HfT Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2001).
- [14] Weber, L.; Zhang, Y.; Brandstetter, D.: Influence of Wall Construction on the Acoustical Behaviour of ETHICS. Fortschritte der Akustik - DAGA 2002 (Bochum), Tagungsband, S. 520 - 521.
- [15] Weber, L.: Effect of ETHICS on the flanking transmission of outer walls. Fortschritte der Akustik - DAGA 2004 (Straßburg), Tagungsband, S. 475 - 476.
- [16] Weber, L.; Leistner, P.: Aktuelle Ergebnisse zum Schallschutz von Fassaden und Außenbauteilen. Bauphysik 26 (2004), H. 6, S. 300 - 304.
- [17] Weber, L.: Akustisches Berechnungsmodell für Wärmedämm-Verbundsysteme. Fortschritte der Akustik - DAGA 2005 (München), Tagungs-CD, S. 465 - 466.
- [18] Kernöcker, R.; Schild, R.: Schalldämmung von Ziegelwänden mit WDV. Broschüre der Sto Ges. m.b.H. und des Zieglerverbandes für Oberösterreich und Salzburg (Herausgeber), 2009.
- [19] Weber, L.: WDV-Systeme zum Thema Schallschutz. Technische Systeminfo 7 des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Herausgeber), Jan. 2013.
- [20] Weber, L.; Müller, S.; Kaltbeitzel, B.: Einfluss von Wärmedämm-Verbundsystemen auf die Schalldämmung von Außenwänden. Bauphysik 40 (2018), H. 1, S. 19 - 30.
- [21] Weber, L.; Zhang, Y.; Brandstetter, D.: Untersuchung der Schall-Längsdämmung von Außenwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Bericht B-BA 4/2002 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Nov. 2003.
- [22] Weber, L.; Brandstetter, D.: Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen. Bericht B-BA 6/2002 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) und des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V., Juli 2003.
- [23] Weber, L.: Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen - Ergänzung des Berechnungsverfahrens. Bericht B-BA 4/2005 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Juli 2005.
- [24] Weber, L.; Müller, S.: Technische Stellungnahme zur Schalldämmung von Massivwänden mit zweilagigem Wärmedämm-Verbundsystem. Stellungnahme des

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) im Auftrag der DAW Stiftung & Co KG, Geschäftsbereich alsecco (Jan. 2014).

- [25] Weber, L.; Müller, S.: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen. IBP-Bericht B-BA 1/2014 im Auftrag des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), März 2015.
- [26] Weber, L.; Kaltbeitzel, B.: Schalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit zweilagiger Dämmschicht. IBP-Bericht B-BA 1/2016 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Mai 2016.
- [27] Rabold, A.; Bacher, S.: Wärmedämm-Verbundsysteme und Außendämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz in der Altbausanierung - Prognose und Optimierung der schalltechnischen Eigenschaften. Forschungsbericht des ift Rosenheim im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR), Jan. 2014.
- [28] Hongisto, V.: Sound insulation of double panels - Comparison of existing prediction models. *Acta Acustica* 92, S. 61 - 78 (2006).
- [29] Price, A. J.; Crocker, M. J.: Sound Transmission through Double Panels using Statistical Energy Analysis. *Journal of the Acoustical Society of America* 3, S. 683 - 693 (1970).
- [30] Donato, R. J.: Sound Transmission through a Double-Leaf Wall. *Journal of the Acoustical Society of America* 3, S. 807 - 815 (1971).
- [31] Brekke, A.: Calculation Methods for the transmission loss of single, double and triple partitions. *Applied Acoustics* 14, S. 225 - 240 (1981).
- [32] Iwashige, H.; Ohta, M.: A practical method of estimating sound transmission loss of double walls - A proposal and its application to the popular case of light panels and air gap. *Acustica* 48, S. 97 - 101 (1981).
- [33] Pagliarini, G.; Pompoli, R.: Airborne Sound Insulation Index of Double Walls: Application to two Simplified Methods for Estimating Transmission Loss. *Acustica* 52, S. 296 - 299 (1983).
- [34] Novak, R. A.: Sound Insulation of Lightweight Double Walls. *Applied Acoustics* 37, S. 281 - 303 (1992).
- [35] Craik, R. J. M.; Smith, R. S.: Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: airborne sound. *Applied Acoustics* 61 (2000), S. 223 - 245.
- [36] Craik, R. J. M.; Smith, R. S.: Sound transmission through lightweight parallel plates. Part II: structure-borne sound. *Applied Acoustics* 61 (2000), S. 247 - 269.
- [37] Craik, R. J. M.: Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis. *Applied Acoustics*, Vol. 64, H. 3 (2003), S. 325 - 341.
- [38] Tadeu, A.; António, J.; Mateus, D.: Sound insulation provided by single and double panel walls – a comparison of analytical solutions versus experimental results. *Applied Acoustics*, Vol. 65, H. 1 (2004), S. 15 - 29.

- [39] Wang, J.; Lu, T. J.; Woodhouse, J.; Langley, R.S.; Evans, J.: Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling. *Journal of Sound and Vibration* 286 (2005), S. 817 - 847.
- [40] Vigran, T. E.: Sound insulation of double-leaf walls – Allowing for studs of finite stiffness in a transfer matrix scheme. *Applied Acoustics* 71 (2010), S. 616 - 621.
- [41] Diaz-Cereceda, C.; Poblet-Puig, J.; Rodriguez-Ferran, A.: The finite layer method for modelling the sound transmission through double walls. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), S. 4884 - 4900.
- [42] Arjunan, A.; Wang, C. J.; Yahiaoui, K.; Mynors, D. J.; Morgan, T.; English, M.: Finite element acoustic analysis of a steel stud based double-leaf wall. *Building and Environment*, Vol. 67 (2013), S. 202 - 210.
- [43] Foret, R.; Guigou-Carter, C.; Villot, M.: Effect of thermal insulation systems on acoustic performances of ancient building construction elements. 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, Inter-Noise 2010, 9, S. 6920 - 6929.
- [44] Guigou-Carter, C.; Foret, R.; Wetta, R.; Ducruet, P.; Villot, M.: Comparison of measured and predicted sound insulation for a thermal retrofitted building. *Noise Control Engineering Journal* 59 (3) (2011), S. 278 - 289.
- [45] Kosny, J.; Asiz, A.; Smith, I.; Shrestha, S.; Fallahi, A.: A review of high R-value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques. *Energy and Buildings* 72 (2014), S. 441 - 456.
- [46] Parati, L.; Farbood, B. P.; Borghi, M.: May retrofit also include acoustics aspects? *Energy Procedia* 78 (2015), S. 158 - 163.
- [47] Santoni, A.; Bonfiglio, P.; Davy, J. L.; Fausti, P.; Pompoli, F.; Pagnoncelli, L.: Sound transmission loss of ETICS cladding systems considering the structure-borne transmission via the mechanical fixings: Numerical prediction model and experimental evaluation. *Applied Acoustics* 122 (2017), S. 88 - 97.
- [48] Miskinis, K.; Dikavicius, V.; Buska, A.; Banionis, K.: Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study. *Applied Acoustics* 137 (2018), S. 62 - 68.
- [49] Rabold, H.; Hessinger, J.; Bacher, S.; Fuhrer, M.: Erarbeitung eines Prognoseverfahrens zur Bestimmung der Schalldämmung von Holzständerwänden auf der Grundlage der Konstruktion und der verwendeten Werkstoffe. Forschungsbericht 310 2910 des ift Rosenheim im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e. V., Nov. 2006.
- [50] Rabold, A.; Wissel, C.; Schanda, U.; Hessinger, J.: Prognose der Schalldämmung von leichten Trennwänden. *DAGA 2010*, S. 759 - 760.
- [51] DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärm-spektrum (Nov. 1997).
- [52] Weber, L.; Koch, S.: Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten - Teil 1: Luftschalldämmung. *Bauphysik* 21 (1999), H. 4, S. 167 - 170.

- [53] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen (Aug. 1987).
- [54] Blevins, R. D.: Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing Company, Reprint Edition 2001, S. 48, Tab. 6-2.
- [55] Weber, L.; Kaltbeitzel, B.: Verbesserung der Schalldämmung von leichten Ständerwänden bei tiefen Frequenzen. IBP-Bericht B-BA 2/2017 im Auftrag des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), März 2018.
- [56] Bauer, D.: Einfluss von WDVS auf die Schalldämmung von Leichtbauwänden. MSc-Thesis an der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Nov. 2017).
- [57] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag, 2. Auflage (1996), Abschnitt 3.5.2.
- [58] Weber, L.; Öhler, S.: Akustisch wirksame Kleb- und Dichtstoffe für den Einsatz in Gebäuden. Bericht B-BA 2/2013 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Mai 2014.
- [59] DIN EN ISO 12999-1: Akustik - Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik - Teil 1: Schalldämmung (Sept. 2014).
- [60] DIN 4109-34: Schallschutz im Hochbau - Teil 34: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen (Juli 2016).

14 Danksagung

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

- den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern (Knauf Gips KG, Firma Sto und Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel) für die Unterstützung des Vorhabens, insbesondere die Herstellung von Prüfmustern, die Bereitstellung von Baustoffen, die anwendungstechnische Beratung sowie die Beteiligung an der Versuchsplanung,
- Herrn Dominik Bauer für die Mitwirkung und Unterstützung bei einem großen Teil der durchgeführten Messungen,
- Herrn Thomas Glaser für die gewissenhafte und sorgfältige Durchführung der meisten handwerklichen Arbeiten.

Anhang

A.1 Berechnungsverfahren des ift

$\Delta R_{w,WDVS}$: Verbesserung der Schalldämmung durch Wärmedämmverbundsysteme

WDVS auf äußerer Beplankung montiert (bei Holzständerwänden) :	
$\Delta R_{w,WDVS} =$	$-11,5 \cdot \log(f_{r,WDVS}) + 33 + K_{R,w,0} + K_{Dämmstofftyp} + K_{Montage} \text{ [dB]}$
WDVS aus HWF direkt auf dem Ständer montiert (bei Holzständerwänden) :	
$\Delta R_{w,WDVS} =$	$-5,18 \cdot \log(s') + 10,52 + K_{R,w,0} + K_{Montage} \text{ [dB]}$
WDVS aus HWF oder MF auf Massivholzelement u.ä.:	
$\Delta R_{w,WDVS} =$	$-34,8 \cdot \log(f_{r,WDVS}) + 87,08 + K_{R,w,0} + K_{Montage} \text{ [dB]}$
mit:	
$K_{R,w,0} =$	$\begin{cases} -0,68(R_{w,0} + \Delta R_{w,i}) + 30,64 \text{ dB} & \text{für WDVS auf äußerer Bepl.} \\ -0,18(R_{w,0} + \Delta R_{w,i}) + 8,23 \text{ dB} & \text{für WDVS direkt auf Ständer} \\ -0,16(R_{w,0} + \Delta R_{w,i}) + 5,72 \text{ dB} & \text{für WDVS auf Massivholzelement u.ä.} \end{cases}$ <p>mit $-3 \text{ dB} < K_{R,w,0} < 3 \text{ dB}$</p>
$K_{Dämmstofftyp} =$	$\begin{cases} -4 \text{ dB} & \text{für WDVS aus elastifiziertem EPS} \\ -2 \text{ dB} & \text{für WDVS aus EPS} \\ 0 \text{ dB} & \text{für WDVS aus MF} \\ 1 \text{ dB} & \text{für WDVS aus HWF} \end{cases}$
$K_{Montage} =$	$\begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{Bei vollflächiger Verklebung} \\ 3 \text{ dB} & \text{Bei punktwaiser Verklebung} \\ 3 \text{ dB} & \text{Bei Verschraubung ohne Anpressdruck} \end{cases}$
Hierbei bedeuten:	
$R_{w,0}$	Bewertetes Schalldämm-Maß der Grundkonstruktion
$\Delta R_{w,i}$	Verbesserungsmaße durch Zusatzbeplankungen oder Installationsebenen in dB
$f_{r,WDVS}$	Doppelwandresonanz nach Gleichung 5 in Hz für das WDVS auf der Grundwand
s'	Dynamische Steifigkeit der WDVS-Dämmplatten in MN/m ³

Anhang 1: Berechnungsverfahren für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Holzständerwänden durch WDVS. Auszug aus dem Forschungsbericht 310 2910 des ift Rosenheim [49], Abschnitt 5, Seite 39.