

Lutz Weber, Simon Müller

Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen

F 2949

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- 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

2015

ISBN 978-3-8167-9497-4

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-BA 1/2014

Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen

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

(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-11.13 / II 3-F20-10-1-011 / IBP - 422207)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

90 Seiten Text

13 Tabellen

63 Abbildungen

1 Anhang

Dr. Lutz Weber

Dipl.-Ing. Simon Müller

Stuttgart, 9. März 2015

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

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

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

Dr.
Lutz Weber

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Vorgehensweise	7
3	Stand der Forschung	9
4	Akustische Grundlagen	10
4.1	Geräuschbelastung durch Außenlärm	10
4.2	Schalldämmung von Bauteilen	11
4.3	Bewertetes Schalldämm-Maß	12
4.4	Spektrum-Anpassungswerte	13
4.5	Resultierende Schalldämmung von Außenbauteilen	15
5	Schalldämmung von WDVS	17
5.1	Aufbau und Klassifizierung von WDVS	17
5.2	Akustisches Wirkungsprinzip	18
5.3	Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS	22
5.4	Einfluss der Resonanzfrequenz	23
5.5	Einfluss der Grundwand	24
5.6	Weitere Einflussgrößen	26
6	Messaufbau und Prüfobjekte	26
6.1	Versuchsaufbau und Messdurchführung	26
6.2	Grundwände	31
6.2.1	Stahlbetonplatten	32
6.2.2	Wände aus Hochlochziegeln	33
6.2.3	Holzständerwand	34
6.3	Wärmedämm-Verbundsysteme	36
6.3.1	Herstellung und Aufbau	37
6.3.2	Dynamische Steifigkeit	38
6.4	Voruntersuchungen	42
7	Akustische Berechnungsmodelle	45
7.1	Verfahren zur Bestimmung von ΔR_w	46
7.1.1	Grundprinzip	46
7.1.2	Resonanzfrequenz f_R	47
7.1.3	Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS $R_{w,o}$	48

7.1.4	Verbesserung unter Standardbedingungen $\Delta R_{w,S}$	50
7.1.5	Korrektur für Dübel K_D	50
7.1.6	Korrektur für die Klebefläche K_K	51
7.1.7	Korrektur für die Grundwand K_T	51
7.1.8	Korrektur für den Strömungswiderstand K_S	51
7.2	Verfahren zur Bestimmung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$	51
7.2.1	Grundprinzip	51
7.2.2	Verbesserung unter Standardbed. $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_S$	52
7.2.3	Korrektur für die Klebefläche K'_K	53
7.2.4	Korrektur für die Grundwand K'_T	53
7.2.5	Korrektur für den Strömungswiderstand K'_S	53
7.2.6	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ für verdübelte Systeme	53
7.3	Berechnungsgenauigkeit	54
7.4	Vergleich von ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$	55
8	Untersuchungsergebnisse	57
8.1	WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke	57
8.2	Zweilagige WDVS	61
8.3	WDVS auf Lochsteinwänden	66
8.4	WDVS auf Holzständerwand	71
8.5	Verkehrslärmspektren	74
9	Planungshinweise	79
10	Nachhaltigkeit von WDVS	82
11	Zusammenfassung	83
12	Literatur	85
13	Danksagung	90
A.1	Berechnungsverfahren für Holzständerwände	91

1 Einleitung

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) verbessern die thermische Isolation der Gebäudehülle und liefern damit einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Heizenergie. Wegen ihrer einfachen und kostengünstigen Herstellung sind sie im Bauwesen weit verbreitet. In ihrer üblichen Ausführung bestehen die Systeme aus Dämmstoffplatten, die - zumeist mit Klebemörtel sowie gegebenenfalls zusätzlich mit Dübeln - von außen am Bauwerk befestigt und anschließend verputzt werden. In akustischer Hinsicht verhalten sie sich wie ein Masse-Feder-System, so dass neben der thermischen Isolationswirkung auch die Schalldämmung der Grundwand in starkem Maße beeinflusst wird. Abhängig vom Aufbau des WDVS kann hierbei sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung der Schalldämmung erfolgen, wobei sich für übliche Systeme bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß eine Streubreite von etwa $-10 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq +20 \text{ dB}$ ergibt. Wärmedämm-Verbundsysteme müssen daher beim baulichen Schallschutznachweis für die Gebäudehülle im Normalfall immer mit berücksichtigt werden.

In den Jahren 2002 bis 2005 wurden die akustischen Eigenschaften von WDVS im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in mehreren Forschungsvorhaben umfassend untersucht [1 - 3]. Dabei wurden unter anderem zuverlässige Verfahren zur Vorherberechnung der Schalldämmung im Massivbau entwickelt, die bei der baulichen Schallschutzplanung und im Bereich bauaufsichtlicher Zulassungen bis heute in unveränderter Form Verwendung finden. Im Hinblick auf das akustische Verhalten von WDVS bestand deshalb zunächst kein weiterer Forschungsbedarf [4 - 7]. Die kontinuierliche Verschärfung der Energieeinsparverordnung hat in den letzten Jahren jedoch neuartige Bauweisen hervorgebracht, die von den derzeit vorhandenen Berechnungsverfahren nicht erfasst werden. Da für diese Bauweisen keine ausreichende akustische Planungssicherheit vorhanden ist, besteht die Gefahr von Schallschutzmängeln, die eine verminderte Wohn- und Arbeitsqualität sowie unter Umständen kostenintensive bauliche Sanierungsmaßnahmen zur Folge haben können. Das durchgeführte Forschungsvorhaben stellt die erforderlichen Messdaten bereit, um die vorhandenen Prognose- und Planungswerkzeuge zu aktualisieren und so die derzeitige Planungsunsicherheit zu beseitigen.

Beim Einsatz von Wärmedämm-Verbundsystemen im modernen Bauwesen bestehen gegenüber der bisherigen Bauweise vor allem folgende Unterschiede:

- Für WDVS werden heute Dämmschichten mit weit größerer Dicke (bis etwa 400 mm) verwendet, als dies noch vor einigen Jahren der Fall war. Zu der Zeit, als die derzeit verwendeten Berechnungsmodelle entwickelt wurden, waren Dämmstoffdicken von maximal etwa 200 mm gebräuchlich. Da die Datenbasis der Modelle keine Dämmsysteme mit mehr als 200 mm Dicke umfasste, sind bislang - abgesehen von einer nicht validierten Extrapolation der Berechnungsformeln - keine zuverlässigen akustischen Prognosen für derartige Systeme möglich.
- Auch Wände aus Hochlochziegeln sowie Leicht- und Porenbeton, die wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs bislang ohne Zusatzdämmung auskamen, werden in zunehmendem Maße mit WDVS versehen. Bislang ist unklar, ob

die vorhandenen Prognoseverfahren auch für solche Wände gelten, oder ob gegebenenfalls Modifikationen der Berechnungsformeln erforderlich sind.

- Da seit einigen Jahren auch Außenwände in Holz- und Leichtbauweise zur Verbesserung der Wärmeisolation zusätzlich mit WDVS versehen werden, werden auch für diese Bauweise Verfahren zur Prognose der Schalldämmung benötigt. Der Kenntnisstand in diesem Bereich ist derzeit jedoch noch gering.
- Bei der Sanierung bestehender WDVS wird auf das Altsystem vielfach eine weitere Dämmschicht aufgebracht, so dass ein doppeltes Masse-Feder-System mit veränderten akustischen Eigenschaften entsteht. Prognoseverfahren für die Schalldämmung derartiger Systeme stehen bislang nicht zur Verfügung.

Ein weiteres schwerwiegendes Problem beim Einsatz von WDVS besteht darin, dass zur Beurteilung der Schallschutzwirkung von Außenbauteilen gemäß den derzeitigen baurechtlichen Vorschriften das bewertete Schalldämm-Maß R_w heranzuziehen ist [8]. Da das bewertete Schalldämm-Maß ursprünglich für Innengeräusche entwickelt wurde, führt es beim Schallschutz gegenüber Außenlärm zu einer stark verzerrten akustischen Bewertung. Dies hat zur Folge, dass Planer und Hersteller bei der Herstellung von WDVS bevorzugt Dämmstoffe mit geringer Steifigkeit einsetzen, da auf diese Weise die Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems herabgesetzt wird, wodurch sich eine starke Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ergibt. Dabei wird allerdings zumeist übersehen, dass sich die Verbesserung der Schalldämmung auf den Bereich hoher Frequenzen beschränkt, während im tieffrequenten Bereich in der Umgebung der Resonanz eine starke Verschlechterung erfolgt. Da übliche Außengeräusche, wie z. B. Straßenverkehrslärm, häufig gerade in diesem Frequenzbereich ihre pegelbestimmenden Anteile aufweisen, bietet die Verwendung weicher Dämmstoffe in der akustischen Praxis zumeist keine Vorteile, sondern wirkt sich oft sogar kontraproduktiv auf den baulichen Schallschutz aus.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung weicher Dämmstoffe besteht in der geringeren mechanischen Belastbarkeit des Dämmsystems. Dies hat einerseits eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen (Stöße, Ballwürfe, Hagelschlag, etc.) zur Folge und verstärkt andererseits die Gefahr der Rissbildung in der Putzschicht, was zu Schäden infolge von außen eindringender Feuchtigkeit führen kann. In Anbetracht der bereits erwähnten akustischen Probleme ist daher zu konstatieren, dass weiche Dämmstoffe nur geringe Vorteile, aber viele praktische Nachteile mit sich bringen. Die bisherige Bau- und Planungspraxis bei WDVS ist deshalb sowohl in akustischer als auch in bautechnischer Hinsicht als Fehlentwicklung anzusehen.

Die derzeitigen akustischen Planungsfehler lassen sich größtenteils vermeiden, wenn bei der Auslegung von WDVS statt des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w die Summe aus R_w und den Spektrum-Anpassungswerten C und C_{tr} , also $(R_w + C)$ bzw. $(R_w + C_{tr})$, herangezogen wird. Die Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} , die nach DIN EN ISO 717-1 [9] aus dem Frequenzverlauf der Schalldämmkurve berechnet werden, wurden bereits im Jahr 1997 in die europäische Normung eingeführt, sind jedoch in Deutschland im Gegensatz zu den meisten anderen europäischen Ländern noch immer nicht

Bestandteil der geltenden Schallschutzanforderungen (dies gilt leider auch für den Entwurf der neuen DIN 4109 [10], der im November 2013 veröffentlicht wurde).

Obgleich die Spektrum-Anpassungswerte keinen Einfluss auf die Einhaltung der Schallschutzanforderungen haben, wurde von vielen Planern und Architekten mittlerweile erkannt, dass ihre Anwendung zumeist unerlässlich ist, um einen wirksamen Schallschutz von Außenbauteilen zu gewährleisten. Unsicherheit besteht jedoch selbst in akustischen Fachkreisen vielfach noch im Hinblick auf die richtige Anwendung der Spektrum-Anpassungswerte, da nicht nur zwei verschiedene Werte (C und C_{tr}) existieren, sondern diese Werte auch noch für verschiedene Frequenzbereiche berechnet werden können. Die Angaben in DIN EN ISO 717-1 lassen in dieser Hinsicht leider viele Fragen offen, so dass es bei vielen Außenlärmsituationen unklar bleibt, welcher Wert als praxisnaher Beurteilungsmaßstab für einen wirksamen Schallschutz heranzuziehen ist. Die nähere Untersuchung dieser Problematik ist deshalb gleichfalls Bestandteil des durchgeführten Forschungsvorhabens.

Die wichtigsten Ziele des Forschungsvorhabens bestehen deshalb zum einen in der akustischen Charakterisierung neuartiger Bauelemente und Bauweisen durch Überarbeitung, Ergänzung und Erweiterung der vorhandenen Berechnungsmodelle und zum anderen in der Korrektur der derzeitigen akustischen und technischen Fehlentwicklungen bei WDVS durch Anpassung und Präzisierung der Beurteilungskriterien für die Schallschutzwirkung unter praktischen Einsatzbedingungen. Im Einzelnen sollen dabei folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Entwicklung eines Modells zur Berechnung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ für Wände mit WDVS (hierbei bezeichnet $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ die Verbesserung der Einzahlangabe $R_w + C_{tr,50-5000}$ durch das Anbringen des WDVS). Obgleich $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ die wichtigste praktische Beurteilungsgröße für den Schallschutz von Außenbauteilen darstellt, ist dafür - Im Gegensatz zur Verbesserung des bewerteten Schalldämmmaßes ΔR_w - bislang noch kein Vorhersageverfahren verfügbar.
- Ergänzung der bestehenden Berechnungsmodelle für WDVS mit einer Dämmstoffdicke von mehr als 200 mm (zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen werden dabei Dämmschichten mit einer Dicke von bis zu 400 mm betrachtet).
- Untersuchung der akustischen Eigenschaften zweilagiger WDVS (dabei wird auf einem bereits vorhandenen WDVS ein weiteres Dämmsystem befestigt) und Ableitung geeigneter Verfahren zur Prognose der Schalldämmung derartiger Konstruktionen.
- Durchführung von Messungen zur Untersuchung des akustischen Verhaltens von WDVS auf Wänden aus Hochlochziegeln (HLZ). Da die Schalldämmung von HLZ-Wänden in starkem Maße durch Eigenschwingungen der einzelnen Mauersteine bestimmt wird, ist zu klären, ob eine akustische Wechselwirkung der Steine mit dem WDVS besteht. Dies bestimmt, inwieweit sich die vorhandenen Berechnungsverfahren, die für die Anbringung von WDVS auf Wänden aus ungelochten Steinen entwickelt wurden, auf Lochsteinwände übertragen lassen. Obgleich Wände aus Poren- oder Leichtbeton teilweise ähnliche akustische Eigenschaften aufwei-

sen, beschränken sich die Untersuchungen auf Hochlochziegel, da die maßgebenden Effekte hier am deutlichsten zutage treten.

- Exemplarische Untersuchung des akustischen Verhaltens von WDVS auf Wänden in Leichtbauweise am Beispiel einer praxisüblichen Holzständerwand.
- Messtechnische Erfassung der Frequenzspektren typischer Außengeräusche (verschiedene Arten von Verkehrslärm). Die Messungen sollen Auskunft darüber geben, welcher Spektrum-Anpassungswert in Verbindung mit unterschiedlichen Außenlärmszenarien anzuwenden ist.

2 Vorgehensweise

Das durchgeführte Forschungsvorhaben umfasst mehrere unterschiedliche Themen, die aufeinander aufbauen und in enger fachlicher Beziehung zueinander stehen, andererseits jedoch eine individuelle Bearbeitung erfordern. Um diesen Zusammenhängen Rechnung zu tragen, war eine entsprechende Organisation der Abläufe und durchgeführten Untersuchungen erforderlich. Die wichtigsten Arbeitsblöcke des Untersuchungsprogramms sind im Folgenden kurz beschrieben:

- a) Der erste Arbeitsschritt bestand aus einer Literatur- und Produktrecherche und diente vor allem dazu, vorhandene Ergebnisse und Messdaten zu den untersuchten Forschungsthemen zusammenzutragen. Dies bestimmte zum einen den Umfang der erforderlichen messtechnischen Untersuchungen. Zum anderen wurde die bereits vorhandene Datenbank mit Schalldämm-Maßen von Wänden mit WDVS soweit ergänzt und angepasst, dass sie zur Entwicklung eines Prognosemodells für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ genutzt werden konnte.
- b) Für das im zweiten Arbeitsschritt entwickelte Verfahren zur Berechnung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ wurde auf die im vorangehenden Schritt zusammengetragenen Messdaten zurückgegriffen. Da sich diese Daten als ausreichend erwiesen, waren hierzu keine weiteren Messungen, sondern lediglich rechnerische Untersuchungen erforderlich. Als Grundlage der Berechnungen diente das aus vorangehenden Projekten vorhandene semiempirische Modell für ΔR_w [2, 3], das entsprechend modifiziert und ergänzt wurde. Anschließend wurden die Berechnungsparameter dann so angepasst, dass sich eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergab (mittlere Abweichung Null, Standardabweichung minimal).
- c) Der dritte Arbeitsschritt umfasste die erforderlichen Messungen zur akustischen Charakterisierung neuer Bauweisen (WDVS mit großer Dämmstoffdicke, zweilagige Systeme und WDVS auf HLZ- und Leichtbauwänden), für die bislang keine ausreichenden Messdaten vorlagen. Zur Reduzierung der Baukosten, die einen beträchtlichen Teil des Forschungsetats beanspruchten, wurden die Messungen nach vorangehender Validierung des Verfahrens an einem verkleinerten Versuchsaufbau (Prüffläche $H \times B = 1,45 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$) in einem bauakustischen Fensterprüfstand durchgeführt. Das Messprogramm umfasste sieben Grundwände (vier baugleiche Betonplatten, zwei HLZ-Wände und eine Holzständerwand), die mit sechs verschiedenen WDVS (vier einlagige Systeme mit Dämmstoffdicken von 100 mm bis 400 mm sowie zwei doppelagige WDVS) kombiniert wurden. Einschließlich Vor-

versuchen, Wiederholungs- und Ergänzungsmessungen wurden insgesamt etwa vierzig Schalldämm-Messungen durchgeführt. Die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit des verwendeten Dämmstoffs erfolgte durch Messungen nach DIN EN 29052-1 [11].

- d) Nach Abschluss des Messprogramms wurden die ermittelten Messdaten ausgewertet und mit den vorhandenen Berechnungsmodellen abgeglichen. Hierbei zeigte sich, dass die Modelle die Messergebnisse im Großen und Ganzen bereits so gut beschreiben, dass keine größeren Korrekturen, sondern lediglich kleinere Ergänzungen erforderlich waren. Die auf diese Weise erzielte Prognosegenauigkeit reicht für die meisten praktischen Anwendungen aus.
- e) Den nächsten Arbeitsschritt bildeten umfangreiche Schallimmissionsmessungen zur Ermittlung der Frequenzspektren praxisüblicher Außengeräusche. Ziel der Untersuchungen war es, geeignete Kriterien zur korrekten akustischen Auslegung von WDVS in Abhängigkeit von der Art des auf die Fassade einwirkenden Außenlärms festzulegen. Die ermittelten Ergebnisse können unter anderem als Entscheidungshilfe bei der Auswahl des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Spektrum-Anpassungswertes nach DIN EN ISO 717-1 herangezogen werden. Um möglichst repräsentative Aussagen zu erhalten, wurden mehr als achtzig Messungen an verschiedenen Arten von Straßen und Schienenwegen sowie in der Einflugschneise eines Verkehrsflughafens durchgeführt.
- f) Im letzten Arbeitsschritt wurden die in den vorangehenden Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und zur Formulierung von Konstruktions- und Planungshinweisen für WDVS herangezogen. Neben dem Dämmsystem selbst umfasste dies selbstverständlich auch die baulichen Randbedingungen (Aufbau und Schalldämmung der Grundwand, Einfluss von Fenstern und Zusatzeinrichtungen) sowie die Art des einwirkenden Außenlärms.

Das oben beschriebene Arbeitsprogramm weicht in einigen Punkten leicht von der ursprünglich vorgesehenen Vorgehensweise ab. Die Abweichungen wurden auf der ersten Arbeitsgruppensitzung auf Wunsch der Projektpartner in Abstimmung mit dem Beratergremium beschlossen. Die wichtigste Änderung betrifft die an Leichtbauwänden durchgeführten Untersuchungen, die zunächst nicht Bestandteil des Forschungsvorhabens waren. Obgleich die Bearbeitung dieses Themas wegen der komplizierten akustischen Verhältnisse und der außerordentlich großen Konstruktionsvielfalt im Leichtbau zwangsläufig nur orientierend erfolgen kann, wurde die Problematik von den Projektpartnern als so wichtig erachtet, dass sie die Einbeziehung von Leichtbauwänden in das Vorhaben für unverzichtbar hielten. Zum Ausgleich für den hierdurch entstehenden Mehraufwand wurde die vorgesehene messtechnische Optimierung von WDVS auf die Formulierung geeigneter Konstruktions- und Planungshinweise beschränkt.

Eine weitere Änderung betraf die geplanten psychoakustischen Hörversuche, die zur Beurteilung der Schallschutzwirkung bei unterschiedlichen Arten von Außenlärm herangezogen werden sollten. Zwischenzeitlich in anderen Projekten gewonnene Erfahrungen ließen erkennen, dass Hörversuche im verfügbaren Zeit- und Kostenrahmen kein sinnvolles Werkzeug zur Bearbeitung der untersuchten Fragestellung darstellen. Der Grund hierfür besteht in den zahlreichen unterschiedlichen Kriterien (Zeit und Dau-

er des Auftretens, Impuls- und Einzeltonhaltigkeit, dauerhafte oder intermittierende Einwirkung, etc.), die die Wahrnehmung von Außenlärm bestimmen. Da die Berücksichtigung dieser Kriterien nur mit unverhältnismäßigem großem Aufwand möglich gewesen wäre, wurde entschieden, sich bei den Untersuchungen auf das Frequenzspektrum des Außenlärms, das sich als wichtigste Beurteilungsgröße unmittelbar auf den in das Gebäude übertragenen Schallpegel auswirkt, zu beschränken. Anstatt von Hörversuchen wurden deshalb Immissionsmessungen zur Charakterisierung typischer Außenlärm Szenarien durchgeführt.

3 Stand der Forschung

Dass Wärmedämm-Verbundsysteme die Schalldämmung von Außenwänden erheblich verändern können, ist schon lange bekannt. Auch die Ursache hierfür - das Resonanzverhalten des aus Grundwand, Dämmstoff und Putzschicht gebildeten Masse-Feder-Systems - ist offenkundig [12 - 16]. Erste Versuche, das akustische Verhalten von WDVS theoretisch nachzubilden, waren hingegen nur bedingt erfolgreich [17]. Ein zuverlässiges akustisches Vorhersageverfahren für WDVS, das es ermöglicht, aus den technischen Eigenschaften des Systems (dynamische Steifigkeit der Dämmung, flächenbezogene Masse der Putzschicht, etc.) die Schalldämmung zu berechnen, wurde erst vor etwa zehn Jahren im IBP auf semiempirischer Grundlage entwickelt [2, 3]. Obgleich sich das Verfahren auf Einzahlangaben - insbesondere das bewertete Schalldämm-Maß R_w - beschränkt, stellt es ein nützliches Werkzeug für Ingenieure und Architekten dar, da die bauakustische Planung von Bauten in der Praxis in der Regel unter Verwendung von Einzahlangaben erfolgt. Wie neue Untersuchungen aus dem Jahr 2014 ergaben, ist das Verfahren nicht nur bei klassischen Dämmstoffen wie Polystyrol oder Mineralfaser anwendbar, sondern gilt - mit leichten Modifikationen - ebenso für WDVS aus nachwachsenden Rohstoffen [18].

Da sich bei der Konstruktion von Außenbauteilen zwischenzeitlich Veränderungen ergeben haben, deckt das erwähnte Berechnungsmodell nur einen Teil der derzeit üblichen Bauweisen ab. Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens ist es deshalb, die vorhandenen Lücken zu schließen. Eine dieser Lücken umfasst Außenwände aus Hochlochziegeln, für die eine zusätzliche Wärmedämmung wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit der Steine bislang nicht erforderlich war. Aufgrund der gestiegenen energetischen Anforderungen werden neuerdings jedoch auch HLZ-Wände zusätzlich mit WDVS versehen. Dies gilt vor allem für bestehende Bauten, die thermisch nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und deshalb nachgerüstet werden sollen.

Wände aus Hochlochziegeln unterscheiden sich von monolithischem Mauerwerk akustisch vor allem dadurch, dass die einzelnen Steine Eigenschwingungen aufweisen, die eine zusätzliche Schallübertragung bewirken und den Frequenzverlauf der Schalldämmkurve verändern (vielfach äußert sich dies in einem charakteristischen Einbruch der Schalldämmkurve). Die Schalldämmung von Wänden aus Hochlochziegeln wurde in der Vergangenheit intensiv untersucht und ist im Wesentlichen gut bekannt. [19 - 27]. Unklarheit herrscht jedoch derzeit noch im Hinblick auf das akustische Verhalten von HLZ-Wänden in Verbindung mit WDVS. Abgesehen von einigen unveröffentlichten

Messungen im Auftrag von Herstellern, existiert zu diesem Thema bislang lediglich eine Broschüre der Firma Sto [28]. Leider ist diese Broschüre für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben nur von geringem Wert, da die erforderlichen technischen Angaben zu Wänden und Dämmsystemen von wenigen Ausnahmen abgesehen nur lückenhaft sind. Hinzu kommt, dass es sich bei einem der beiden in dem Bericht untersuchten Steine um einen sogenannten "Schallschutzziegel" handelt, der sich aufgrund seines Lochbildes und des geringen Lochflächenanteils akustisch nahezu neutral (also wie ein normaler ungelochter Stein) verhält.

Ähnliche akustische Effekte wie bei Hochlochziegeln treten im Übrigen teilweise auch bei Mauersteinen aus Poren- sowie Leichtbeton auf. Allerdings sind die Eigenschwingungen der Steine hier zumeist erheblich schwächer ausgeprägt [23], weshalb sich die im vorliegenden Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen auf Hochlochziegel beschränken.

Eine weitere Art von Außenwänden, die bislang nur selten mit WDVS in Verbindung gebracht wurde, sind Wände in Leichtbauweise, wie z. B. die im Fertigtbau vielfach eingesetzten Holzständerwände. Obwohl diese Wände von sich aus über eine gute Wärmeisolation verfügen, werden sie in zunehmendem Maße zusätzlich mit WDVS versehen. Für Leichtbauwände ohne WDVS existieren zahlreiche Berechnungsverfahren, die von frequenzabhängigen Modellen auf theoretischer Basis bis hin zur empirischen Abschätzung von Einzulangaben reichen [29, 30]. Der Einfluss von WDVS auf Leichtbauwände wurde bislang hingegen erst in einem einzigen Forschungsvorhaben näher untersucht [31]. Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte semiempirische Modell bildet derzeit die einzige Möglichkeit, um die Schalldämmung von Holzständerwänden mit WDVS mit hinreichender Genauigkeit rechnerisch vorherzubestimmen. Das Modell wird deshalb auch im vorliegenden Bericht verwendet, obgleich es sich auf die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes beschränkt und zudem auf einer verhältnismäßig schmalen Datenbasis von weniger als fünfzehn Messungen beruht.

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 ausge-

prägt. Dies ist in Abb. 1 anhand der zur Berechnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} verwendeten genormten Frequenzspektren veranschaulicht:

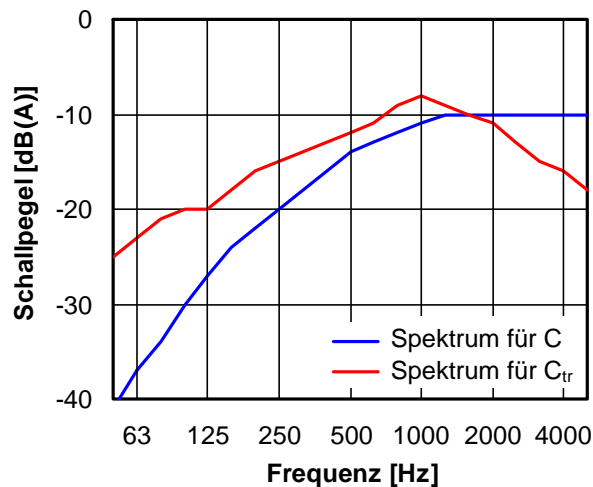


Abb. 1: Frequenzspektren zur Berechnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} nach DIN EN ISO 717-1. Das für C verwendete Spektrum (sogenanntes rosa Rauschen) stellt eine vereinfachte Nachbildung wohnüblicher Innengeräusche dar. Das Spektrum für C_{tr} entspricht - abgesehen von dem bis 50 Hz hinab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

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 je-

doch mit einer für die Praxis meist hinreichenden Genauigkeit durch eine vereinfachte Beziehung darstellen. Hierbei wird die Schalldämmkurve bei tiefen Frequenzen durch ein ebenes Plateau nachgebildet, an das sich bei hohen Frequenzen ein (in logarithmischer Darstellung) linearer Anstieg anschließt [23, 33]. Ein Beispiel für eine derartige Näherung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Die Näherung wird im Folgenden noch mehrfach herangezogen, um den Einfluss von WDVS auf die Schalldämmung von Massivwänden zu veranschaulichen.

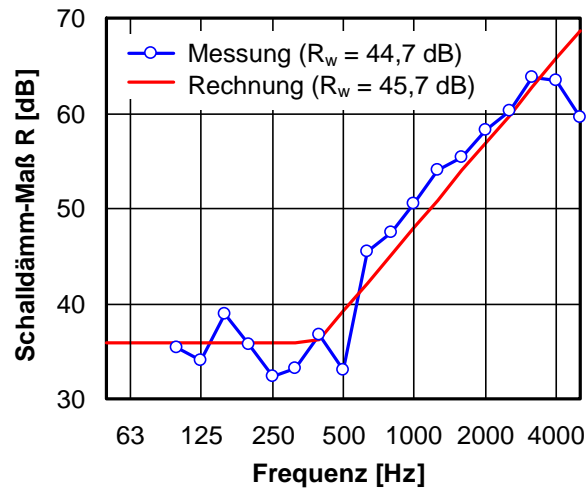


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung der Schalldämmkurve einer einschaligen Massivwand mit einer flächenbezogene Masse von $m'' \cong 130 \text{ kg/m}^2$ im Vergleich zu einer Prüfstandsmessung.

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:

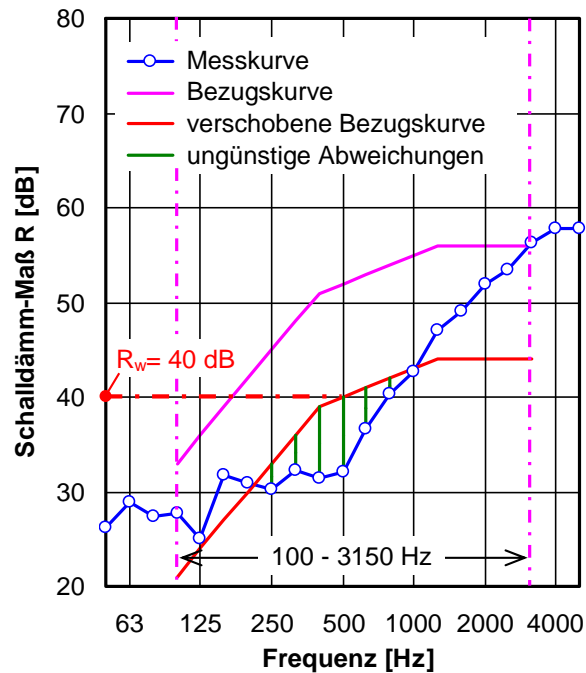


Abb. 3: Beispiel für die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w . Die Berechnung erfolgt durch vertikale Verschiebung der Bezugskurve in ganzzahligen Schritten. Die Verschiebung wird so lange fortgesetzt, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, aber nicht mehr als 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 im Normalfall 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 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:

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

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 [34]:

- 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) der Wert C_{tr} heranzuziehen.

Bei Wänden 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 Außenwänden mit WDVS ist der Unterschied im Allgemeinen um so größer, je niedriger die Resonanzfrequenz des WDVS liegt. Auf die Auswahl des geeigneten Spektrum-Anpassungswertes in Abhängigkeit von der Art des einwirkenden Außenlärms wird später noch ausführlich eingegangen.

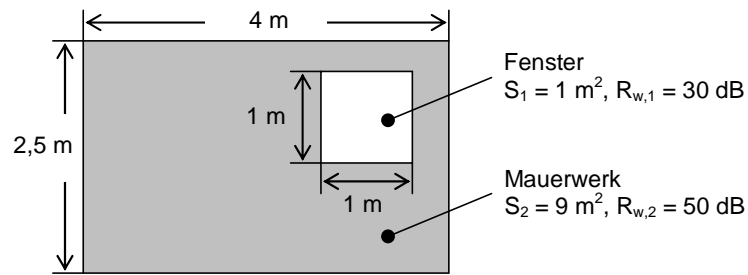
Trotz ihrer großen akustischen Bedeutung sind die Spektrum-Anpassungswerte in den gesetzlichen Anforderungen für den baulichen Schallschutz bislang nicht berücksichtigt. Auch bei der derzeitigen Überarbeitung von DIN 4109 im Normungsausschuss NABau ist in dieser Hinsicht keine Änderung geplant. Rechtlich 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 nur auf diese Weise eine gehörliche 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:

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

Hierbei bezeichnen S_n und R_n die Fläche und das Schalldämm-Maß des n-ten Elements, während $S_{ges} = S_1 + S_2 + \dots + S_m$ 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:



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

Abb. 4: Beispiel für die Berechnung des resultierenden Schalldämm-Maßes $R_{w,res}$ 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 $R_{w,res} = 40,0 \text{ dB}$ 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.

In der nachfolgenden Abbildung wird der Einfluss von Fenstern auf die Schalldämmung von Außenwänden rechnerisch demonstriert. Die Berechnung erfolgte für ein Fenster mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von $R_{w,Fenster} = 35 \text{ dB}$, 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 $R_{w,Wand} = 45 \text{ dB}$ 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.

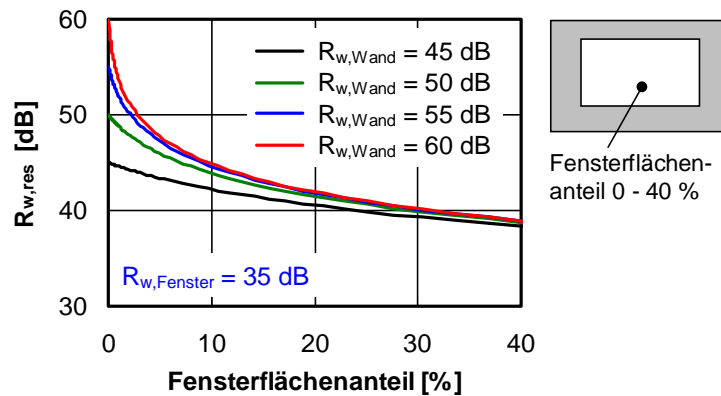


Abb. 5: Resultierendes Schalldämm-Maß einer Außenwand mit Fenster in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil. Bei der Berechnung wurde von einem Fenster mit einer Schalldämmung von $R_{w,Fenster} = 35$ dB (Schallschutzklasse 3 nach VDI 2719 [35]) ausgegangen. Die Berechnung der dargestellten Kurven erfolgte 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 zumeist 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, gesinterter Blähglas oder Porenbeton zum Einsatz. Dies ist in der Praxis jedoch 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 (EEPS),
- Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP),
- Mineralfaser-Lamellenplatten (MFL).

Die aufgeführten Dämmstofftypen unterscheiden sich in ihren Materialeigenschaften und damit auch im akustischen Verhalten. So wird z. B. EEPS nach der Herstellung einer mechanischen Vorbehandlung unterzogen, die die Elastizität des Materials erhöht. Dämmplatten aus EEPS 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 zumindest für die Anbrin-

gung an Massivwänden, die in der Praxis den weitaus häufigsten Anwendungsfall darstellt. Eine Skizze des praxisüblichen Aufbaus ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

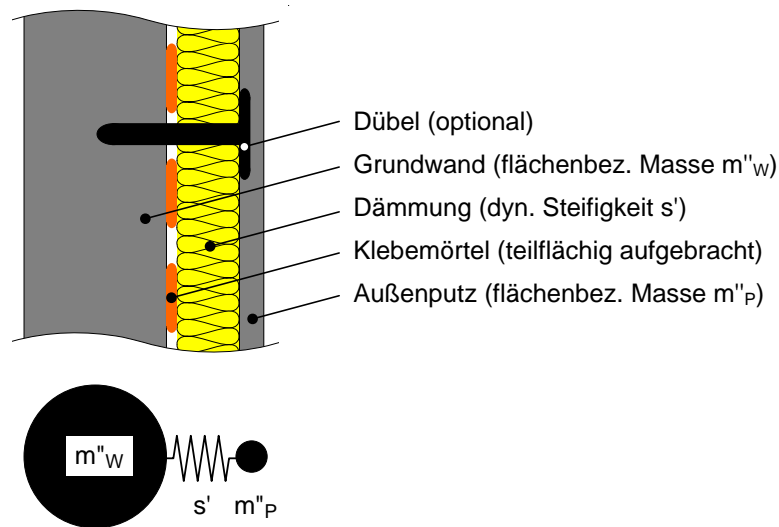


Abb. 6: Prinzipskizze des Aufbaus einer massiven Außenwand mit WDVS. Der untere Teil der Skizze veranschaulicht das akustische Wirkungsprinzip (Masse-Feder-Masse System).

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 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 Elastizitätsmodul auf).

Die Schallschutzwirkung von Vorsatzschalen 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.

Ogleich sich das akustische Verhalten von WDVS abhängig von Aufbau und Ausführung 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:

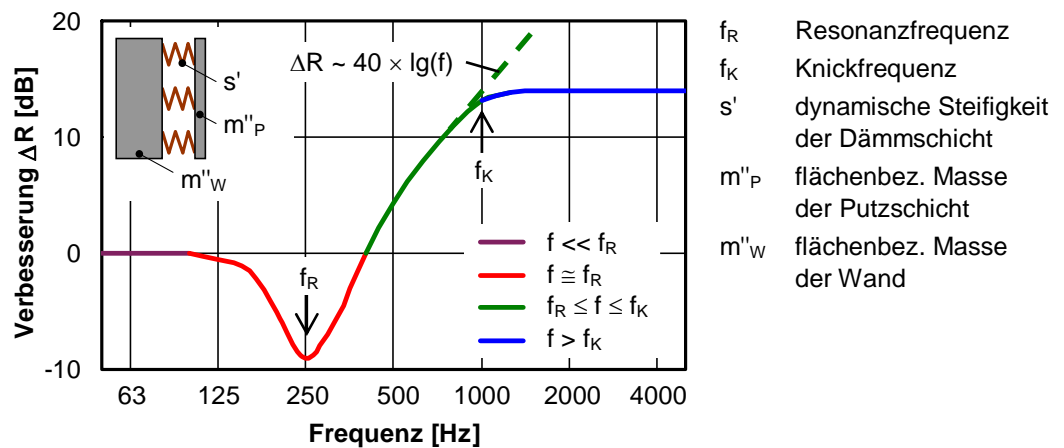


Abb. 7: Verbesserung der Schalldämmung einer Massivwand durch ein WDVS in Abhängigkeit von der Frequenz (schematische Darstellung am Beispiel eines WDVS mit einer Resonanzfrequenz von $f_R = 250$ Hz).

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 $40 \lg(f/f_R) = 12$ dB/Oktave an. In der Praxis fällt der

Anstieg, besonders bei stark bedämpften Systemen, zumeist etwas schwächer aus.

$f > f_K$: Bei hohen Frequenzen erfolgt aus noch nicht endgültig geklärten Gründen eine Abflachung oder sogar eine Richtungsumkehr des Anstiegs. 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:

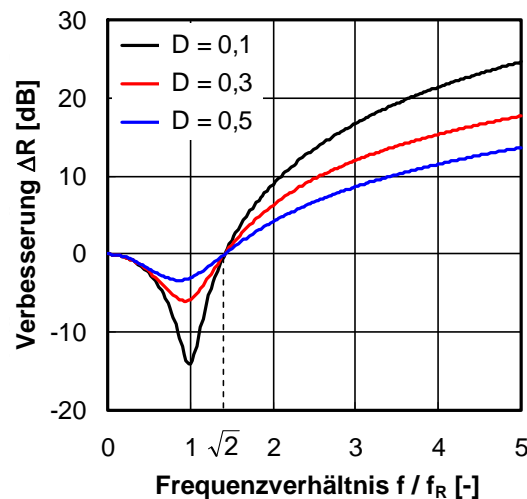


Abb. 8: Verbesserung der Schalldämmung durch ein bedämpften Masse-Feder-Systems in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis f / f_R . für verschiedene Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes D . Die dargestellten Kurven wurden mit Gl. (7) berechnet. Positive Werte bedeuten eine Verminderung, negative eine Verstärkung 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 Resonanzfrequenz, während im Resonanzbereich selbst eine Verschlechterung eintritt. Liegt die Resonanz zu hoch, so ist statt der angestrebten Erhöhung im Gegenteil eine Ab-

nahme 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 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 erst dann, wenn neben R_w auch der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ in die Betrachtung einbezogen wird. Auf diesen für die Praxis äußerst wichtigen Umstand wird später noch ausführlich eingegangen.

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, 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:

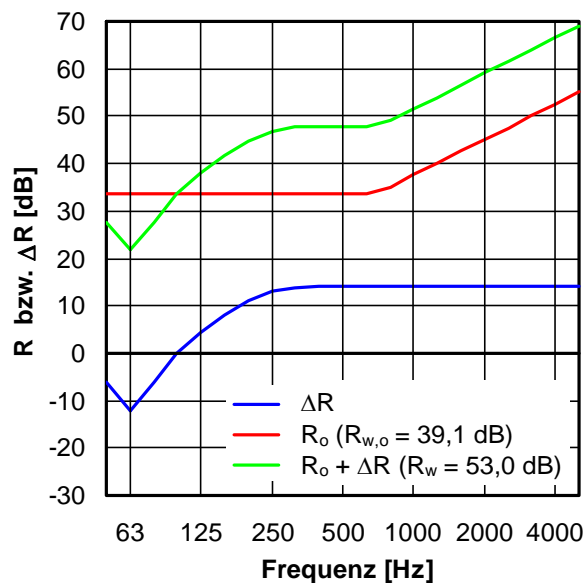


Abb. 9: Rechnerische Bestimmung der Verbesserung ΔR_w durch terzweise Addition von R und ΔR sowie Berechnung der bewerteten Schalldämm-Maße für das Ausgangs- und das Ergebnisspektrum. Für das dargestellte Beispiel wurden zwei idealisierte Bauteile betrachtet: Ein WDVS mit einer Resonanzfrequenz von $f_R = 63$ 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 zur Folge haben 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.

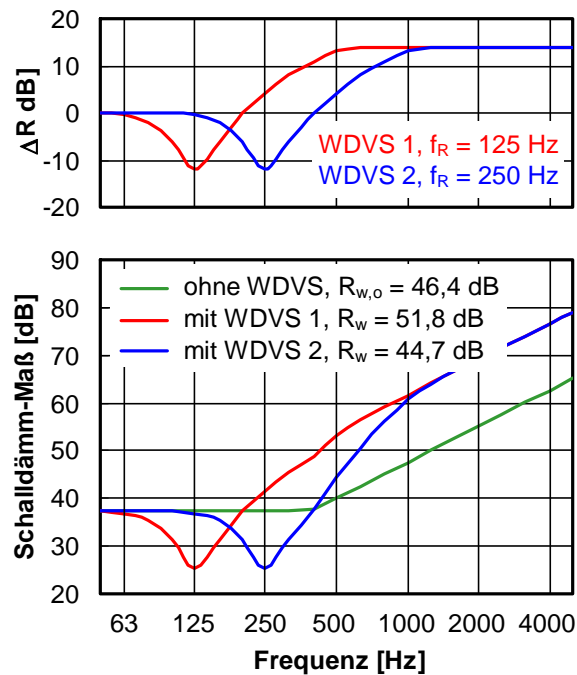


Abb. 10: Einfluss der Resonanzfrequenz auf das bewertete Schalldämm-Maß R_w am Beispiel von drei idealisierten Bauteilen. Rechnerische Kombination von zwei sonst gleichen WDVS mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz ($f_R = 125$ Hz bzw. $f_R = 250$ Hz, rote bzw. blaue Kurve im oberen Teil der Abbildung) mit der gleichen Grundwand ($m'' \cong 180$ kg/m², $R_{w,0} = 46,4$ 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_0 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.

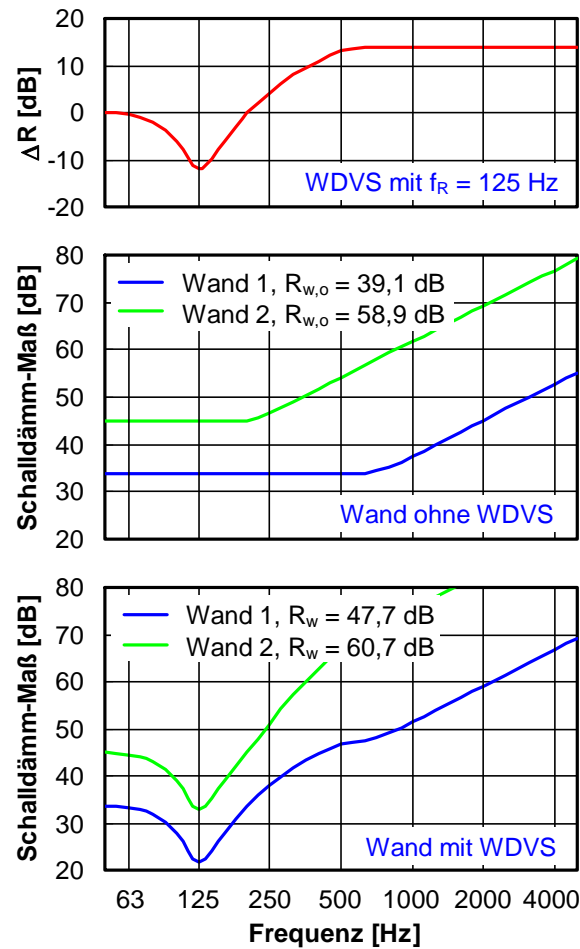


Abb. 11: Einfluss der Grundwand auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch WDVS (Berechnung mit idealisierten Bauteilen).

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 die Vorsatzschale bei der leichten Wand $\Delta R_w = 47,7$ dB - 39,1 dB = 8,6 dB, bei der schweren Wand hingegen nur $\Delta R_w = 60,7$ dB - 58,9 dB = 1,8 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: die Verbesserungen werden abgeschwächt und die 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 absenkt. 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.

Die erwähnten Einflussgrößen werden in dem in Abschnitt 7 beschriebenen Prognoseverfahren zur Berechnung der Schalldämmung durch entsprechende Korrekturen berücksichtigt.

6 Messaufbau und Prüfobjekte

6.1 Versuchsaufbau und Messdurchführung

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten experimentellen Untersuchungen hatten das Ziel, akustische Informationen über neue Bauweisen bereitzustellen, für die bislang keine geeigneten Messdaten vorlagen, sowie Lücken im vorhandenen Datenbestand zu schließen. Hierzu waren Messungen unter genau kontrollierten Konstruktions- und Einbaubedingungen mit möglichst hoher Reproduzierbarkeit erforderlich. Um die Anwendbarkeit der vorhandenen Berechnungsmodelle bei WDVS mit hoher Dämmstoffdicke zu untersuchen, war es beispielsweise erforderlich, Prüfkörper herzustellen, die sich lediglich in der Dicke der Dämmschicht voneinander unterscheiden, während alle anderen akustisch relevanten Einflussgrößen (Elastizitätsmodul des Dämmstoffs, flächenbezogene Masse der Putzschicht, Befestigung an der Grundwand, etc.) exakt übereinstimmen. Da die Schalldämmung von Wänden mit WDVS von vielen

unterschiedlichen Einflussgrößen abhängt, waren hierzu spezielle experimentelle Maßnahmen erforderlich, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

- Statt an Wänden normaler Größe wurden die Schalldämm-Messungen an verkleinerten Prüfkörpern in einem bauakustischen Fensterprüfstand durchgeführt. Die eingesetzten Prüfkörper (Grundwände) bestanden aus rechteckigen Platten oder Steinverbänden mit den Abmessungen $H \times B = 1,45 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$, auf denen die untersuchten WDVS in üblicher Weise befestigt wurden. Die Verwendung kleinflächiger Prüfkörper hatte zum einen den Vorteil, dass die erforderlichen Baukosten, die einen beträchtlichen Teil des Forschungsetats umfassten, erheblich reduziert werden konnten (die Verminderung der Bauteilfläche gegenüber einer normalen Prüfwand betrug ca. 85%). Zum anderen bestand auf diese Weise die Möglichkeit, die Prüfobjekte außerhalb des Prüfstands herzustellen. Sie wurden nur zur Messung in Prüfstand verbracht und danach sofort wieder ausgebaut. Dies stellte eine erhebliche logistische Erleichterung dar, da der verwendete Prüfstand auch für andere Untersuchungen benötigt wurde. Außerdem war auf diese Weise gewährleistet, dass alle Prüfobjekte zum Zeitpunkt der Messung die gleiche Trocknungszeit aufwiesen. Wie die durchgeführten Voruntersuchungen ergaben, hatte die Verkleinerung der Prüffläche keine Beeinträchtigung der Messergebnisse zur Folge.
- Da die Verklebung mit der Grundwand die akustischen Eigenschaften von WDVS in erheblichem Maße beeinflusst, wurde der verwendete Klebemörtel mit einer speziellen hierzu eigens angefertigten Schablone (siehe Abb. 13) auf die Dämmplatten aufgebracht. Hierdurch war gewährleistet, dass die Verklebung bei allen Prüfobjekten - im Hinblick auf Material, Position, Fläche und Dicke der Klebestellen - in genau gleicher Weise erfolgte.
- Die flächenbezogene Masse der Putzschicht wirkt sich über die Resonanzfrequenz gleichfalls in starkem Maße auf die Schalldämmung aus. Reproduzierbare und vergleichbare Messungen sind deshalb nur bei konstanter Putzdicke möglich. Um eine einheitliche Dicke der Putzschicht zu erreichen, wurden an den Rändern der Dämmplatten Putzschienen angebracht, mit deren Hilfe der aufgetragene Putz mittels eines Glättscheits auf eine Dicke von genau 8 mm abgezogen wurde.
- Ein Problem, das in der Praxis leider häufig zu beobachten ist, sind starke Produktstreuungen beim dynamischen Elastizitätsmodul von Wärmedämmstoffen (insbesondere Polystyrol). Selbst bei Produkten des gleichen Herstellers, die über die gleichen Spezifikationen verfügen, können sich die Werte erfahrungsgemäß um mehr als 50 % voneinander unterscheiden. Messungen, bei denen verschiedene Dämmstoffdicken unter ansonsten gleichen Bedingungen miteinander verglichen werden sollen, würden hierdurch natürlich stark verfälscht. Um dieses Problem zu umgehen, wurden für sämtliche Messungen die gleichen Dämmstoffplatten aus Polystyrol (gleiches Material, gleiche Dicke, gleicher Hersteller, gleiche Produktionscharge) verwendet. Zur Erhöhung der Dämmstoffdicke wurde die Platten mehrlagig aufeinander geklebt, wobei ein spezieller elastischer Klebstoff zum Einsatz kam, der vollflächig mit sehr geringer Schichtdicke aufgetragen wurde, so dass keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften erfolgte. Hierdurch war sichergestellt, dass alle untersuchten Dämmsysteme den gleichen dynamischen Elastizitätsmodul aufwiesen.

- Der Einbau in den Fensterprüfstand erfolgte bei allen Prüfobjekten in genau gleicher Weise, indem der fertige Aufbau mit einem Gabelstapler angehoben und in der Einbauöffnung des Prüfstands abgesetzt wurde. Nach Sicherung des Aufbaus durch Verkeilen wurden die zwischen dem Prüfaufbau und dem Rand der Prüföffnung vorhandenen Fugen unter Verwendung von Dichtleisten aus Gipskarton oder Stahlblech umlaufend mit plastischem Dichtstoff (Terostat) verschlossen. Die Abdichtung erfolgte beidseitig sowohl im Sende- als auch im Empfangsraum. Vor Herstellung der rückseitigen Abdichtung wurden alle verbliebenen Hohlräume zur Unterdrückung stehender Wellen mit schallabsorbierendem Schaumstoff gefüllt. Eine Skizze der beschriebenen Einbausituation ist in Abb. 15 dargestellt.

Um einen Transport der Prüfkörper mit dem Gabelstapler zu ermöglichen, befanden sich an der Unterseite zwei Aussparungen, in die sich die Gabel einschieben ließ (siehe Abb. 12). Vor der Messung wurden die Aussparungen mit zwei Holzklötzen passender Größe verschlossen und beidseitig abgedichtet.

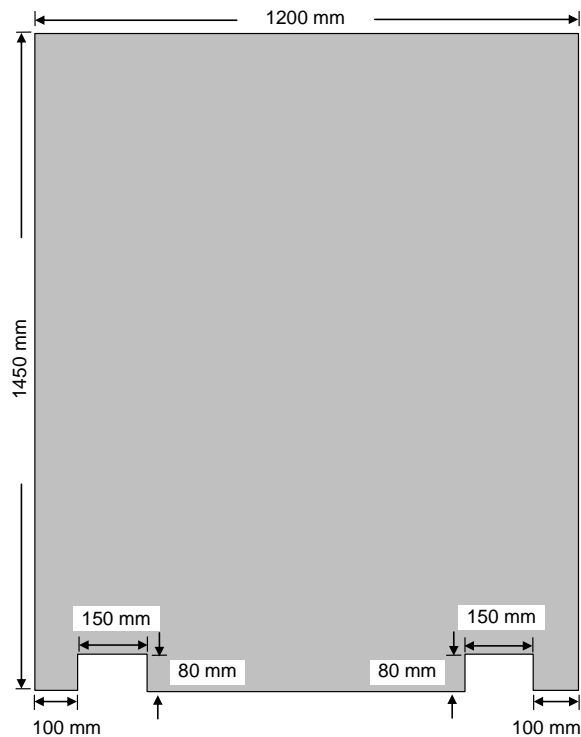


Abb. 12: Darstellung der für die akustischen Messungen im Fensterprüfstand verwendeten Prüfkörper. Die beiden Aussparungen auf der Unterseite dienten zum Transport mit dem Gabelstapler.

Zur reproduzierbaren Verklebung des WDVS mit der Grundwand wurde die in Abb. 13 dargestellte Schablone (Lochfläche insgesamt ca. 38 %) angefertigt, mit der der benötigte Klebstoff unter genau definierten geometrischen Bedingungen auf die Dämmplatten aufgebracht wurde (siehe Abb. 14). Die Abmessungen der Schablone waren so gewählt, dass die Fläche der Grundwand bei sechsmaligem Auflegen ohne Überlappung oder Überstand vollständig abgedeckt wurde. Da sich die Klebefläche beim Andrücken der Dämmplatten an die Grundwand erfahrungsgemäß noch geringfügig er-

höht, wurde für die Berechnungen von einem Klebeflächenanteil von 40 % ausgegangen.

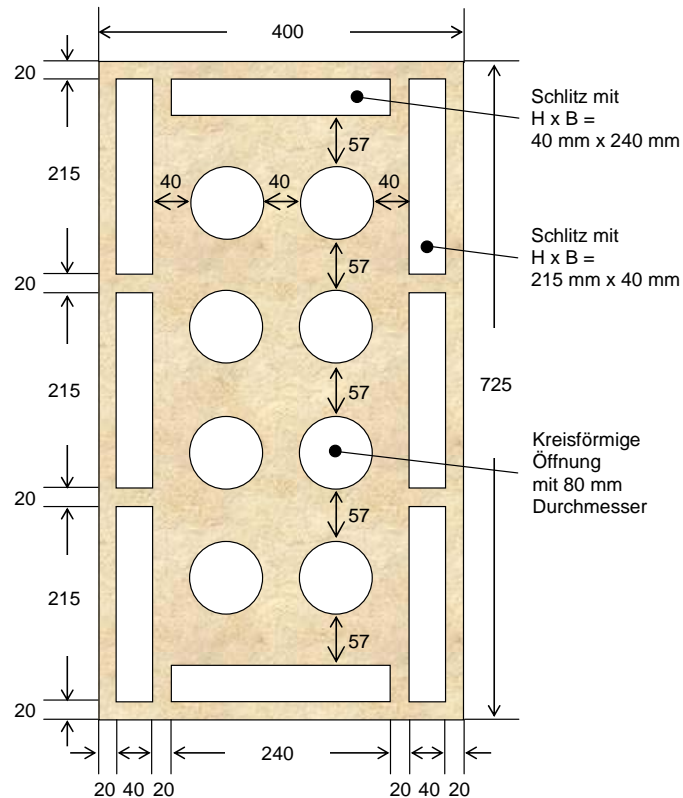


Abb. 13: Schablone zur reproduzierbaren Verklebung der Polystyrol-Platten auf der Grundwand im Punkt- / Wulst-Verfahren. Die Schablone bestand aus kunststoffbeschichteten Schichtholzplatten mit versiegelten Schnittkanten und hatte eine Dicke von 8 mm. Die Lochfläche betrug ca. 38 %.

Bei den Untersuchungen wurde jeweils die Schalldämmung der Prüfkörper mit und ohne WDVS ermittelt. Die Messungen erfolgten normgerecht nach DIN EN ISO 10140 [36]. 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 Senderraum zugewandt war. Der Einbau der Wände in die Prüföffnung ist in Abb. 15 schematisch illustriert. Auf den beiden Fotos in Abb. 16 ist die Bedämmung und Versiegelung der Fugen erkennbar.



Abb. 14: Dämmstoffplatte aus Polystyrol vor der Befestigung auf der Grundwand. Der Klebemörtel wurde mit der in Abb. 13 dargestellten Schablone aufgetragen.

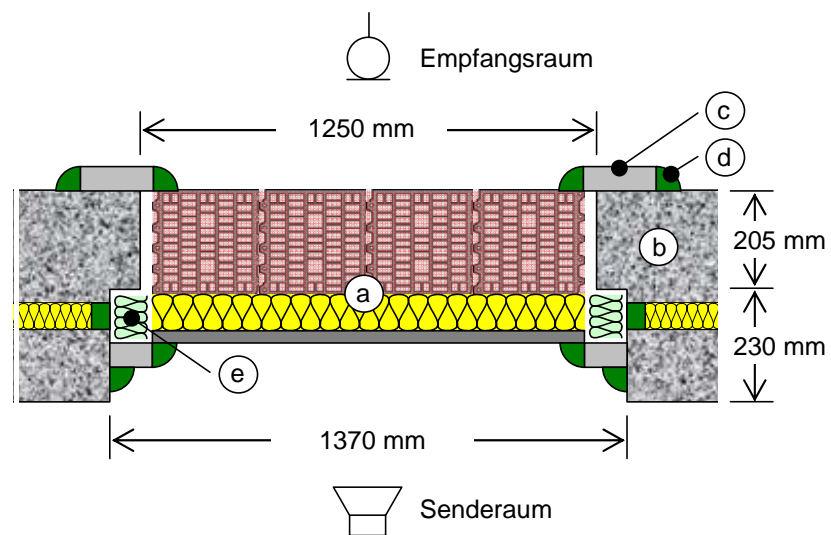


Abb. 15 Montage eines Prüfkörpers in der Einbauöffnung des Fensterprüfstands (horizontaler Schnitt) am Beispiel einer HLZ-Wand mit WDVS (Rückseite der Grundwand bündig mit hinterer Kante der Einbauöffnung im Empfangsraum).

- a) Prüfbjekt (Grundwand mit WDVS), $B \times H = 1200 \text{ mm} \times 1450 \text{ mm}$
- b) Zweischalige Trennwand des Fensterprüfstands mit genormter Einbauöffnung
- c) Dichtleisten aus Gipskarton (im Senderraum) bzw. Stahlblech (im Empfangsraum)
- d) Fugendichtung aus Terostat (plastisch) oder Acryl (elastisch)
- e) Bedämpfung der Fugen zwischen Prüfbjekt und Einbauöffnung mit schallabsorbierendem Schaumstoff

Um den Nischeneffekt in der Einbauöffnung zu verringern, wurden die Prüfkörper zunächst so positioniert, dass die Außenseite der Grundwand bündig mit der Vorderkante der Öffnung abschloss und das WDVS vollständig in den Senderraum vorstand. Die offenen Seitenflächen des WDVS wurden dabei mit Holzplatten abgedeckt. Hierbei zeigte sich jedoch, dass die zwischen dem WDVS und der seitlichen Abdeckung verbleibenden Fugen infolge von Hohlraumresonanzen starke Verzerrungen der Schalldämmkurve hervorriefen.

Deshalb wurde stattdessen die in Abb. 15 dargestellte Einbausituation gewählt, bei der die Rückseite der Grundwand bündig mit der hinteren Kante der Einbauöffnung im Empfangsraum verlief. Je nach Dämmstoffdicke verschwand das WDVS in der Einbauöffnung oder stand ein Stück weit (maximal 100 mm) in den Senderraum vor. Im letztgenannten Fall wurde der Überstand seitlich mit ca. 100 mm breiten schallabsorbierenden Schaumstoffstreifen ummantelt, die anschließend mit einer geschlossenen Abdeckung aus Gipskartonplatten verkleidet wurden. Durch diese Einbauweise wurden zwar unerwünschte akustische Nebeneffekte durch seitliche Anregung des WDVS vermieden, es mussten jedoch je nach Dämmstoffdicke unterschiedlich starke Einflüsse des Nischeneffekts in Kauf genommen werden. Gemäß früheren Untersuchungen [37] beschränkten sich diese Einflüsse im vorliegenden Fall glücklicherweise auf maximal etwa 0,5 dB, so dass die Beeinträchtigung der Schalldämm-Messungen durch den Nischeneffekt in einem vertretbaren Rahmen blieb.



Abb. 16 Einbauöffnung des Fensterprüfstands während der Montage eines Prüfobjekts (vom Senderraum her gesehen).

Links: Ausfüllen der Fugen zwischen Prüfobjekt und Einbauöffnung mit schallabsorbierendem Schaumstoff.

Rechts: Versiegelung der Fugen mit Dichtleisten aus Gipskarton und Terostat.

6.2 Grundwände

Die durchgeführten Schalldämm-Messungen erfolgten an vier verschiedenen Grundwänden: einer Betonwand, zwei Wänden aus Hochlochziegeln und einer Holzständer-

wand. Die meisten Messungen fanden an der Betonwand statt. Daher wurden hierfür vier baugleiche Stahlbetonplatten eingesetzt, so dass zeitgleich jeweils mehrere Prüfbjekte hergestellt werden konnten. Der Aufbau der verwendeten Grundwände ist in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

6.2.1 Stahlbetonplatten

Als monolithische (d. h. akustisch neutrale) Grundwand wurden vier baugleiche Stahlbetonplatten mit den Maßen $b \times h \times d = 1,20 \text{ m} \times 1,45 \text{ m} \times 0,13 \text{ m}$ verwendet, die in einem Betonwerk für das Forschungsvorhaben hergestellt wurden. Trotz der baugleichen Ausführung bestanden zwischen den Platten kleine Unterschiede, die auch in ihren akustischen Eigenschaften zum Ausdruck kamen. Die entsprechenden Angaben sind Tab. 3 und Abb. 17 zu entnehmen:

Platte Nr.	flächenbez. Masse m'' [kg/m ²]	bew. Schalldämm-Maß R_w [dB]
1	315	55,9
2	310	53,1
3	314	53,9
4	315	54,9

Tab. 3: Flächenbezogene Masse und bewertetes Schalldämm-Maß der vier verwendeten Stahlbetonplatten.

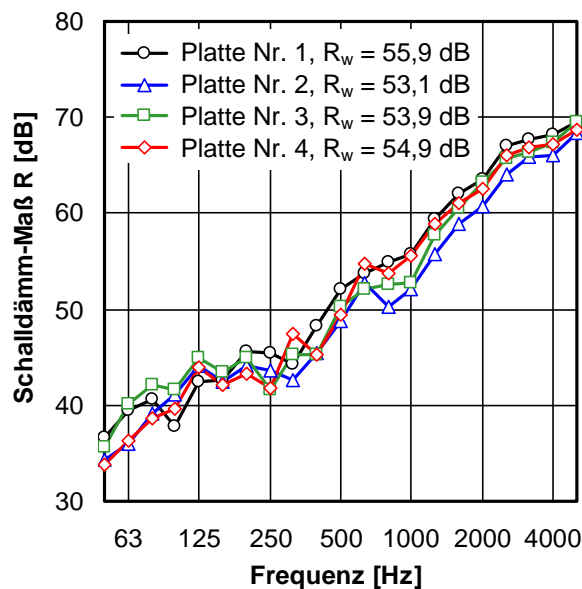


Abb. 17: Schalldämm-Maß der vier verwendeten Stahlbetonplatten in Abhängigkeit von der Frequenz. Die bewerteten Schalldämm-Maße sind in der Legende angegeben. Der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ liegt zwischen -3,9 dB und -5,4 dB.

Die gemessene Schalldämmung entspricht im Mittel recht gut dem nach der aktuellen Massekurve in DIN 4109-32 [38] zu erwartenden Wert in Höhe von $R_w = 54,9$ dB. Bei den weiteren Untersuchungen (Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS) wurden die Betonplatten jeweils individuell betrachtet. Die Unterschiede zwischen den Platten hatten somit keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

6.2.2 Wände aus Hochlochziegeln

Für das Forschungsvorhaben wurden zwei verschiedene Wände aus bauüblichen Hochlochziegeln betrachtet. Der eine Ziegel hatte eine Breite von 300 mm (Abmessungen $l \times b \times h = 247 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 249 \text{ mm}$, Steinmasse 12,7 kg), der andere hatte eine Breite von 365 mm (Abmessungen $l \times b \times h = 247 \text{ mm} \times 365 \text{ mm} \times 249 \text{ mm}$, Steinmasse 16,5 kg). Die Lochbilder der beiden Steine sind in Abb. 18 dargestellt.

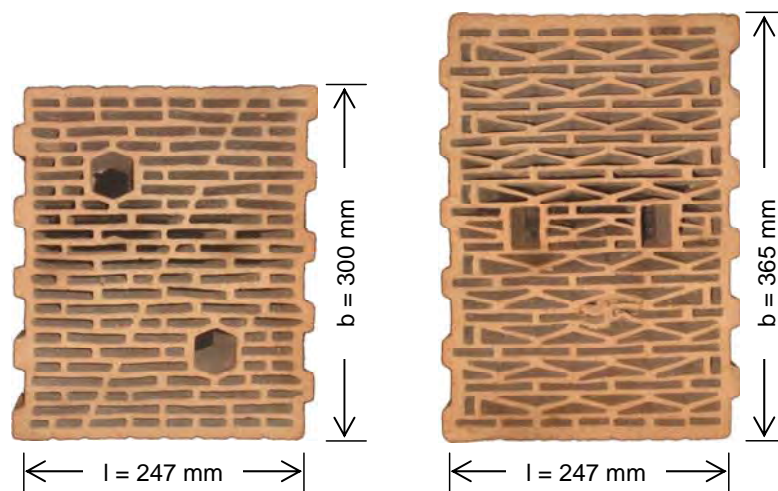


Abb. 18 Lochbild und Maße der beiden für das Forschungsvorhaben verwendeten Hochlochziegel.

Abgesehen von den verwendeten Ziegeln waren beide Wände gleich aufgebaut:

Innenputz: 20 mm Gipsputz MP 75, Rohdichte ca. 1100 kg/m^3 ,

Mauerwerk: Planziegel-Mauerwerk, Lagerfugen mit deckelndem Dünnbettmörtel, Stoßfugen unvermörtelt,

Außenputz 20 mm Kalk-Zementputz, Rohdichte ca. 1400 kg/m^3 .

Der flächenbezogene Masse der aus 300 mm breiten Ziegeln aufgebauten Wand betrug 277 kg/m^2 , die Wand aus den 365 mm breiten Steinen hatte eine Masse von 328 kg/m^2 . Wie aus den in Abb. 19 dargestellten Messwerten hervorgeht, weisen beide Wände den für viele Hochlochziegel typischen Einbruch in der Schalldämmkurve auf, wobei der Einbruch bei der Wand mit der größeren Steinbreite erwartungsgemäß etwa eine Terz tiefer erfolgt. Das bewertete Schalldämm-Maß der beiden Wände beträgt $R_{w,300 \text{ mm}} = 44,2 \text{ dB}$ und $R_{w,365 \text{ mm}} = 45,8 \text{ dB}$ und liegt damit um 9,1 dB bzw. 9,7 dB unter dem Wert, der nach der Massekurve aus DIN 4109-32 für eine gleich schwere Vollsteinwand zu erwarten wäre.

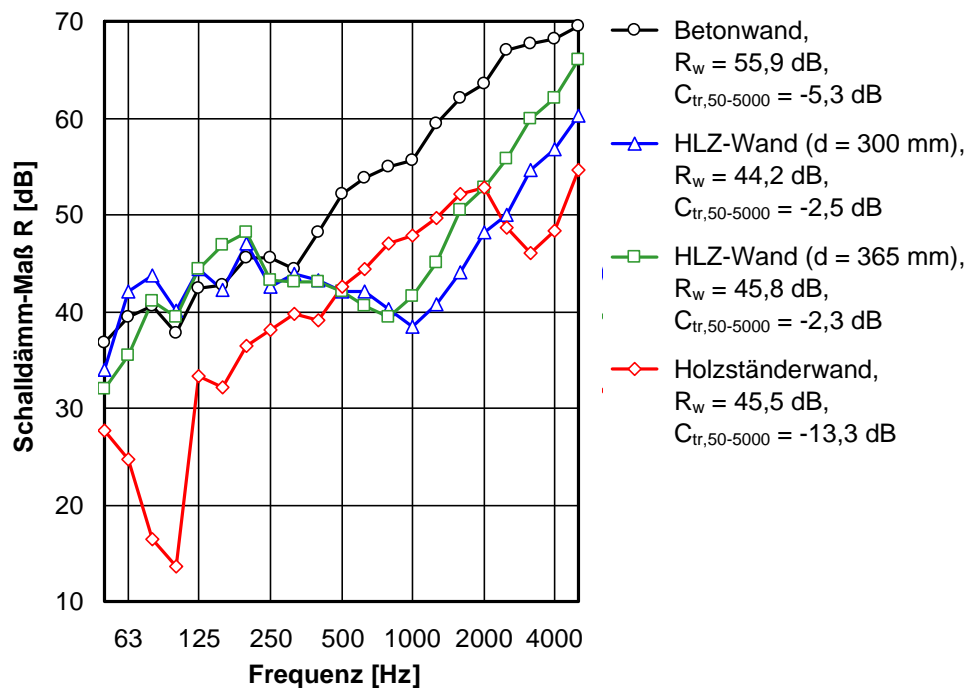


Abb. 19: Schalldämmung der beiden Grundwände aus Hochlochziegeln und der untersuchten Holzständerwand in Abhängigkeit von der Frequenz. Zum Vergleich sind außerdem die Werte für eine der verwendeten Stahlbetonplatten (Platte Nr. 1) mit eingezeichnet. Die bewerteten Schalldämm-Maße und die Spektrum-Anpassungswerte $C_{tr,50-5000}$ sind in der Legende angegeben.

6.2.3 Holzständerwand

Für die Holzständerwand wurde eine praxisübliche Konstruktionsweise gewählt, wie sie im Holz- und Fertigtbau in ähnlicher Form häufig zu finden ist. Die Wand bestand aus einem Rahmenwerk aus Kanthölzern (Querschnitt $b \times d = 60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$), das auf der Innenseite über eine doppelte Beplankung aus 12,5 mm dicken Gipskartonplatten verfügte und auf der Außenseite mit Spanplatten beplankt war. Die flächenbezogene Masse der Gesamtkonstruktion lag bei $m''_{\text{Wand}} = 39 \text{ kg/m}^2$. Aufbau und technische Daten der Wand sind in Abb. 20 dargestellt.

Die Schalldämmung von Ständerwänden wird durch unterschiedliche akustische Effekte bestimmt, die sich im Verlauf der Schalldämmkurve bemerkbar machen. Die wichtigsten dieser Effekte sind:

- Doppelwandresonanz mit der inneren und äußeren Beplankung als Massen und dem dazwischen liegenden Luftspalt als Feder. Die Resonanzfrequenz lässt sich nach Gl. (4) berechnen, wobei für m''_p und m''_w die flächenbezogenen Massen der Beplankung einzusetzen sind. Zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit des Luftspalts (mit eingestellten schallabsorbierenden Mineralwolle-Platten) kann der Ausdruck $s' \cong 0,111 \text{ MN/m}^2 / d$ herangezogen werden, wobei d die Breite des Spalts bezeichnet.

- Koinzidenzeffekt der Beplankungsplatten. Die Koinzidenzfrequenz ergibt sich aus der Beziehung

$$f_g = \frac{c^2}{2\pi d} \sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E_{\text{dyn}}}}, \quad (10)$$

wobei $c \cong 340$ m/s die Schallgeschwindigkeit in Luft, d die Plattendicke, μ die Poissonzahl und ρ sowie E_{dyn} die Dichte und den dynamischen Elastizitätsmodul des Plattenwerkstoffs bezeichnen.

- Eigenschwingungen der im Rahmenwerk eingespannten Beplankungsplatten. Für den vereinfachten Fall drehbar gelagerter Plattenränder gilt der Ausdruck

$$f_{n_x, n_y} = \frac{c^2}{4f_g} \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 \right] \quad \text{mit } n_x, n_y = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Neben den Plattenabmessungen l_x und l_y hängt die obige Beziehung lediglich von der Schallgeschwindigkeit und der Koinzidenzfrequenz ab. Praktische Bedeutung hat vor allem die Grundschwingung $f_{1,1}$.

Die mit den obigen Formeln für die untersuchte Holzständerwand berechneten Frequenzen sind in Tab. 4 zusammengestellt. Die Schalldämmung der Wand ist aus Abb. 19 ersichtlich.

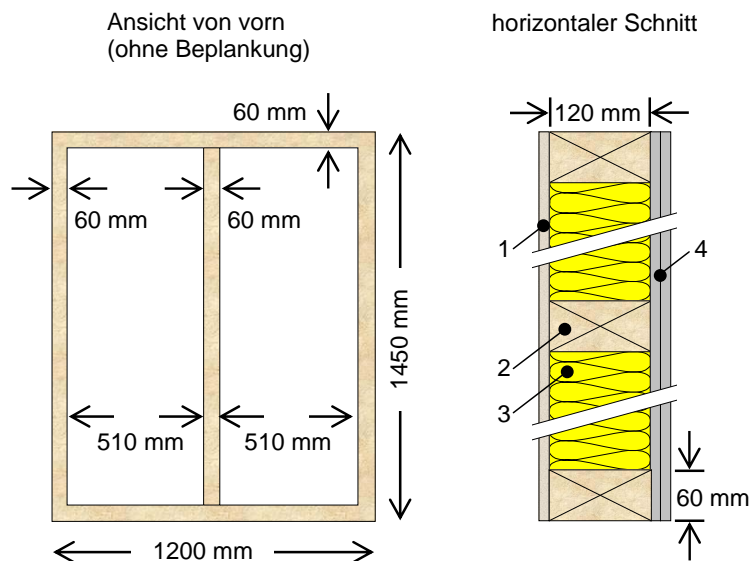


Abb. 20 Aufbau der verwendeten Holzständerwand (Ansicht und horizontaler Schnitt).

- 1) äußere Beplankung aus Spanplatten ($d = 13$ mm, $m'' = 8,6$ kg/m²)
- 2) Kantholz, Querschnitt $b \times d = 60$ mm \times 120 mm
- 3) Mineralwolle, $d = 2 \times 60$ mm (Trennwandplatte Isover Akustic TP1, längenbez. Strömungswiderstand $r \geq 5$ kNs/m⁴, lose eingestellt)
- 4) innere Beplankung aus 2 \times 12,5 mm GKB-Platten, $m'' = 2 \times 8,7$ kg/m²

Vergleicht man die Tab. 4 aufgeführten Frequenzen mit der gemessenen Schalldämmkurve in Abb. 19, so lassen sich die Doppelschalenresonanz und die Koinzidenzfrequenz der Innenschale im Kurvenverlauf deutlich identifizieren (auch wenn die Frequenzen wegen der vereinfachten Berechnung natürlich nicht genau übereinstimmen). Die übrigen Resonanzen sind nicht sichtbar, weil sie zu schwach sind oder von stärkeren Effekten überlagert werden. Obgleich sich das bewertete Schalldämm-Maß der Ständerwand nur wenig von den beiden HLZ-Wänden unterscheidet, weist die Schalldämmkurve einen völlig anderen Verlauf auf. Typisch für Ständerwände ist vor allem die geringe Schalldämmung im Bereich niedriger Frequenzen.

Bezeichnung	Frequenz [Hz]
Doppelschalenresonanz	$f_0 = 65$ Hz
Koinzidenz Außenschale	$f_g = 1800$ Hz
Koinzidenz Innenschale	$f_g = 2300$ Hz
Grundschiwingung Außenschale	$f_{1,1} = 70$ Hz
Grundschiwingung Innenschale	$f_{1,1} = 55$ Hz

Tab. 4: Charakteristische Frequenzen der untersuchten Ständerwand (Außenschale Spanplatte, Innenschale Gipskarton). Die Grundschiwingungen der Beplankungsplatten wurden nach Gl. (11) für drehbar gelagerte Plattenränder bestimmt. Erfolgt die Rechnung stattdessen für fest eingespannte Ränder (die tatsächliche Randeinspannung dürfte ein Zwischenzustand sein), so erhält man Frequenzen, die etwa um den Faktor 2 höher liegen [39].

6.3 Wärmedämm-Verbundsysteme

Um die erforderliche Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wurden alle Aufbauten aus den gleichen Dämmplatten hergestellt, die vom selben Hersteller und aus derselben Produktionscharge bezogen wurden. Es handelte sich um bauübliche Platten aus Polystyrol (EPS) mit einer Dicke von 100 mm, einer Rohdichte von ca. 20 kg/m^3 und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Das Lieferformat der Platten betrug $500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$. Zur weiteren Verwendung wurden die Platten auf die Größe der in Abb. 13 dargestellten Schablone ($400 \text{ mm} \times 725 \text{ mm}$) zugeschnitten, die so bemessen war, dass jeweils sechs Platten ohne Lücken oder Überstand auf den verwendeten Prüfkörpern Platz fanden.

Zur Herstellung von Dämmsystemen mit einer Dicke von mehr als 100 mm wurden mehrere EPS-Platten aufeinander geklebt (bis zu maximal vier Lagen). Die Verklebung erfolgte vollflächig mit einem elastischen Dispersionskleber, der mit sehr geringer Schichtdicke (maximal ca. 0,5 mm) auf die Platten aufgetragen wurde. Hierdurch war gewährleistet, dass eine vollflächige kraftschlüssige Verbindung zwischen den Platten bestand, ohne dass Veränderungen der mechanischen Eigenschaften eintraten. Die geringe Gewichtszunahme durch die Klebstoffmasse (maximal ca. $0,5 \text{ kg/m}^2$) ist für akustischen Eigenschaften der untersuchten WDVS ohne Bedeutung.

Alle durchgeführten Untersuchungen beschränkten sich auf unverdübelte Systeme. Da Dübel Körperschallbrücken zwischen Putzschicht und Grundwand erzeugen und so die Masse-Feder-Resonanz abschwächen, hängt ihr akustischer Einfluss - abgesehen von der Resonanzfrequenz und der inneren Dämpfung - nur in geringem Maße vom Aufbau des Dämmsystems ab. Erfahrungsgemäß ist deshalb davon auszugehen, dass die in dem Berechnungsmodell enthaltenen Korrekturwerte für Dübel auch bei Veränderung des Aufbaus (also z. B. bei Erhöhung der Dämmstoffdicke) weitgehend konstant bleiben.

6.3.1 Herstellung und Aufbau

Zur Herstellung des WDVS wurde zunächst mittels der in Abb. 13 dargestellten Schablone eine 8 mm dicke Schicht aus Klebemörtel (kunstharzvergüteter Pulverkleber, Dichte ca. 1400 kg/m^3) auf die Dämmplatten aufgebracht. Nach dem Entfernen der Schablone (siehe Abb. 14) wurden die Platten an die Grundwand angedrückt, wodurch sich eine teilflächige Verklebung mit einheitlicher Geometrie und einem Klebeflächenanteil von ca. 40 % ergab. Das Verputzen des WDVS erfolgte mit Putzschienen, die an der äußeren Kanten der Dämmplatten angebracht wurden. Mit Hilfe dieser Schienen konnte die Putzschicht nach Einbetten des Armierungsgewebes unter Verwendung eines Glättscheits auf eine konstante Dicke von 8 mm abgezogen werden, was einer flächenbezogenen Masse von ca. 11 kg/m^2 entspricht. Das Verputzen erfolgte mit dem gleichen Mörtel, der auch bei der Verklebung mit der Grundwand Verwendung fand. Neben den Dämmstoffplatten wurden selbstverständlich auch bei allen anderen Bestandteilen des WDVS (Klebstoff, Armierung und Putz) für alle Versuchsaufbauten immer die gleichen Produkte eingesetzt.

Ein Beispiel für ein WDVS mit einer Dämmstoffdicke von 200 mm ist in Abb. 21 zu sehen. Neben einlagigen WDVS wurden außerdem auch zweilagige Systeme untersucht, bei denen auf das erste WDVS noch ein weiteres Dämmsystem geklebt wurde (siehe Abb. 22). Bei der Holzständerwand erfolgte die Befestigung des WDVS, wie in der baulichen Praxis üblich, statt durch teilflächige Verklebung mittels einer vollflächigen Klebstoffschicht. Die Einzelheiten hierzu sind der Beschreibung zu Abb. 23 zu entnehmen.



Abb. 21: Wärmedämm-Verbundsystem mit 200 mm Dämmstoffdicke auf einer Stahlbetonplatte (Seitenansicht). Die Dämmschicht bestand aus zwei aufeinander

geklebten Polystyrolplatten. Links im Bild an der äußeren Kante der Dämmschicht sind die Putzschienen zu erkennen, mit deren Hilfe eine einheitliche Putzdicke von 8 mm realisiert wurde.



Abb. 22: Zweilagiges Wärmedämm-Verbundsystem mit 2 x 100 mm Dämmstoffdicke auf einer Stahlbetonplatte (Seitenansicht). Zur Herstellung dieses Aufbaus wurde auf die Betonplatte zunächst ein WDVS mit einer Dicke von 100 mm geklebt. Auf diesem WDVS wurde dann auf gleiche Weise ein zweites System befestigt.



Abb. 23: Wärmedämm-Verbundsystem mit 100 mm Dämmstoffdicke auf der Holzständerwand. Im Unterschied zu den Massivwänden wurde die Dämmplatte in praxisüblicher Weise vollflächig mit der Außenschale der Wand (Spanplatte) verklebt. Die Auftragung des hierzu verwendeten Dispersionsklebers erfolgte mit der Zahntraufel. Die Dicke der Klebeschicht betrug ca. 4 mm.

6.3.2 Dynamische Steifigkeit

Die dynamische Steifigkeit der verwendeten Dämmstoffplatten stellt eine der wichtigsten akustischen Kenngrößen für WDVS dar, da sie zusammen mit der flächenbezogenen Masse der Putzschicht gemäß Gl. (5) die Resonanzfrequenz des Systems bestimmt. Statt der dynamischen Steifigkeit s' kann selbstverständlich ebenso gut der dynamische

Elastizitätsmodul des Dämmstoffs E_{dyn} herangezogen werden, der über die Beziehung $s' = E_{\text{dyn}} / d$ (mit d = Dämmstoffdicke) direkt mit der dynamischen Steifigkeit verknüpft ist.

Leider stehen in der Praxis oft keine geeigneten Angaben zur dynamischen Steifigkeit von Dämmplatten zu Verfügung, da die Hersteller in den Produktunterlagen entweder gar keine oder - wegen der vorhandenen Produktstreuung - nur unzuverlässige Werte hierzu nennen. Die Vorherberechnung der Schalldämmung ist in solchen Fällen mit großer Unsicherheit verbunden. In dem vorliegenden Forschungsvorhaben, in dem gemessene und berechnete Schalldämm-Maße verglichen werden sollen, sind zuverlässige Werte der dynamischen Steifigkeit als maßgebende Berechnungsgrundlage natürlich besonders wichtig. Aus diesem Grund wurde die dynamische Steifigkeit durch eigene Messungen bestimmt, wobei zwei verschiedene Verfahren eingesetzt wurden.

Standardmäßig wird zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit von Dämmstoffen das Messverfahren nach DIN EN 29052-1 [11] verwendet. Hierbei wird die geprüfte Dämmstoffplatte auf eine ebene starre Unterlage gelegt und mit einer genormten Auflage beschwert. Die Auflage besteht aus einer 25 mm dicken Stahlplatte mit einer flächenbezogenen Masse von $m'' \cong 200 \text{ kg/m}^2$. (Die hohe Masse erklärt sich daraus, dass das Messverfahren eigentlich zur Untersuchung von Trittschalldämmstoffen unter schwimmenden Estrichen vorgesehen ist und diese Dämmstoffe teilweise hohen statischen Lasten ausgesetzt sind.) Der beschriebene Aufbau bildet ein schwingungsfähiges Masse-Feder-System mit der Stahlplatte als Masse und der Dämmstoffplatte als Feder. Das System wird mit einem an der Stahlplatte angebrachten Erreger in Schwingung versetzt und die Resonanzkurve mit einem Sinus-Sweep mit hoher Frequenzauflösung durchfahren. Aus der ermittelten Resonanzfrequenz, die sich aus der Lage des Schwingungsmaximums ergibt, kann dann nach Gl. (5) die dynamische Steifigkeit der Dämmstoffplatte bestimmt werden.

Da die Konstruktion von Wärmedämm-Verbundsystemen dem Messaufbau nach DIN EN 29052-1 im Grunde sehr stark ähnelt (statt der Stahlplatte besteht die schwingende Masse hier lediglich aus einer Putzschicht), können die an den untersuchten WDVS durchgeführten Schalldämm-Messungen gleichfalls zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit herangezogen werden. Statt aus dem Schwingungsmaximum wird die Resonanzfrequenz hier aus dem Minimum der Schalldämmkurve ermittelt. Die Berechnung der dynamischen Steifigkeit erfolgt dann wiederum nach Gl. (5). Natürlich ist dieses Verfahren weniger genau als die Messungen nach DIN EN 29052-1, da Schalldämm-Messungen üblicherweise mit verhältnismäßig geringer Frequenzauflösung in Terzbändern erfolgen. Andererseits bringt eine erhöhte Frequenzauflösung gemäß Abb. 24 in der Praxis nur verhältnismäßig geringe Vorteile, da hierdurch zwar die Strukturen der Schalldämmkurve genauer sichtbar werden, das stark erhöhte Rauschen aber gleichzeitig die Interpretation der Daten erschwert.

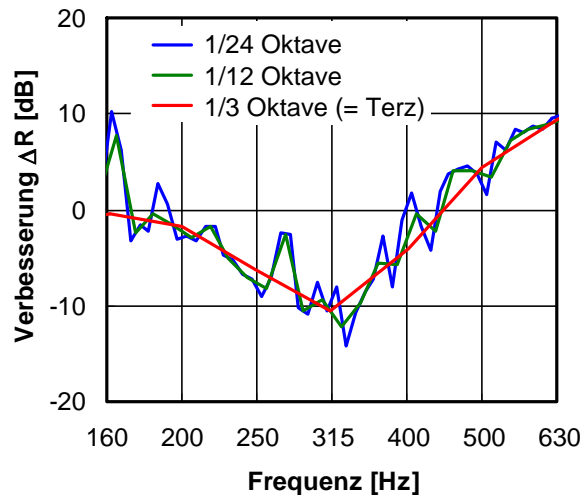


Abb. 24: Verbesserung der Schalldämmung durch ein WDVS bei Messung mit unterschiedlicher Frequenzauflösung (zwischen 1/24 Oktave und 1/3 Oktave). Dargestellt ist der Frequenzbereich in der Umgebung der Resonanz (Minimum im Kurvenverlauf bei ca. 315 Hz).

Wichtiger als eine hohe Frequenzauflösung ist es, zur Ermittlung der Resonanzfrequenz statt der gemessenen Schalldämmkurve die Verbesserung der Schalldämmung (Differenz der Schalldämm-Maße mit und ohne WDVS) heranzuziehen. Der Grund hierfür besteht darin, dass sich die Schalldämmung des Gesamtsystems additiv aus den Beiträgen der Grundwand und des WDVS zusammensetzt, wobei das WDVS das eigentliche Resonanzsystem bildet. Da jedoch auch die Schalldämmung der Grundwand von der Frequenz abhängt (sie steigt mit zunehmender Frequenz stark an), erscheint das Minimum der Schalldämmkurve gegenüber der Resonanzfrequenz des WDVS ein Stück weit in Richtung tiefer Frequenzen verschoben. In den Messergebnissen, die in den nachfolgenden Abschnitten gezeigt werden, ist dieser Effekt teilweise gut erkennbar.

Bei Beachtung der obigen Hinweise lässt sich der dynamische Elastizitätsmodul von Dämmstoffen auch aus normalen Schalldämm-Messungen an WDVS vielfach recht genau bestimmen. Im vorliegenden Fall standen hierzu vier verschiedene Messungen zur Verfügung, die an WDVS mit unterschiedlicher Dämmstoffdicke (100 mm bis 400 mm) durchgeführt wurden. Vergleicht man die aus diesen Messungen ermittelten Werte von E_{dyn} jedoch untereinander und mit dem Messergebnis nach DIN EN 29052-1, so sind erhebliche Abweichungen um mehr als den Faktor 2 festzustellen.

Die Ursache dieser Abweichungen wird klar, wenn man die ermittelten Ergebnisse über der Messfrequenz (d. h. der Resonanzfrequenz des jeweiligen Masse-Feder-Systems) aufträgt (siehe Abb. 25). Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, steigt der dynamische Elastizitätsmodul mit zunehmender Frequenz kontinuierlich an. Es handelt sich dabei um ein Verhalten, das für Kunststoffe (einschließlich geschäumter Produkte) typisch ist und in ähnlicher Form bereits aus der Literatur und eigenen Untersuchungen bekannt ist [40, 41].

Als Folgerung hieraus ergibt sich, dass Messungen nach DIN EN 29052-1 zur Charakterisierung der elastischen Eigenschaften von Dämmstoffen für WDVS - zumindest soweit es sich um Dämmstoffe aus Polystyrol und vermutlich auch Polyurethan handelt - nur bedingt geeignet sind, da die Messfrequenz, die sich aus den Vorgaben der Norm ergibt, erheblich unter der Resonanzfrequenz bauüblicher Wärmedämm-Verbundsysteme liegt. Wird die Schalldämmung von WDVS auf der Grundlage von Steifigkeitswerten berechnet, die nach DIN EN 29052-1 ermittelt wurden, so entstehen zwangsläufig Fehler, die sich in einer zu niedrigen Resonanzfrequenz äußern (bei dem hier untersuchten Polystyrol unterscheidet sich die berechnete Resonanzfrequenz von dem tatsächlichen Wert um maximal etwa den Faktor 1,5) und damit in den meisten Fällen zu einer Überschätzung der Schalldämmung führen.

Leider führt in der Praxis an der Verwendung von nach DIN EN 29052-1 ermittelten Werten kein Weg vorbei, weil - schon wegen der Ermangelung praktikabler Alternativen - nahezu alle verfügbaren Literatur-, Labor- und Herstellerangaben auf diesem Verfahren beruhen. Auch die im IBP entwickelten Prognosemodelle für die Schalldämmung von WDVS [2, 3] verwenden Werte der dynamischen Steifigkeit, die nach DIN EN 29052-1 gemessen wurden. Da es sich bei den Prognosemodellen um semiempirische Verfahren handelt, sind die Fehler in der gemessenen dynamischen Steifigkeit jedoch bereits in den Berechnungsparametern berücksichtigt, so dass die Berechnung der Schalldämmung dennoch korrekte Werte liefert. Um eine konsistente Vorgehensweise zu gewährleisten, werden deshalb auch im vorliegenden Bericht alle Berechnungen mit Steifigkeitswerten nach DIN EN 29052-1 durchgeführt. Da für alle untersuchten WDVS der gleiche Dämmstoff verwendet wurde, reicht hierzu eine einzige Angabe aus, für die sich aus den Messungen ein Wert von $E_{\text{dyn}} = 3,9 \text{ MN/m}^2$ ergibt.

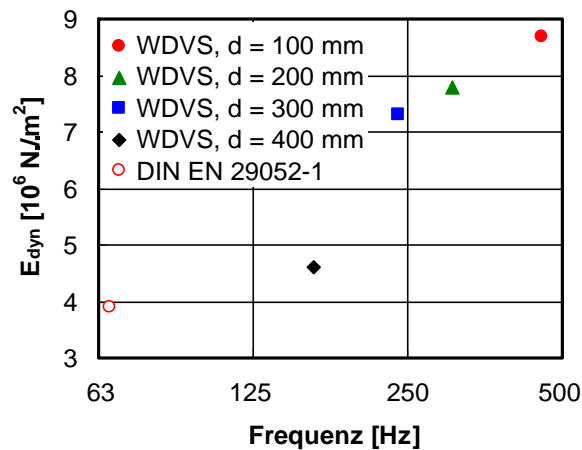


Abb. 25: Dynamischer Elastizitätsmodul des verwendeten Polystyrol-Dämmstoffs in Abhängigkeit von der Messfrequenz (die Messfrequenz entspricht der Resonanzfrequenz des jeweiligen Schwingungssystems). Neben normgerechten Messungen nach DIN EN 29052-1 wurden zur Bestimmung von E_{dyn} außerdem Schalldämm-Messungen an vier verschiedenen WDVS mit Dämmstoffdicken zwischen 100 mm und 400 mm herangezogen.

6.4 Voruntersuchungen

Um die akustische Eignung des verwendeten Versuchsaufbaus und die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der ermittelten Messergebnisse zu überprüfen, wurden mehrere Voruntersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden kurz beschrieben werden. Als zentrale Aussage ist festzuhalten, dass alle durchgeführten Voruntersuchungen zufriedenstellende Ergebnisse erbrachten.

Grenzdämmung

Um zu überprüfen, ob der für die Messungen verwendete Fensterprüfstand eine genügend hohe Grenzdämmung aufweist, um die Schalldämmung der untersuchten Konstruktionen mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, wurde die vorhandene Grenzdämmung in Abb. 26 mit der Messkurve für des Prüfobjekt mit der höchsten gemessenen Schalldämmung verglichen.

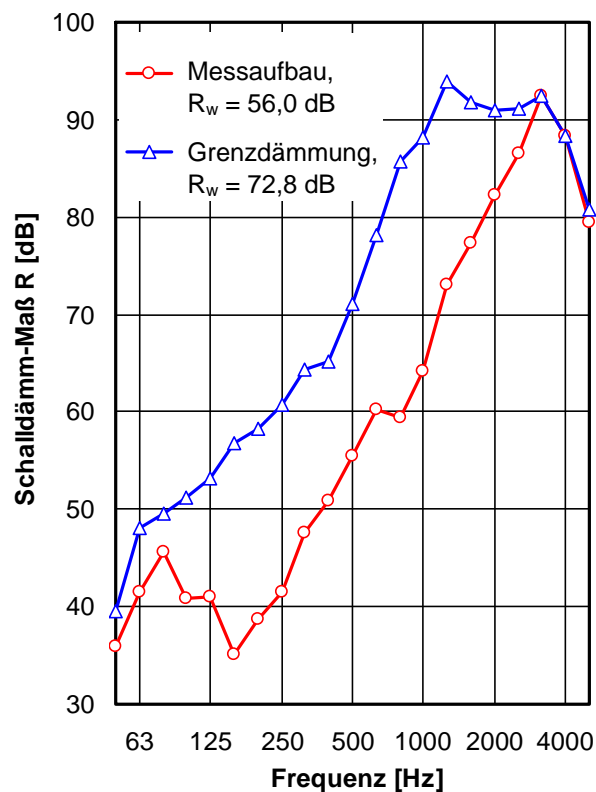


Abb. 26: Aufbau mit der höchsten gemessenen Schalldämmung (WDVS mit 400 mm Dämmstoffdicke auf Betonwand) im Vergleich zur Grenzdämmung des Fensterprüfstands.

Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, besteht im bauakustisch maßgeblichen Frequenzbereich bis etwa 2500 Hz zwischen Messkurve und Grenzdämmung ein ausreichend großer Abstand. Ab 3150 Hz sind die beiden Kurven hingegen nahezu deckungsgleich, so dass die in diesem Frequenzbereich gemessenen Werte unter der tatsächlichen Schalldämmung liegen. Auf die akustischen Einzulangaben (bewertetes Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswerte), mit denen sich der vorliegende Be-

richt vorrangig beschäftigt, hat dies jedoch keinen Einfluss, da die betroffenen Frequenzen bei der Ermittlung der Einzulangaben so gut wie keine Rolle spielen.

Vergleich von Fenster- und Wandprüfstand

Die durchgeführten Messungen erfolgten wie bereits erwähnt an verkleinerten Versuchsaufbauten mit einer Fläche von $1,45 \text{ m} \times 1,20 \text{ m} \cong 1,7 \text{ m}^2$ im Fensterprüfstand. Durch die verringerte Prüffläche ist gegenüber Wänden normaler Größe (die Einbaufläche üblicher bauakustischer Wandprüfstände beträgt ca. $10 - 12 \text{ m}^2$) mit akustischen Unterschieden zu rechnen. Um dies zu überprüfen, wurden zwei gleichartige Wände aufgemauert, die eine Fläche von $1,7 \text{ m}^2$ und $12,0 \text{ m}^2$ aufwiesen (die Wände bestanden aus 365 mm breiten, beidseitig verputzten Hochlochziegeln und hatten eine flächenbezogene Masse von etwa 360 kg/m^2). Die kleinflächige Wand wurde in den Fensterprüfstand eingebaut, die großflächige Wand in einen normalen Wandprüfstand. Die in Abb. 27 dargestellten Ergebnisse zeigen eine recht gute Übereinstimmung der Messergebnisse, die sich nur bei tiefen Frequenzen erwartungsgemäß ein wenig stärker voneinander unterscheiden. Die Werte für das bewertete Schalldämm-Maß sind nahezu identisch.

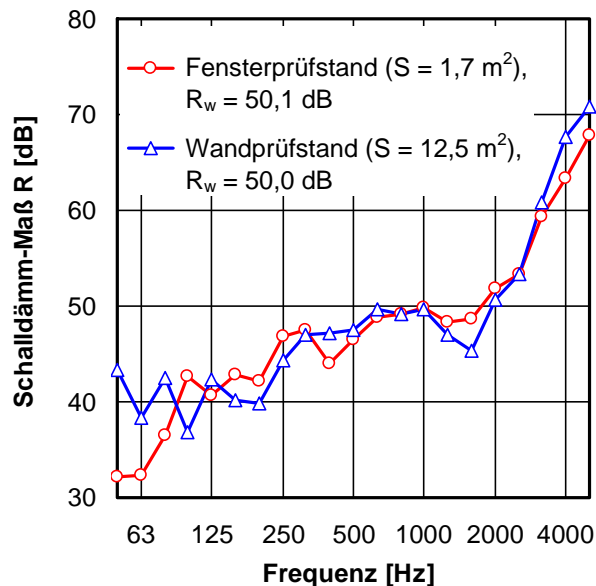


Abb. 27: Messergebnisse für gleichartige Wände aus Hochlochziegeln im Fenster- und im Wandprüfstand.

Bei der Bewertung der in Abb. 27 dargestellten Messwerte ist außerdem zu bedenken, dass sich das durchgeführte Forschungsvorhaben weniger mit der Schalldämmung der Wände, sondern vielmehr fast ausschließlich mit der Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS beschäftigt. Bei der Berechnung dieser Verbesserung heben sich die akustischen Eigenschaften der Grundwände jedoch weitgehend aus dem Ergebnis heraus, so dass zwischen klein- und großflächigen Versuchsaufbauten noch deutlich geringere Unterschiede als in Abb. 27 zu erwarten sind.

Verlustfaktor

Die Schalldämmung von Wänden wird zu einem beträchtlichen Teil von der Energieübertragung in die Flankenbauteile bestimmt. Ein Maß hierfür ist der Gesamtverlustfaktor der Konstruktion, der sich messtechnisch bestimmen lässt. Um für die Schalldämmung möglichst repräsentative Messergebnisse zu erhalten, sollte der Verlustfaktor der im Prüfstand eingebauten Wand nach Möglichkeit in etwa bauüblichen Werten entsprechen, die durch den mittleren Bauverlustfaktor $\eta_{\text{Bau,ref}}$ beschrieben werden [42, 43]. In Abb. 28 sind der an einer der verwendeten Betonplatten im Fensterprüfstand gemessene Gesamtverlustfaktor und der mittlere Bauverlustfaktor einander gegenübergestellt. Die Übereinstimmung ist ausgezeichnet, so dass davon auszugehen ist, dass für das Versuchsobjekt im Prüfstand ähnliche bauliche Randbedingungen wie in einem ausgeführten Gebäude vorhanden sind.

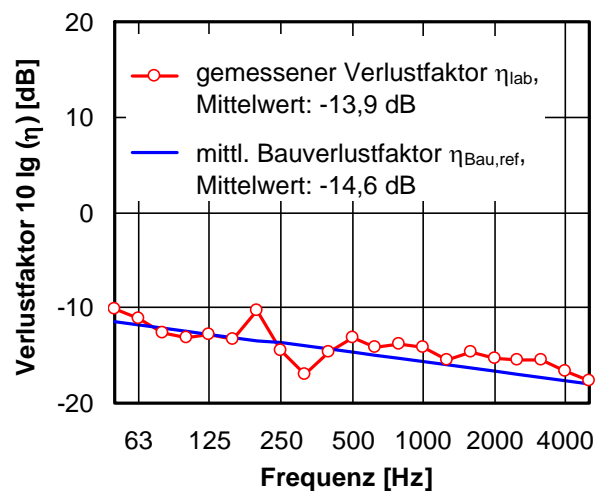


Abb. 28: Gesamtverlustfaktor einer im Fensterprüfstand eingebauten Betonplatte im Vergleich zum mittleren Bauverlustfaktor $\eta_{\text{Bau,ref}}$. Die Berechnung der in der Legende angegebenen Mittelwerte erfolgte im bauakustischen Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz.

Reproduzierbarkeit

Eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse ist unabdingbare Voraussetzung für die in dem durchgeführten Forschungsvorhaben vorgenommenen Untersuchungen. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden zwei gleichartige Versuchsaufbauten hergestellt. Sie bestanden aus zwei baugleichen WDVS mit 100 mm Dämmstoffdicke, die auf die Betonplatten Nr. 1 und 3 geklebt wurden. In Abb. 29 werden die Messergebnisse für diese beiden Aufbauten miteinander verglichen.

Im Vergleich zur üblichen Messgenauigkeit akkreditierter bauakustischer Prüfstellen ist die Übereinstimmung der dargestellten Messkurven als durchaus befriedigend zu werten. Dies gilt um so mehr, als in den Vergleich sämtliche vorhandenen Fehlerquellen - von Schwankungen der Produkteigenschaften über die Herstellung der Versuchsaufbauten und den Einbau in den Prüfstand bis hin zur Schalldämm-Messung - einfließen. Für die speziellen Anforderungen des Forschungsvorhabens würde man sich dennoch eine noch bessere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wünschen. Wie aus den in

den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Messungen (siehe z. B. Abb. 52) hervor- geht, wurde dies auch tatsächlich erreicht, nachdem die Handwerker sich an die an- fangs ungewohnte Herstellungsweise der Aufbauten gewöhnt und Übung und Erfah- rung mit der erforderlichen Vorgehensweise gesammelt hatten (die für den Vergleich in Abb. 29 verwendeten Prüfobjekte waren die beiden ersten Aufbauten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens hergestellt wurden).

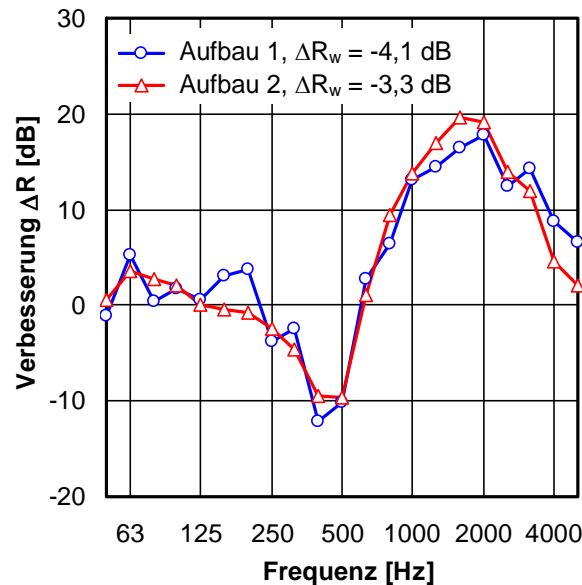


Abb. 29: Vergleich der Messergebnisse an zwei gleichartigen Versuchsaufbauten (WDVS mit 100 mm Dämmstoffdicke auf Betonwand) zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Mess- und Herstellungsbedingungen. Dargestellt ist die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS.

7 Akustische Berechnungsmodelle

Soweit es den in der Praxis weitaus häufigsten Anwendungsfall - nämlich die Anbrin- gung von WDVS auf Außenwänden in Massivbauweise - betrifft, basieren fast alle der- zeit verwendeten akustischen Berechnungsverfahren auf Forschungsarbeiten, die in den Jahren 2003 bis 2005 im IBP durchgeführt wurden [2, 3]. Die zugrundeliegenden Mo- delle haben halbempirischen Charakter und stützen sich auf eine umfangreiche Daten- basis von ca. 200 Schalldämm-Messungen. Daneben ist in DIN EN 12354-1 [44] ein a- nalytisches Prognoseverfahren beschrieben, das für alle Arten von Vorsatzschalen und damit natürlich auch für WDVS, die ja bekanntlich eine spezielle Art von Vorsatzkon- struktion darstellen, anwendbar ist. Da das Verfahren nach DIN EN 12354-1 jedoch e- her auf Vorsatzschalen mit akustischem Anwendungsbereich zugeschnitten ist und die konstruktiven Besonderheiten von außenseitigen thermischen Dämmsystemen unbe- rücksichtigt lässt, weist es in Verbindung mit WDVS eine verringerte Genauigkeit auf und wird deshalb hier nicht näher betrachtet. Einzelheiten zu diesem Verfahren sind z. B. einem Forschungsbericht des IBP aus dem Jahr 2009 [45] zu entnehmen.

Der Vollständigkeit halber sei außerdem ein vereinfachtes Prognoseverfahren für WDVS erwähnt, das neu in den kürzlich erschienenen Entwurf zur Aktualisierung von EN 12354-1 [46] aufgenommen wurde. Dieses Verfahren beruht gleichfalls auf den Vorarbeiten des IBP, wurde aber gegenüber dem Originalmodell erheblich vereinfacht und gestrafft. Da das vereinfachte Verfahren Gegenstand eines eigenständigen derzeit im IBP bearbeiteten Forschungsvorhabens ist, wird hier ebenfalls nicht weiter darauf eingegangen.

Mit den bislang vorhandenen und in den IBP-Berichten B-BA 6/2002 und B-BA 4/2005 [2, 3] beschriebenen Prognoseverfahren lassen sich neben der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, ΔR_w , außerdem auch $\Delta(R_w + C)$ und $\Delta(R_w + C_{tr})$ - jeweils für den Frequenzbereich von 100 Hz bis 5000 Hz - berechnen. Die beiden letztgenannten Angaben werden in der Praxis jedoch nur selten verwendet, weshalb sie bei den nachfolgenden Betrachtungen weitgehend unberücksichtigt bleiben. Die Untersuchungen konzentrieren sich stattdessen auf die Verbesserung $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$, die neben ΔR_w den bei weitem wichtigsten akustischen Kennwert für die Schallschutzwirkung von Außenbauteilen darstellt.

In den beiden nachfolgenden Abschnitten dieses Berichts werden das vorhandene Berechnungsverfahren für ΔR_w und das im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens neu entwickelte Modell für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ näher beschrieben. Die Entwicklung des neuen Modells erfolgte semiempirisch auf einer angepassten und aktualisierten Datenbasis von insgesamt etwa 130 Messungen. Die Darstellung der Berechnungsformeln und -tabellen orientiert sich an der Präsentation in der Technischen Systeminfo 7 des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. [47].

7.1 Verfahren zur Bestimmung von ΔR_w

7.1.1 Grundprinzip

Das bewertete Schalldämm-Maß einer Massivwand mit WDVS lässt sich gemäß

$$R_w = R_{w,o} + \Delta R_w \quad (12)$$

bestimmen, wobei $R_{w,o}$ die Schalldämmung der Grundwand ohne WDVS und ΔR_w die Verbesserung durch das WDVS bezeichnen.

Die Berechnung von ΔR_w ist nachfolgend beschrieben. Als Grundlage dient die für standardisierte bauliche Bedingungen ermittelte Verbesserung $\Delta R_{w,S}$, von der verschiedene Korrekturen zur Berücksichtigung abweichender Bedingungen subtrahiert werden. Die zentrale Berechnungsformel lautet:

$$\Delta R_w = \Delta R_{w,S} - K_D - K_K - K_T - K_S \quad (13)$$

mit $\Delta R_{w,S}$ = Verbesserung unter Standardbedingungen (unverdünelt, 40 % Klebefläche, Grundwand mit $R_{w,o} = 53$ dB),

K_D = Korrektur zur Berücksichtigung von Dübeln,

K_K = Korrektur zur Berücksichtigung der Klebefläche,

- K_T = Korrektur für die Schalldämmung der Grundwand (da die Grundwand häufig auch als Trägerwand bezeichnet wird, wird hier der Index T verwendet),
- K_S = Korrektur zur Berücksichtigung des Strömungswiderstandes bei Mineralfaser-Dämmstoffen.

Die Bestimmung der in der obigen Gleichung enthaltenen Größen ist in den nachfolgenden Abschnitten 7.1.4 bis 7.1.8 erläutert. Zur Durchführung der Berechnungen werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

- Resonanzfrequenz f_R (kann nach Abschnitt 7.1.2 aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht und der flächenbezogenen Masse der Putzschicht berechnet werden),
- bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand $R_{w,o}$ (die Ermittlung von $R_{w,o}$ aus der flächenbezogenen Masse ist in Abschnitt 7.1.3 beschrieben),
- Befestigung des WDVS mit Dübeln (verdübelt oder unverdübelt, die Anzahl der Dübel geht nicht in die Berechnung ein),
- prozentuale Klebefläche F ,
- längenbezogener Strömungswiderstand r (nur bei Mineralfaser-Dämmung).

Die verwendeten Formeln und Symbole entsprechen dem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bei Zulassungen verwendeten Berechnungsmodell [48]. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass das DIBt bei der Berechnung von $\Delta R_{w,s}$ ein Vorhaltemaß von 3 dB anwendet und die ermittelte Verbesserung auf den Bereich von -6 dB $\leq \Delta R_w \leq 16$ dB begrenzt.

7.1.2 Resonanzfrequenz f_R

Die Resonanzfrequenz f_R ist die wichtigste akustische Einflussgröße bei WDVS und für die Berechnung der akustischen Eigenschaften unverzichtbar. Die Resonanzfrequenz wird normalerweise rechnerisch aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht s' und der flächenbezogenen Masse der Putzschicht m''_p berechnet. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind Gl. (4) und Gl. (5) in Abschnitt 5.2 zu entnehmen.

Angaben zum dynamischen Elastizitätsmodul üblicher Dämmstoffe sind in Abschnitt 5.1 aufgeführt. Der Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz und dynamischer Steifigkeit der Dämmschicht ist in Abb. 30 für einige bauübliche Putzschichten grafisch veranschaulicht:

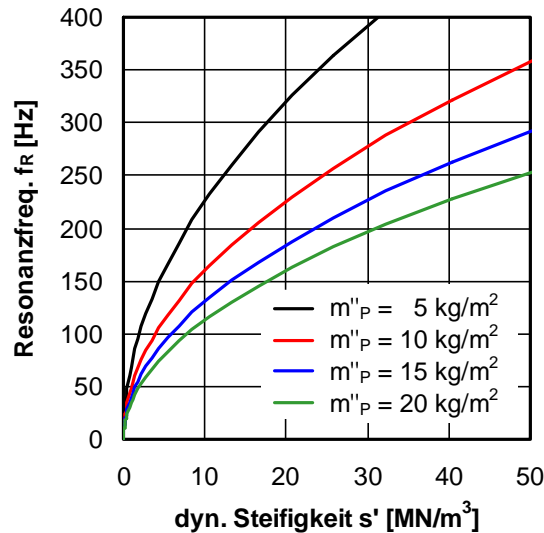


Abb. 30: Resonanzfrequenz von WDVS in Abhängigkeit von der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht. Die Berechnung erfolgte für Putzschichten mit flächenbezogenen Massen zwischen $m''_p = 5 \text{ kg/m}^2$ und $m''_p = 20 \text{ kg/m}^2$.

7.1.3 Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS $R_{w,o}$

Wärmedämm-Verbundsysteme werden zumeist an massiven Außenwänden aus Beton oder Mauerwerk angebracht. Das bewertete Schalldämm-Maß derartiger Wände hängt vor allem von ihrer flächenbezogenen Masse ab. Den entsprechenden Zusammenhang bezeichnet man als Massekurve. Für die akustischen Berechnungen an WDVS wird das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS, $R_{w,o}$, benötigt, für das sich aus DIN 4109 Bbl. 1 und 3 [49, 50] näherungsweise folgende Massekurve ableiten lässt (die flächenbezogene Masse ist hierbei wie üblich in kg/m^2 einzusetzen):

$$R_{w,o} \cong [27,1 + 0,1243 m'' - 0,000113 m''^2] \text{ dB.} \quad (14)$$

Die Beziehung gilt für schwere Baustoffe wie z. B. Beton, Kalksandstein oder Ziegel, wobei der Anwendungsbereich flächenbezogene Massen von etwa $100 \text{ kg/m}^2 \leq m'' \leq 500 \text{ kg/m}^2$ umfasst. Für den Nachweis von Schallschutzanforderungen ist von dem berechneten Wert nach DIN 4109 ein Vorhaltemaß von 2 dB zu subtrahieren. Es sei darauf hingewiesen, dass Mauerwerk aus gelochten Steinen wegen seiner besonderen akustischen Eigenschaften nicht mit der angegebenen Massekurve berechnet werden kann. Für leichte Baustoffe, wie Poren- oder Leichtbeton, liegt die Schalldämmung gegenüber dem berechneten Wert im Mittel etwa 2 dB höher. Der durch die obige Gleichung beschriebene Zusammenhang ist in Abb. 31 grafisch dargestellt.

Alternativ zu G. (14) kann zur Berechnung von $R_{w,o}$ auch die aktualisierte Massekurve aus dem Entwurf zur neuen DIN 4109 herangezogen werden [38]. Diese Kurve ist zwar strenggenommen bauaufsichtlich noch nicht eingeführt, beruht aber auf einem aktualisierten Datenbestand. Die entsprechende Berechnungsformel lautet:

$$R_{w,o} = [30,9 \lg(m'') - 22,2] \text{ dB.} \quad (15)$$

Vergleicht man die nach Gl. (14) (aktuelle Fassung DIN 4109) und nach Gl. (15) (Entwurf neue DIN 4109) berechneten Werte, so ist festzustellen, dass Gl. (15) bei Wänden mit niedriger flächenbezogener Masse etwas höhere Schalldämm-Maße liefert (Differenz maximal 1,8 dB). Für Wände mit einer flächenbezogenen Masse von $m'' \geq 270 \text{ kg/m}^2$ sind hingegen kaum noch Unterschiede vorhanden (Differenz maximal 0,5 dB).

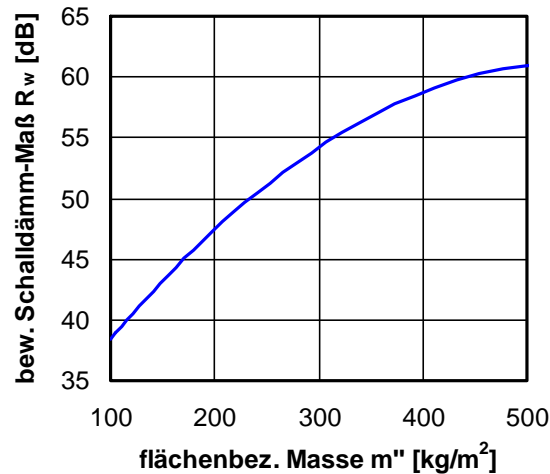


Abb. 31: Schalldämmung massiver Wände in Abhängigkeit von ihrer flächenbezogenen Masse nach Gl. (14). Aufgetragen ist das bewertete Schalldämm-Maß ohne Flankenübertragung, R_w .

Für die Spektrum-Anpassungswerte von Massivwänden sind leider keine Massekurven verfügbar. Für den für Verkehrslärm maßgeblichen Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ lässt sich jedoch näherungsweise folgender Zusammenhang herleiten:

$$C_{tr,50-5000} \cong 5,8 \text{ dB} - 0,21 R_w, \quad (16)$$

wobei R_w das bewertete Schalldämm-Maß der Wand bezeichnet.

In Tab. 5 sind die mit obiger Gleichung berechneten Werte für den für Außenwände üblichen Bereich der Schalldämmung beispielhaft dargestellt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, weist der Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ durchgängig negative Werte auf, deren Betrag mit zunehmender Schalldämmung kontinuierlich anwächst.

R _w [dB]	C _{tr,50-5000} [dB]
35,0	-1,6
40,0	-2,6
45,0	-3,7
50,0	-4,7
55,0	-5,8
60,0	-6,8

Tab. 5: Zusammenhang zwischen dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w und dem Spektrum-Anpassungswert C_{tr,50-5000}. Die Berechnung von C_{tr,50-5000} erfolgte mit der Näherungsformel in Gl. (16).

7.1.4 Verbesserung unter Standardbedingungen ΔR_{w,S}

Die Verbesserung unter Standardbedingungen, ΔR_{w,S}, bezieht sich auf ein fiktives WDVS, das mit 40 % Klebeflächenanteil ohne Dübel an einer Grundwand mit R_{w,o} = 53 dB angebracht ist. Die Berechnungsformel für ΔR_{w,S} lautet:

$$\Delta R_{w,S} = (a \lg(f_R) + b) \text{ dB}, \quad (17)$$

wobei f_R die Resonanzfrequenz des WDVS bezeichnet. Die Koeffizienten a und b hängen von der Lage der Resonanzfrequenz sowie der Art des Dämmstoffs (Polystyrol oder Mineralfaser) ab und sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Resonanzfrequenz f _R	Polystyrol		Mineralfaser	
	a	b	a	b
f _R < 125 Hz	-35,1	79,7	-35,9	82,4
125 Hz ≤ f _R < 250 Hz	-26,7	62,0	-36,5	83,7
f _R ≥ 250 Hz	-2,4	3,8	5,4	-16,7

Tab. 6: Koeffizienten a und b zur Berechnung von ΔR_{w,S} mittels Gl. (17).

7.1.5 Korrektur für Dübel K_D

Bei der Korrektur zur Berücksichtigung des akustischen Einflusses von Dübeln, K_D, wird zwischen der Befestigung des WDVS mit und ohne Dübeln unterschieden. Die Anzahl der Dübel (vier Dübel je Quadratmeter sind Normal- und Mindestwert) spielt hingegen eine untergeordnete Rolle. Die Berechnung von K_D erfolgt gemäß

$$K_D = \begin{cases} 0 & \text{ohne Dübel,} \\ 0,34 \Delta R_{w,S} + 0,4 \text{ dB} & \text{mit Dübeln.} \end{cases} \quad (18)$$

7.1.6 Korrektur für die Klebefläche K_K

Die Verklebung von WDVS mit der Grundwand erfolgt zumeist nicht voll- sondern nur teilflächig. Der prozentuale Anteil der Klebefläche wirkt sich auf die akustische Eigenschaften aus und wird durch die Korrektur K_K berücksichtigt:

$$K_K = (0,052 F - 2,1) \text{ dB.} \quad (19)$$

Hierbei bezeichnet F die prozentuale Klebefläche in %.

7.1.7 Korrektur für die Grundwand K_T

Die Korrektur zur Berücksichtigung des akustischen Einflusses der Grundwand, K_T , hängt zum einen von der Resonanzfrequenz f_R und zum anderen vom bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS, $R_{w,o}$, ab:

$$K_T = (-1,4 \lg(f_R) + 3,6) (R_{w,o} - 53 \text{ dB}). \quad (20)$$

Die Resonanzfrequenz ist hierbei wie üblich in Hz in die Gleichung einzusetzen.

7.1.8 Korrektur für den Strömungswiderstand K_S

Die Korrektur für den Strömungswiderstand K_S erfolgt ausschließlich bei Mineralfaser-Dämmstoffen. Hierbei ist zwischen Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP) und Mineralfaser-Lamellenplatten (MFL) zu unterscheiden. Bei den Putzträgerplatten verläuft die Faserrichtung parallel zur Plattenoberfläche, während sie bei den Lamellenplatten senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist. Dies hat eine höhere dynamische Steifigkeit und andersartige akustische Eigenschaften der Lamellenplatten zur Folge. Die Berechnungsformel für K_S lautet:

$$K_S = \begin{cases} (-0,11 r + 3,8) \text{ dB} & \text{für MFP-Systeme,} \\ (-0,38 r + 9,8) \text{ dB} & \text{für MFL-Systeme,} \end{cases} \quad (21)$$

wobei r den längenbezogenen Strömungswiderstand in kPa s/m^2 bezeichnet.

7.2 Verfahren zur Bestimmung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$

7.2.1 Grundprinzip

Da $R_w + C_{tr,50-5000}$ beim Schallschutz von Außenbauteilen weit besser mit dem menschlichen Hörempfinden korreliert, als dies beim bewerteten Schalldämm-Maß R_w alleine der Fall ist, wird im Folgenden eine Berechnungsmethode für $R_w + C_{tr,50-5000}$ vorgestellt. Das Grundprinzip ist in beiden Fällen gleich: der Wert von $R_w + C_{tr,50-5000}$ für eine Wand mit WDVS ergibt sich aus dem Wert der ungedämmten Wand, $(R_w + C_{tr,50-5000})_o$, zuzüglich der Verbesserung durch das WDVS:

$$R_w + C_{tr,50-5000} = (R_w + C_{tr,50-5000})_o + \Delta(R_w + C_{tr,50-5000}) \quad (22)$$

Sofern keine Messdaten vorliegen, kann $(R_w + C_{tr,50-5000})_o$ nach dem in Abschnitt 7.1.3 beschriebenen Verfahren rechnerisch ermittelt werden.

Die Berechnung der Verbesserung $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erfolgt ein wenig anders als bei ΔR_w . Zunächst wird gemäß

$$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_u = \Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s - K'_K - K'_T - K'_S \quad (23)$$

die Verbesserung ohne Dübel berechnet (der Index u bezeichnet hierbei das unverdübeltete WDVS). Beim Vorhandensein von Dübeln wird $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_u$ gemäß Abschnitt 7.2.6 rechnerisch an die veränderten Bedingungen angepasst. Der Ausdruck $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s$ in der obigen Gleichung bezeichnet analog zu Abschnitt 7.1.1 die Verbesserung unter Standardbedingungen. Gleiches gilt für die Korrekturen K'_K , K'_T und K'_S : sie haben die gleiche Bedeutung wie die Korrekturen K_K , K_T und K_S in Abschnitt 7.1.1, werden allerdings unter Verwendung anderer Koeffizienten ermittelt und weisen deshalb unterschiedliche Zahlenwerte auf.

Die Berechnung der in Gl. (23) enthaltenen Werte ist in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Dies gilt ebenso für die Berücksichtigung des akustischen Einflusses von Dübeln.

7.2.2 Verbesserung unter Standardbedingungen $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s$

Die Verbesserung unter Standardbedingungen, $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s$, bezieht sich auf ein fiktives WDVS, das mit 40 % Klebeflächenanteil ohne Dübel an einer Grundwand mit $R_{w,o} = 53$ dB angebracht ist und wird folgendermaßen berechnet:

$$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s = [(a \lg(f_R) + b) - (c \lg(f_R) + d)] \text{ dB} \quad (24)$$

Die Koeffizienten a, b, c und d hängen in unterschiedlicher Weise von der Resonanzfrequenz f_R und von der Art des Dämmstoffs ab (siehe nachfolgende Tabellen):

Resonanzfrequenz f_R	Polystyrol		Mineralfaser	
	a	b	a	b
$f_R < 125$ Hz	-38,3	81,0	-45,5	98,1
$125 \text{ Hz} \leq f_R < 250$ Hz	-16,4	35,0	-24,8	54,6
$f_R \geq 250$ Hz	6,8	-20,6	9,8	-28,4

Tab. 7: Koeffizienten a und b zur Berechnung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s$ mittels Gl. (24).

Resonanzfrequenz f_R	c	d
$f_R < 100$ Hz	-57,1	120,0
$100 \text{ Hz} \leq f_R < 160$ Hz	-24,3	54,3
$f_R \geq 160$ Hz	-2,0	5,2

Tab. 8: Koeffizienten c und d zur Berechnung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_s$ mittels Gl. (24).

7.2.3 Korrektur für die Klebefläche K'_k

Die Korrektur zur Berücksichtigung des akustischen Einflusses der Klebefläche erfolgt gemäß

$$K'_k = (0,043 F - 1,7) \text{ dB}, \quad (25)$$

wobei F die prozentuale Klebefläche in % bezeichnet.

7.2.4 Korrektur für die Grundwand K'_T

Die Berechnungsformel für die Korrektur zur Berücksichtigung des akustischen Einflusses der Grundwand, K'_T , lautet:

$$K'_T = (-1,3 \lg(f_R) + 3,4) (R_{w,o} - 53 \text{ dB}). \quad (26)$$

Hierbei bezeichnen f_R die Resonanzfrequenz in Hz und $R_{w,o}$ das bewertete Schalldämmmaß der ungedämmten Grundwand.

7.2.5 Korrektur für den Strömungswiderstand K'_s

Bei der Korrektur für den Strömungswiderstand K'_s ist zwischen Mineralfaser-Putzträgerplatten (MFP) und Mineralfaser-Lamellenplatten (MFL) zu unterscheiden (bei WDVS aus Polystyrol ist $K_s = 0$ zu setzen). In die nachfolgende Gleichung zur Bestimmung von K'_s ist der längenbezogene Strömungswiderstand r in kPa s/m^2 einzusetzen:

$$K'_s = \begin{cases} (-0,12 r + 3,7) \text{ dB} & \text{für MFP-Systeme,} \\ (-0,27 r + 6,9) & \text{für MFL-Systeme.} \end{cases} \quad (27)$$

7.2.6 $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ für verdübelte Systeme

Wird das WDVS zusätzlich mit Dübeln befestigt, so beeinflusst dies die Verbesserung der Schalldämmung. Zwischen der Verbesserung in verdübeltem und unverdübeltem Zustand (gekennzeichnet durch die Indizes v und u) besteht folgender Zusammenhang:

$$R_w + C_{tr,50-5000}{}_v = 0,54 \Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_u - 1,2 \text{ dB}. \quad (28)$$

Die Verbesserung des unverdübelten WDVS ergibt sich aus Gl. (23). Eine grafische Darstellung der obigen Gleichung ist in Abb. 32 aufgetragen:

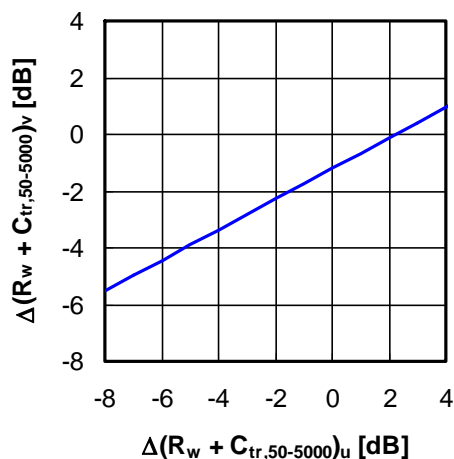


Abb. 32 Zusammenhang zwischen der Verbesserung der Schalldämmung mit und ohne Dübel, $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_v$ und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})_u$ (die Indizes v und u bezeichnen den verdübelten und den unverdübelten Zustand). Die Berechnung der Kurve erfolgte nach Gl. (28).

7.3 Berechnungsgenauigkeit

Die beiden beschriebenen Prognoseverfahren für die Schalldämmung von Massivwänden mit WDVS wurden semiempirisch auf der Grundlage eines umfangreichen Bestandes an Messdaten entwickelt (ca. 200 Messungen beim Verfahren zur Berechnung von ΔR_w und ca. 130 Messungen beim Verfahren für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$). Sie sind speziell auf WDVS ausgelegt und wurden so angepasst und optimiert, dass sich jeweils die größtmögliche Berechnungsgenauigkeit ergibt. Gegenüber vergleichbaren Modellen aus der Normung, wie z. B. in DIN EN 12354-1 [44], deren Anwendungsbereich sich gleichermaßen auf alle Arten von Vorsatzkonstruktionen erstreckt, ist das Verfahren daher deutlich zuverlässiger.

Für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch ein WDVS, ΔR_w , ergibt sich eine Berechnungsgenauigkeit von ca. ± 2 dB (Standardabweichung der Differenz zwischen Messung und Rechnung, im Mittel ist die Differenz gleich Null). Da die Schalldämmung einer Wand mit WDVS nach Gl. (12) additiv aus ΔR_w und $R_{w,o}$ (bewertetes Schalldämm-Maß der Wand ohne WDVS) gebildet wird und die Berechnungsgenauigkeit von $R_{w,o}$ ebenfalls etwa ± 2 dB beträgt, ergibt sich für die Gesamtgenauigkeit nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ein Wert von ca. ± 3 dB. Aus diesem Ergebnis erklärt sich auch das Vorhaltemaß in Höhe von 3 dB, das in dem vom DIBt für bauaufsichtliche Zulassungen herangezogenen Berechnungsverfahren enthalten ist [48]. Ansonsten stimmt das vom DIBt verwendete Verfahren (abgesehen von der Begrenzung der ermittelten Verbesserung auf den Bereich von $-6 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 16 \text{ dB}$) mit dem hier vorgestellten Prognosemodell überein.

Die obigen Aussagen zur Berechnungsgenauigkeit gelten mit geringen Unterschieden im Wesentlichen auch für das Prognoseverfahren zur Bestimmung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$. Die wichtigsten statistischen Kennwerte für die beiden Verfahren sind in Tab. 9 zu-

sammengefasst. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist in Abb. 33 (für ΔR_w) und in Abb. 34 (für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$) aufgetragen.

Statistischer Kennwert	ΔR_w [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]
Mittlere Abweichung	0,0	0,0
Standardabweichung	2,0	2,1
Maximale pos. Abweichung	5,7	4,2
Maximale neg. Abweichung	-4,4	-6,0

Tab. 9: Statistische Kennwerte der für ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ entwickelten Berechnungsmodelle. Die Angaben beziehen sich auf die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Werten.

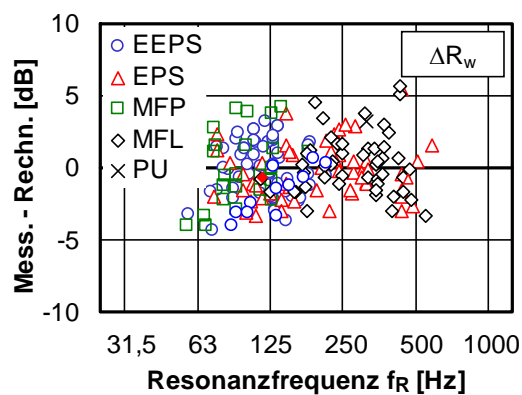


Abb. 33: Differenz zwischen Messung und Rechnung für das zur Bestimmung von ΔR_w entwickelte Berechnungsverfahren. Die verschiedenen Symbole repräsentieren unterschiedliche Arten von Dämmstoffen.

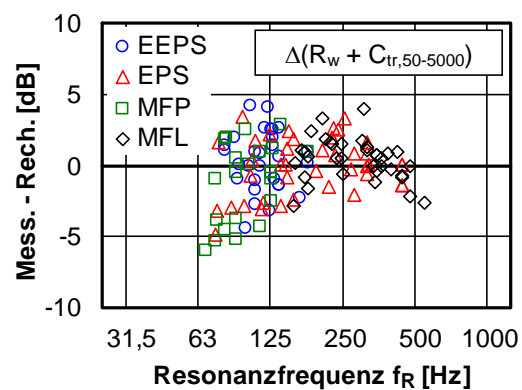


Abb. 34: Gleiche Darstellung wie in Abb. 33 für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$.

7.4 Vergleich von ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$

Wie bereits erwähnt, stellt die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes, ΔR_w , keine adäquate Beurteilungsgröße für das akustische Verhalten von WDVS dar. Zur Beschreibung der effektiv vorhandenen Schallschutzwirkung ist stattdessen $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$

5000) heranzuziehen. Es ist deshalb aufschlussreich, die beiden Beurteilungsgrößen miteinander zu vergleichen. Hierzu wurde eine große Anzahl von Messdaten aus bauakustischen Prüfständen gesammelt und ausgewertet. In Abb. 35 und der zugehörigen Tab. 10 (mit statistischen Angaben zu den in dem Bild dargestellten Daten) werden die für ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ ermittelten Werte miteinander verglichen.

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass sich für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ meist niedrigere Werte als für ΔR_w ergeben. Im Mittel beträgt die Differenz etwa 6 dB. Gleichzeitig verringern sich die Unterschiede zwischen verschiedenen WDVS (kenntlich an der in der Tabelle aufgeführten Standardabweichung) ungefähr um den Faktor 3: In Bezug auf $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ verhalten sich also alle WDVS akustisch verhältnismäßig ähnlich.

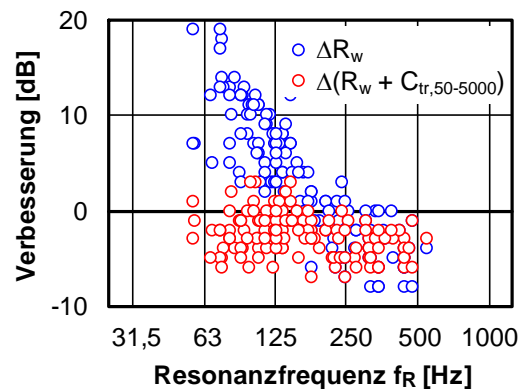


Abb. 35: Vergleich der Verbesserungen ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz. Auswertung von Messdaten für ca. 130 verschiedene Wände mit WDVS.

Statistischer Kennwert	ΔR_w [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]
Mittelwert	3,3	-2,6
Standardabweichung	6,6	2,2
Minimum	-8,0	-7,0
Maximum	19,0	3,0

Tab. 10: Statistische Auswertung der in Abb. 35 aufgetragenen Messdaten.

Weitere Erkenntnisse ergeben sich, wenn man die Daten aus Abb. 35 in etwas anderer Weise darstellt und die Differenz $\Delta R_w - \Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ berechnet (entspricht im Übrigen bis auf das Vorzeichen der Verbesserung $\Delta C_{tr,50-5000}$). Aus den in Abb. 36 dargestellten Werten ist zu entnehmen, dass der Zusammenhang zwischen ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ in starkem Maße von der Resonanzfrequenz des WDVS abhängt. Bei niedriger Resonanzfrequenz ist $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ zumeist sehr viel kleiner als ΔR_w . Dies ist auf die starken Geräuschanteile von Außenlärm bei tiefen Frequenzen zurückzuführen und sagt aus, dass eine Beurteilung auf Grundlage von ΔR_w bei WDVS mit niedriger Resonanzfrequenz eine deutliche Überschätzung der realen Schallschutzwirkung zur Folge hat. Umgekehrt verhält es sich hingegen bei WDVS mit hoher Resonanzfrequenz. Hier

ist ΔR_w - wenn auch nur geringfügig - kleiner als $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$, so dass man bei Verwendung von ΔR_w die tatsächliche akustische Wirkung des WDVS etwas unterschätzt.

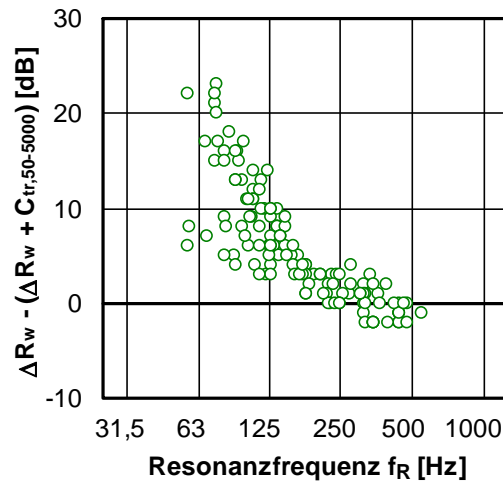


Abb. 36: Differenz zwischen ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz. Gleicher Datensatz wie in Abb. 35.

8 Untersuchungsergebnisse

8.1 WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke

Um zu untersuchen, wie sich WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften von bauüblichen Systemen unterscheiden, wurde eine Serie von Messungen durchgeführt, bei der die Dämmstoffdicke ausgehend von $d = 100$ mm schrittweise auf $d = 400$ mm erhöht wurde. Abgesehen von der Dicke der Dämmschicht waren alle untersuchten Systeme gleich aufgebaut. Als Grundwand dienten die in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Stahlbetonplatten mit einer Dicke von 13 cm. Die Verklebung zwischen WDVS und Grundwand (Schichtdicke des Klebemörtels 8 mm, Klebeflächenanteil 40 %) erfolgte mittels der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Schablone. Die Putzschicht mit einer Dicke von 8 mm hatte eine flächenbezogene Masse von 11 kg/m^2 . Als Dämmstoff wurde Polystyrol mit einer dynamischen Steifigkeit von $E_{dyn} = 3,9 \text{ MN/m}^2$ verwendet. Eine Verdübelung der Systeme erfolgte nicht. Weitere Einzelheiten zum Aufbau der Prüfkörper sind Abschnitt 6.1 zu entnehmen.

Die für die untersuchten Aufbauten gemessene Schalldämmung ist in Abb. 37, die Verbesserung der Schalldämmung der Grundwand durch das WDVS in Abb. 38 dargestellt. Tabelle 11 enthält eine Übersicht der wichtigsten Einzulangaben. Aus den Messergebnissen ist zu entnehmen, dass eine Erhöhung der Dämmstoffdicke erwartungsgemäß eine Absenkung der Resonanzfrequenz des WDVS bewirkt, wobei die Resonanzfrequenz selbst bei einer Dämmstoffdicke von 400 mm mit $f_R \cong 160 \text{ Hz}$ noch einen verhältnismäßig hohen Wert aufweist. Für das bewertete Schalldämm-Maß R_w und die Summe $(R_w + C_{tr,50-5000})$ sind mit zunehmender Dämmstoffdicke jeweils leichte Verbesserungen zu verzeichnen, die sich jedoch lediglich in der Größenordnung von etwa 3 - 4 dB bewegen.

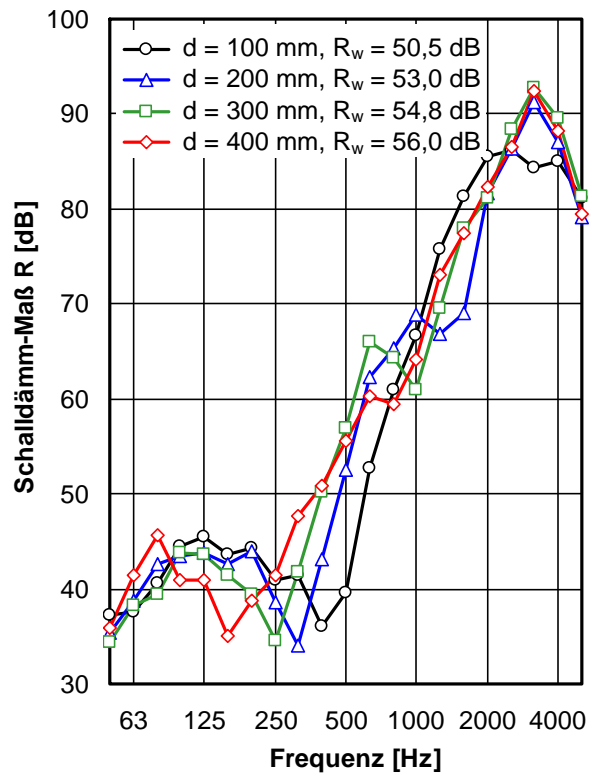


Abb. 37: Schalldämmung der vier untersuchten Messaufbauten mit einer Dämmstoffdicke zwischen 100 mm und 400 mm in Abhängigkeit von der Frequenz.

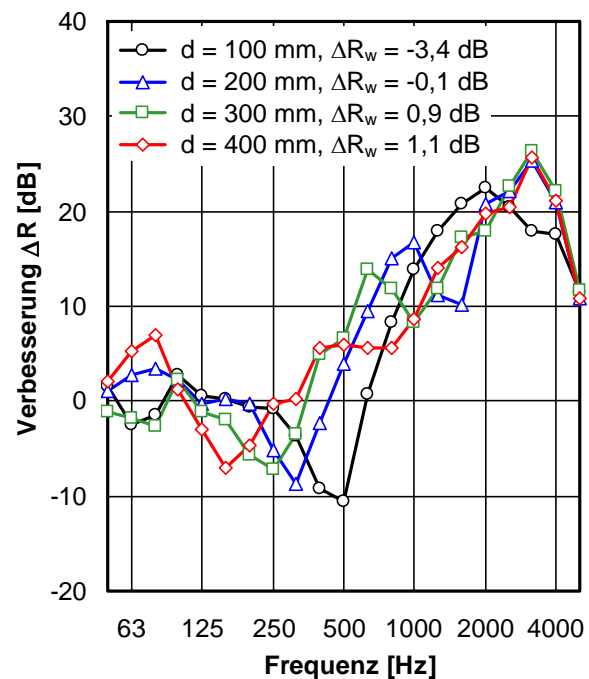


Abb. 38: Verbesserung der Schalldämmung durch das WDV_S für die vier untersuchten Systeme mit 100 mm bis 400 mm Dämmstoffdicke.

Dämmstoffdicke [mm]	ΔR_w [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]
100 mm	-3,4	-4,2
200 mm	-0,1	-2,7
300 mm	0,9	-2,7
400 mm	1,1	-1,3

Tab. 11: Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS im Hinblick auf die beiden wichtigsten bauakustischen Einzalangaben - das bewertete Schalldämm-Maß R_w und die Summe $(R_w + C_{tr,50-5000})$ - in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke des untersuchten Aufbaus.

Das akustische Verhalten aller untersuchten Systeme - einschließlich der WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke - entspricht im wesentlichen den Erwartungen und weist keine akustischen Besonderheiten auf. Für die Ausbildung stehender Wellen innerhalb der Dämmschicht, die nach Abb. 39 bei hoher Dämmstoffdicke gegebenenfalls zu erwarten wären, sind in den Messergebnissen keine Anzeichen erkennbar (bei einer Dämmstoffdicke von 400 mm ergibt sich für die Frequenz der ersten stehenden Welle rechnerisch ein Wert von etwa 1100 Hz). Es liegt daher nahe, auch bei WDVS mit hoher Dämmstoffdicke die bereits vorhandenen Berechnungsverfahren anzuwenden. Um dies zu überprüfen, wurden entsprechende Berechnungen für die untersuchten Aufbauten durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Abbildungen 40 bis 42 wiedergegeben.

Der Vergleich von Messung und Rechnung lässt auch bei Dämmschichten mit hoher Dicke keine systematischen Unterschiede erkennen. Die Abweichungen betragen maximal 2,0 dB und liegen damit innerhalb der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Berechnungsgenauigkeit. Es spricht somit nichts dagegen, die Berechnungsverfahren nach Abschnitt 7.1 und 7.2 auch für WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke anzuwenden.

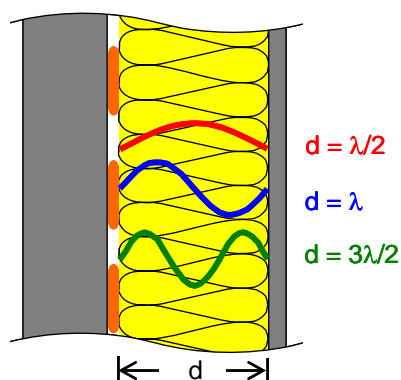


Abb. 39: Ausbildung von stehenden Wellen in der Dämmschicht von WDVS senkrecht zur Wandoberfläche. Liegt die Frequenz der Wellen im maßgebenden bauakustischen Frequenzbereich (dies ist nur bei genügend großer Dämmstoffdicke zu erwarten) und sind die Wellen stark genug ausgeprägt, kann dies die Schalldämmung beeinträchtigen.

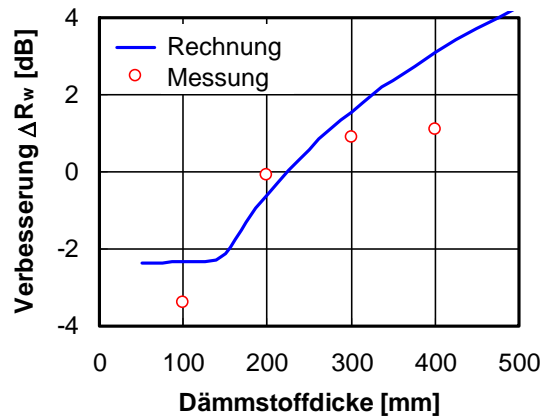


Abb. 40: Berechnungsergebnisse für die Verbesserung ΔR_w im Vergleich zu den ermittelten Messwerten für WDVS mit einer Dämmstoffdicke zwischen 100 mm und 400 mm. Die Berechnungen erfolgten mit dem in Abschnitt 7.1 beschriebenen Verfahren, das in zwei vorangehenden Forschungsvorhaben in den Jahren 2003 bis 2005 entwickelt wurde [2, 3].

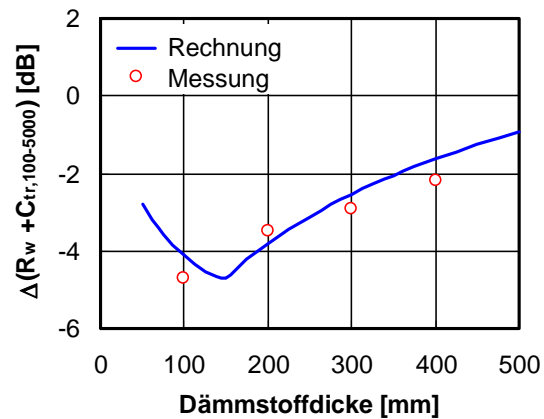


Abb. 41: Gleiche Darstellung wie in Abb. 40, jedoch für $\Delta(R_w + C_{tr,100-5000})$. Für die Berechnung wurde gleichfalls das bereits vorhandene Verfahren verwendet.

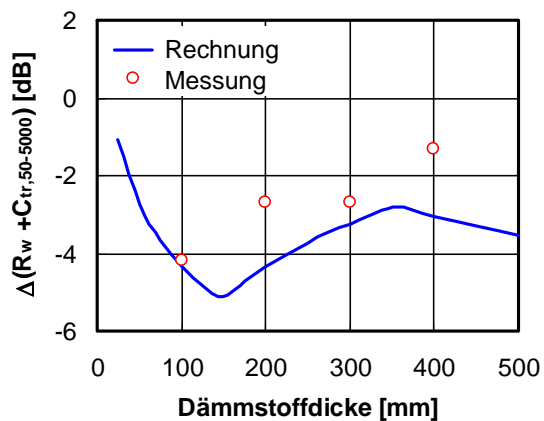


Abb. 42: Vergleich zwischen Messung und Rechnung für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$. Das verwendete Berechnungsverfahren wurde im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens neu entwickelt und ist in Abschnitt 7.2 beschrieben.

8.2 Zweilagige WDVS

Über das akustische Verhalten von zweilagigen WDVS, bei denen auf einem bereits vorhandenen WDVS noch ein weiteres System angebracht wird, gibt es bislang nur wenige Erkenntnisse. Deshalb wurden zwei derartige Systeme hergestellt und im Fensterprüfstand untersucht. Die Konstruktion der Systeme entsprach den im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Aufbauten (mit Betonplatten als Grundwand), mit dem einzigen Unterschied, dass jeweils zwei WDVS übereinander angebracht wurden. Beim ersten der beiden zweilagigen Systeme hatten beide WDVS die gleiche Dicke von jeweils 100 mm, beim zweiten System war das innere WDVS 100 mm und das äußere 200 mm dick. Die Befestigung des äußeren auf dem inneren WDVS erfolgte in gleicher Weise wie bei allen anderen Aufbauten mit Klebemörtel, wobei wiederum die in Abschnitt 6.1 beschriebene Schablone zum Einsatz kam.

Ähnlich wie im einlagigen Fall bildet auch ein zweilagiges WDVS ein schwingungsfähiges Masse-Feder-System. Im Gegensatz zu einem einlagigen WDVS ist es jedoch komplizierter aufgebaut, da es gemäß Abb. 43 aus zwei beweglichen Massen und zwei Federn besteht. Neben der Eigenschwingung, die auch bei einlagiger Dämmschicht vorhanden ist, tritt hier noch eine weitere Resonanz bei höheren Frequenzen in Erscheinung, die sich ähnlich wie die erste Eigenschwingung als Einbruch in der Schalldämmkurve äußert. Die Lage und Tiefe dieses Einbruchs bestimmt, wie stark sich die Schalldämmung von ein- und zweilagigen WDVS voneinander unterscheidet.

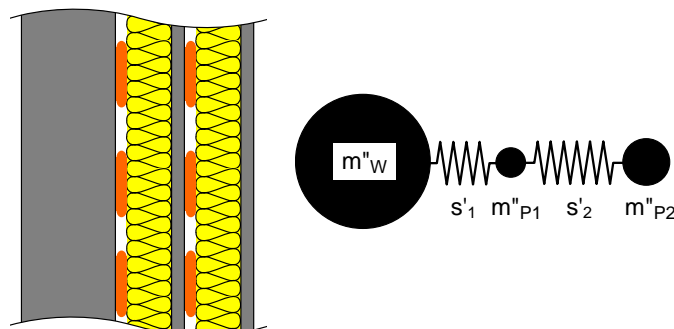


Abb. 43: Vereinfachtes akustisches Modell für ein zweilagiges WDVS. Das schwingende Masse-Feder-System besteht aus zwei Massen m''_{p1} und m''_{p2} (der Putzschicht des inneren WDVS zuzüglich Klebemörtel sowie der Putzschicht des äußeren WDVS) und zwei Federn mit den Steifigkeiten s'_1 und s'_2 (der Dämmlagen der beiden WDVS).

Besonders ausgeprägt und damit akustisch wirksam ist vor allem die erste Eigenschwingung. Ihre Frequenz entspricht in etwa der Resonanzfrequenz eines einlagigen WDVS mit gleicher Dämmstoffdicke (also des Systems, das sich ergeben würde, wenn das innere WDVS nicht verputzt wäre), liegt allerdings etwas niedriger. Die zweite Eigenschwingung hat eine bedeutend höhere Frequenz und ist schwächer ausgeprägt. Im Verlauf der Schalldämmkurve ist demnach - analog zu einlagigen Systemen - ein starker Einbruch bei tiefen Frequenzen sowie zusätzlich - bei einlagigen WDVS nicht vorhanden - ein zweiter schwächerer Einbruch bei hohen Frequenzen zu erwarten.

Oberhalb des zweiten Einbruchs setzt sich der Anstieg der Schalldämmkurve fort, wobei der Verlauf gegenüber einlagigen WDVS deutlich steiler erfolgen sollte.

Die in den Abbildungen 44 bis 47 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass der oben beschriebene Verlauf der Schalldämmkurve, wie er aufgrund des einfachen Masse-Feder-Modells zu erwarten ist, in ähnlicher Form auch in den gemessenen Schalldämmkurven zutage tritt. Zur besseren Veranschaulichung der akustischen Effekte sind in den Diagrammen neben den Messergebnissen für die zweilagigen Systeme zum Vergleich auch die Schalldämmkurven für einlagige WDVS mit gleicher Dämmstoffdicke eingezeichnet.

Die Eigenfrequenzen von zweilagigen WDVS lassen sich mit der nachfolgenden Gleichung berechnen, in der m''_1 und m''_2 die flächenbezogenen Massen der schwingenden Putz- und Mörtelschichten und s'_1 und s'_2 die dynamischen Steifigkeiten der Dämmlagen bezeichnen [51]. Der Index 1 ist dem inneren WDVS, der Index 2 analog zur Darstellung in Abb. 43 dem äußeren System zugeordnet. Die Ordnung der Eigenmode (erste oder zweite Mode) ergibt sich aus dem Vorzeichen vor der eckigen Klammer.

$$f_R = \frac{1}{2^{3/2}\pi} \left\{ \frac{s'_1}{m''_1} + \frac{s'_2}{m''_1} + \frac{s'_2}{m''_2} \pm \left[\left(\frac{s'_1}{m''_1} + \frac{s'_2}{m''_1} + \frac{s'_2}{m''_2} \right)^2 - \frac{4s'_1s'_2}{m''_1m''_2} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (29)$$

Berechnet man mit Gl. (29) die Eigenfrequenzen der untersuchten zweilagigen WDVS, so zeigt sich, dass die berechneten Werte recht gut zu den Messwerten passen. Dies gilt allerdings nur dann, wenn man den Wert der dynamischen Steifigkeit in die Gleichung einsetzt, den der Dämmstoff im Frequenzbereich der Eigenschwingungen aufweist. Verwendet man statt dessen Werte, die nach DIN EN 29052-1 ermittelt wurden, so ergeben sich zu niedrige Frequenzen, weil die dynamische Steifigkeit gemäß Abschnitt 6.3.2 mit zunehmender Frequenz anwächst.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Eigenfrequenzen besteht in der frequenzabhängigen Berechnung der Schalldämmung, für die z. B. ein Modell auf der Basis von Übertragungsmatrizen herangezogen werden kann. Ein Beispiel für eine solche Berechnung, die mit einem derartigen eindimensionalen Modell (Eigenentwicklung) durchgeführt wurde, ist in Abb. 48 dargestellt [52]. Wie der Vergleich mit der eingezeichneten Messkurve zeigt, wird die Lage der Eigenfrequenzen durch das Modell sehr gut beschrieben. Bei Tiefe und Breite der resultierenden Resonanzeinbrüche gibt es hingegen deutliche Abweichungen zwischen Messung und Rechnung, die sich auch in den unterschiedlichen Werten für das bewertete Schalldämm-Maß äußern. Da die bauliche Schallschutzplanung in der Praxis vor allem mit Einzahlangaben erfolgt, ist das verwendete Modell hierfür im Normalfall nicht geeignet. Für den Einsatz in Forschung und Entwicklung leistet es hingegen gute Dienste.

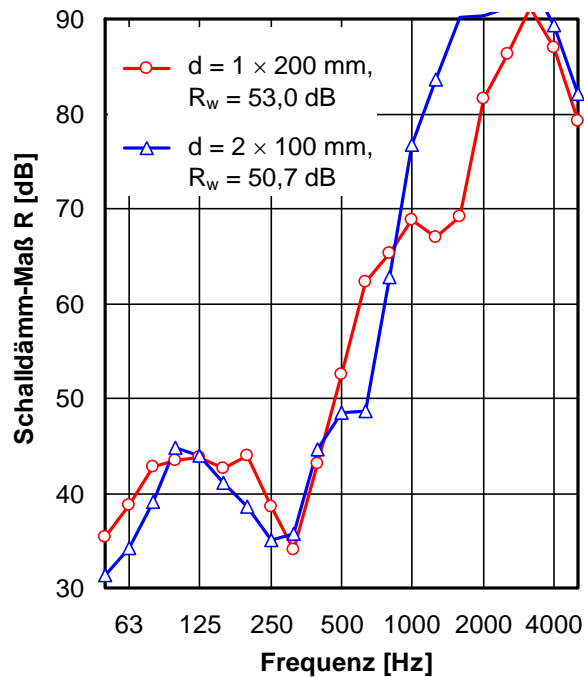


Abb. 44: Schalldämmung eines zweilagigen Dämmsystems aus zwei übereinander angebrachten WDVS mit je 100 mm Dämmstoffdicke (blaue Kurve). Die gleichfalls eingezeichnete rote Kurve wurde für ein einlagiges WDVS ermittelt, das bei ansonsten gleicher Bauweise die gleiche Gesamtdicke ($d = 200$ mm) wie das zweilagige System aufwies.

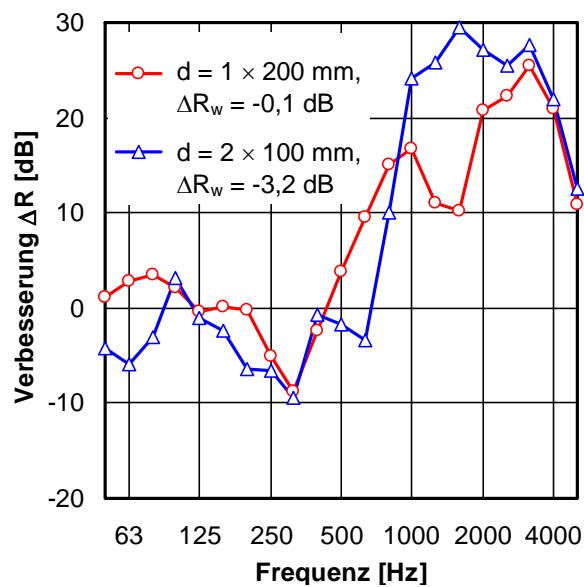


Abb. 45: Gleicher Datensatz und gleiche Darstellung wie in Abb. 44. Statt des Schalldämm-Maßes ist jedoch die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS aufgetragen.

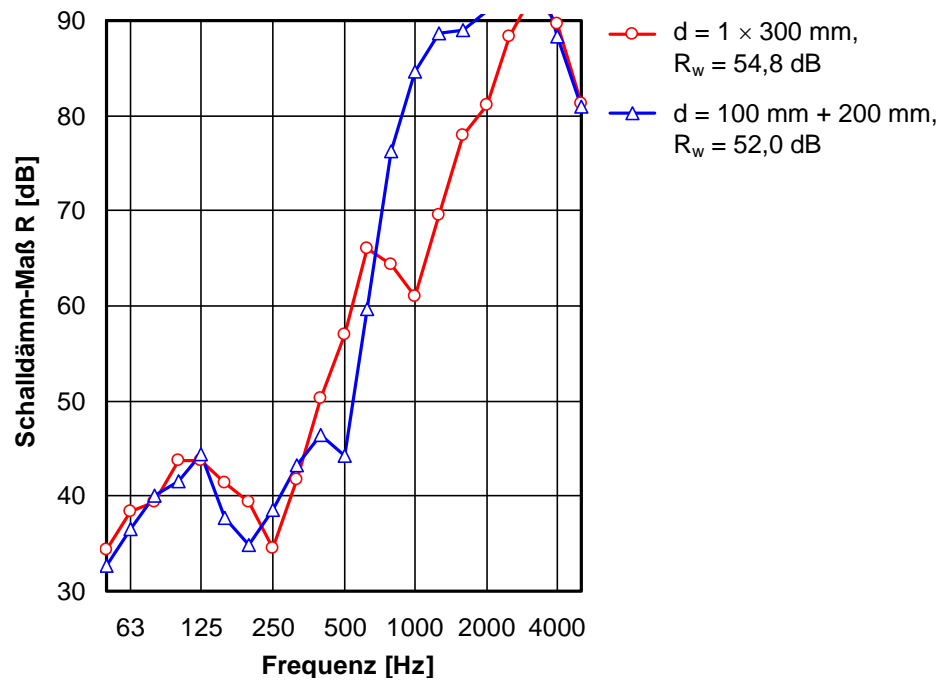


Abb. 46: Schalldämmung eines zweilagigen Dämmsystems aus zwei übereinander angebrachten WDVS (blaue Kurve). Das untere WDVS wies eine Dämmstoffdicke von 100 mm auf, das obere war 200 mm dick. Zum Vergleich ist außerdem die Messkurve für ein einlagiges WDVS mit gleicher Gesamtdicke der Dämmschicht eingezeichnet (rote Kurve).

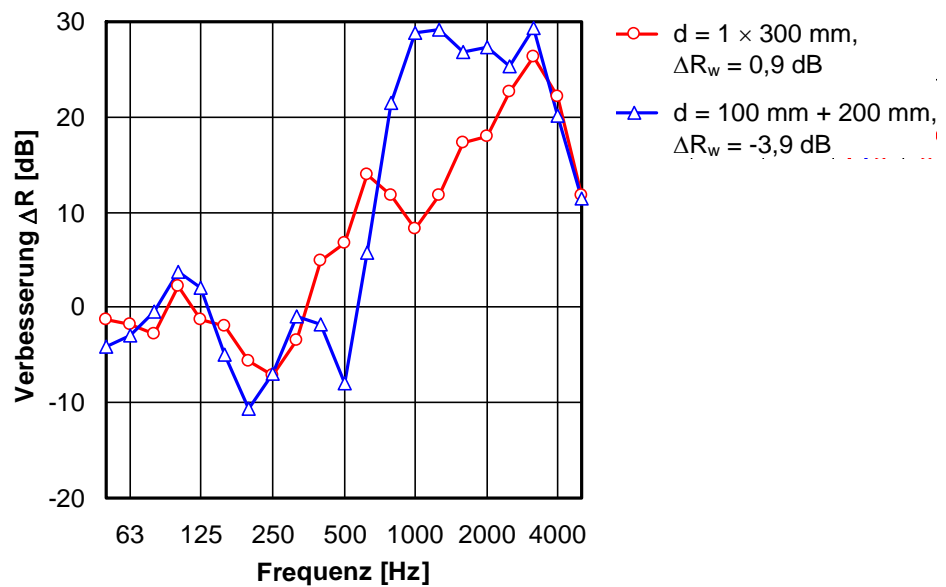


Abb. 47: Gleicher Datensatz und gleiche Darstellung wie in Abb. 46. Statt des Schalldämm-Maßes ist jedoch die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS aufgetragen.

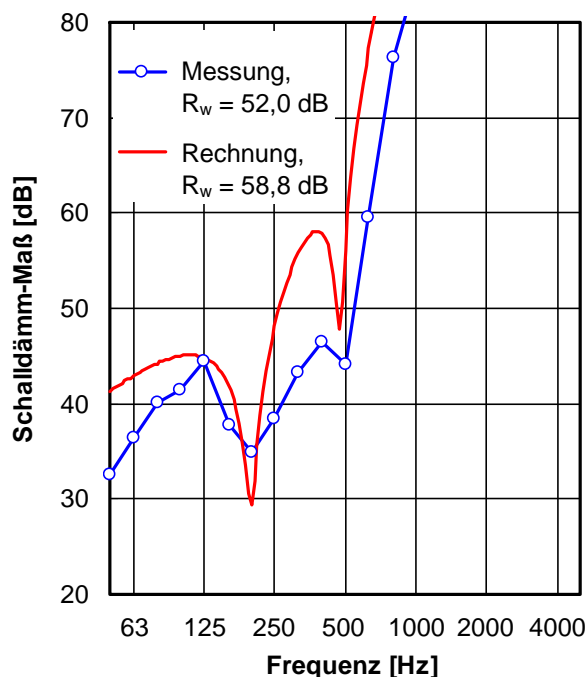


Abb. 48: Berechnete Schalldämmkurve für ein zweilagiges WDVS im Vergleich zu den zugehörigen Messwerten. Die Berechnung erfolgte mit einem eindimensionalen Modell auf der Basis von Übertragungsmatrizen [52]. Die Ergebnisse beziehen sich auf das untersuchte Dämmsystem mit 300 mm Gesamtdicke (unteres WDVS mit 100 mm Dicke, oberes WDVS 200 mm dick).

Das Schalldämm-Maß der zweilagigen WDVS liegt in einigen Frequenzbereichen (z. B. in der Umgebung der zweiten Eigenschwingung) unter der Schalldämmung der einlagigen Systeme, in anderen Bereichen (z. B. bei hohen Frequenzen) hingegen darüber. Bei der Bildung von Einzulangaben mitteln sich die Unterschiede zum großen Teil heraus. Aus der Zusammenfassung der Einzulangaben in Tab. 12 geht hervor, dass sich für die zweilagigen WDVS immer etwas niedrigere Werte ergeben. Bei ΔR_w beträgt der Unterschied im Mittel etwa 4 dB, bei $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ sind es 2 dB

Aufbau des WDVS	ΔR_w [dB]	$\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ [dB]
zweilagig, 2 x 100 mm	-3,2	-4,7
einlagig, 200 mm	-0,1	-2,7
zweilagig, 100 mm + 200 mm	-3,9	-4,7
einlagig, 300 mm	0,9	-2,7

Tab. 12: Einzulangaben zu den in den Abbildungen 44 bis 47 dargestellten Messergebnissen (Schalldämmung von zweilagigen WDVS im Vergleich zu einlagigen Systemen mit gleicher Gesamtdicke).

Da die verfügbaren Messwerte keine ausreichende Datengrundlage bilden, um ein Berechnungsmodell für die Verbesserung der Schalldämmung durch zweilagige WDVS zu entwickeln, wird stattdessen folgende pragmatische Vorgehensweise vorgeschlagen:

- 1) Die Berechnung von ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erfolgt für ein einlagiges WDVS, das abgesehen von der Putzschicht des inneren WDVS und dem darauf befindlichen Klebemörtel in seinem Aufbau exakt dem betrachteten zweilagigen System entspricht. Das heißt mit anderen Worten, die Putzschicht des inneren WDVS und der Klebemörtel zur Befestigung des äußeren WDVS bleiben bei der Berechnung der Schalldämmung unberücksichtigt. Bestehen die Dämmschichten des inneren und des äußeren WDVS aus Materialien mit unterschiedlicher dynamischer Steifigkeit, s'_1 und s'_2 , so erfolgt die Berechnung mit einer gemittelten Steifigkeit, die nach folgender Beziehung ermittelt werden kann:

$$s'_{res} = \left(\frac{1}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} \right)^{-1} \quad (30)$$

- 2) Von dem für ΔR_w berechneten Wert wird eine Korrektur von 4 dB subtrahiert. Bei $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ beträgt die Korrektur 2 dB.

Es sei erwähnt, dass Messwerte der MFPA Leipzig, die von der Knauf Gips KG für das durchgeführte Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt wurden [53], ein anderes Resultat als der vorliegende Bericht erbrachten. Bei den erwähnten Messungen, bei der zwei zweilagige WDVS mit einem gleich dicken einlagigen System verglichen wurden, erreichten die zweilagigen Aufbauten sowohl für ΔR_w als auch für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ - im genauen Gegensatz zu den oben beschriebenen Untersuchungen - um etwa 3 dB bis 4 dB höhere Schalldämm-Maße als das einlagige System. Der Grund für diese Unterschiede wird klar, wenn man sich die Resonanzfrequenzen der in Leipzig geprüften WDVS betrachtet: sie liegen für die zweischaligen Systeme mehr als eine Oktave unter dem Wert für das einschalige WDVS, obgleich sich bei Berechnung nach Gl. (29) - bei konstantem dynamische Elastizitätsmodul des Dämmstoffs - nur geringe Unterschiede ergeben dürften. Dies zeigt, dass sich die in Leipzig verwendeten EPS-Platten (wie in der Praxis leider häufig der Fall) hinsichtlich ihres dynamischen Elastizitätsmoduls offenbar erheblich voneinander unterschieden. Für die im vorliegenden Bericht durchgeführten Vergleichsuntersuchungen sind die Messungen deshalb nicht brauchbar, zumal auch in den Schalldämmkurven die für zweischalige Systeme typische Doppelresonanz, wie sie z. B. in Abb. 48 deutlich zutage tritt, nicht zu erkennen ist.

8.3 WDVS auf Lochsteinwänden

Über das akustische Verhalten von WDVS auf Lochsteinwänden ist bislang gleichfalls nur wenig bekannt. Um diese Thematik genauer zu untersuchen, wurden zwei Wände aus Hochlochziegeln errichtet, auf die anschließend WDVS aufgeklebt wurden. Der Aufbau der beiden Wände ist in Abschnitt 6.2.2 beschrieben. Das WDVS bestand in beiden Fällen aus 100 mm dicken Polystyrolplatten. Die Befestigung des WDVS an der Wand und das Aufbringen der Putzschicht (flächenbezogene Masse 11 kg/m²) erfolgte in gleicher Weise wie bei den anderen Massivwänden.

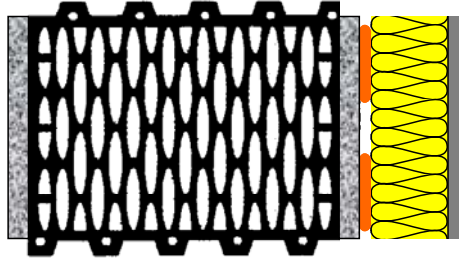


Abb. 49: Schematische Darstellung der untersuchten Wände (beidseitig verputzte Wand aus Hochlochziegeln mit aufgeklebtem WDVS).

Hinsichtlich der Anbringung von WDVS auf Lochsteinwänden stellen sich vor allem zwei Fragen:

- 1) Besteht zwischen der Resonanz des WDVS und den Eigenschwingungen der Mauersteine eine physikalische Wechselwirkung? Sollte dies der Fall sein, so ist mit deutlichen Auswirkungen auf die Schalldämmung zu rechnen.
- 2) Lassen sich bewertetes Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswerte von Lochsteinwänden mit WDVS mit den in Abschnitt 7 beschriebenen Prognoseverfahren berechnen? Selbst wenn keine Wechselwirkung zwischen dem WDVS und den Steinen besteht, ist dies keineswegs als sicher anzusehen, da die Modelle für Grundwände aus Vollsteinmauerwerk entwickelt wurden und Lochsteine gegenüber derartigen Wänden einen stark veränderten Verlauf der Schalldämmkurve aufweisen.

Aus den in den Abbildungen 49 und 50 dargestellten Messkurven, die die Schalldämmung der beiden Ziegelwände mit und ohne WDVS repräsentieren, ist die Antwort auf diese Fragen noch nicht unmittelbar zu ersehen. Es ist lediglich zu erkennen, dass das WDVS trotz der veränderten Schalldämmkurve der Grundwand akustisch scheinbar ähnlich wie auf Wänden aus ungelochten Steinen wirkt.

Betrachtet man hingegen die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS (siehe Abb. 52), so ergibt sich daraus unmittelbar die Antwort auf die erste Frage. Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, bewirken gleichartige WDVS unabhängig von der Art der Grundwand - gleichgültig ob es sich dabei um Mauerwerk aus Hochlochziegeln oder um eine Betonwand handelt - in frequenzabhängiger Darstellung die gleiche Verbesserung der Schalldämmung. Hieraus geht hervor, dass zwischen Lochsteinmauerwerk und WDVS keine Wechselwirkung erfolgt, sondern dass das Mauerwerk, ähnlich wie eine Betonplatte, lediglich ein akustisch neutrales Gegenlager für die Schwingungen des Dämmsystems bildet. Anders verhält es sich natürlich beim Einfluss von WDVS auf das bewertete Schalldämm-Maß: da hier auch der Verlauf der Schalldämmkurve eine große Rolle spielt, bewirkt das gleiche WDVS, wenn es auf verschiedenen Grundwänden angebracht wird, unterschiedlich hohe Verbesserungen. Dies wird auch durch Abb. 52 bestätigt, wenn man die in der Legende angegebenen Werte für ΔR_w miteinander vergleicht.

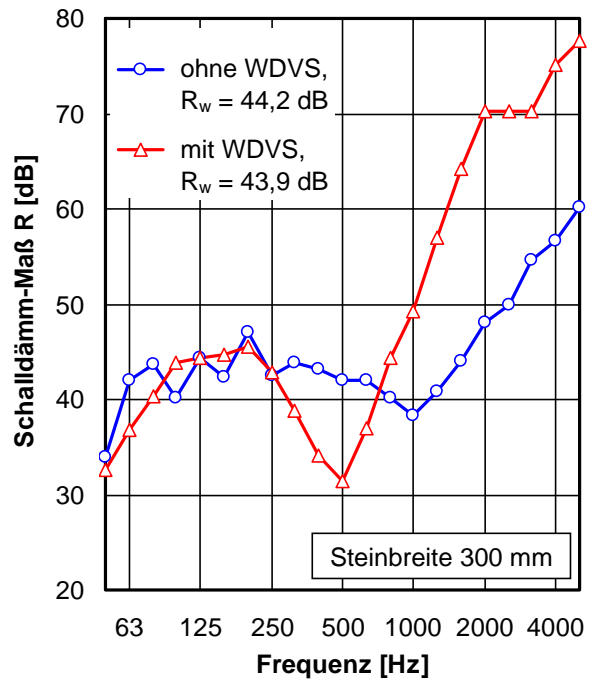


Abb. 50: Schalldämmung der Wand aus 300 mm dicken Hochlochziegeln mit und ohne WDVS.

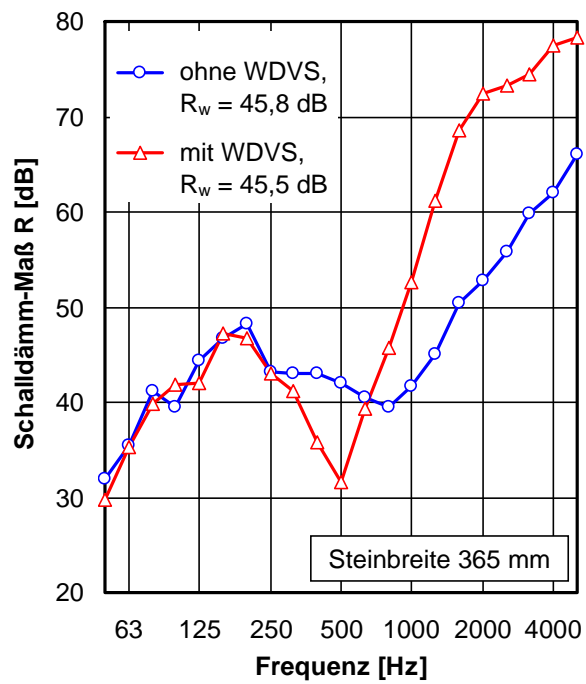


Abb. 51: Schalldämmung der Wand aus 365 mm dicken Hochlochziegeln mit und ohne WDVS.

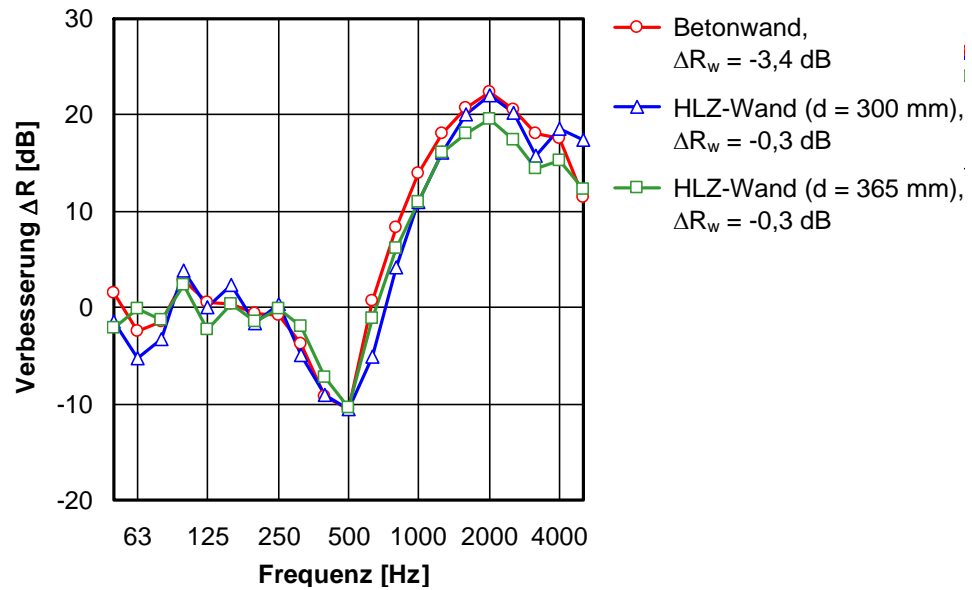


Abb. 52: Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS für die beiden untersuchten Ziegelwände und eine der in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen 13 cm dicken Stahlbetonplatten (Platte Nr. 3). Das WDVS war in allen Fällen gleich aufgebaut (100 mm dicke Polystyrolplatten mit einer Putzschicht mit einer flächenbezogenen Masse von 11 kg/m²). Die dargestellten Kurven stellen zugleich eine Bestätigung für die gute Reproduzierbarkeit der durchgeführten Messungen dar.

Zur Beantwortung der zweiten Frage - der Anwendbarkeit der vorhandenen akustischen Prognoseverfahren auf Lochsteinwände mit WDVS - wurden gemessene und berechnete Schalldämmwerte miteinander verglichen. Neben den beiden untersuchten Ziegelwänden wurden zur Verbreiterung der Datenbasis noch drei weitere Wände aus Hochlochziegeln mit in die Untersuchungen aufgenommen. Zu einer der Wände lagen Messergebnisse aus der bauakustischen Prüfstelle des IBP vor, die Angaben zu den beiden anderen Wänden wurden einer Broschüre der Sto Ges. m.b.H [28] entnommen. Leider waren die Daten zu den beiden letztgenannten Wänden nicht ganz vollständig, so dass die Verbesserung $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ hierfür nicht angegeben werden kann. Außerdem wies einer der Ziegel aufgrund seines geringen Lochflächenanteils ein akustisches Verhalten auf, das weitgehend dem einer Vollsteinwand entsprach. Mangels anderer Daten wurde jedoch auch dieser Stein mit einbezogen. Die wichtigsten Angaben zu den fünf betrachteten Wänden, die im Folgenden als HLZ 1 bis HLZ 5 bezeichnet werden, sind in Tab. 13 zusammengestellt. In Abb. 53 sind außerdem die Lochbilder der jeweiligen Steine dargestellt. Die beiden Ziegelwände, die im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens untersucht wurden, tragen die Bezeichnungen HLZ 2 (300 mm breiter Ziegel) und HLZ 3 (365 mm breiter Ziegel).

Bezeichnung		HLZ 1	HLZ 2	HLZ 3	HLZ 4	HLZ 5
Wand	Steinbreite [mm]	300	300	365	k. A.	k. A.
	m'_{Wand} [kg/m ²]	240	277	328	240	410
	R_w [dB] (ohne WDVS)	43,6	44,2	45,8	51,8	58,9
WDVS	Dämmstoff	MFP	EPS	EPS	EPS	EPS
	Dämmstoffdicke [mm]	80	100	100	200	200
	m'_{Putz} [kg/m ²]	9,6	11,0	11,0	8,0	8,0
	Resonanzfreq. f_R [Hz]	100	500	500	315	315
	Klebefläche [%]	40	40	40	40	40
	Verbesserung ΔR_w [dB]	13,5	-0,3	-1,2	-0,9	-2,5

EPS = Expandiertes Polystyrol
MFP = Mineralfaser-Putzträgerplatten

Tab. 13: Kurzbeschreibung der zur Erprobung der bestehenden akustischen Berechnungsverfahren herangezogenen HLZ-Wände mit WDVS.

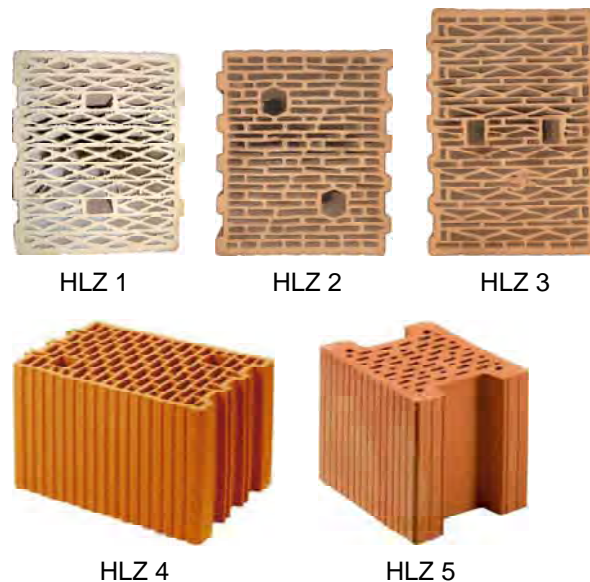


Abb. 53: Lochung der in Tab. 13 beschriebenen Wände aus Hochlochziegeln.

Die Mess- und Berechnungsergebnisse für die oben beschriebenen Wände sind in Abb. 54 sowohl für ΔR_w als auch für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ zusammengefasst. Vergleicht man Messung (gefüllte Balken) und Rechnung (leere Balken) miteinander, so ist festzustellen, dass nur vergleichsweise geringe Unterschiede bestehen. Die Abweichung bewegen sich zwischen -0,9 dB und +1,7 dB und liegen damit im Rahmen der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Berechnungsgenauigkeit. Hieraus ergibt sich die Aussage, dass sich die für Vollsteinwände entwickelten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Verbesserung der Schalldämmung durch WDVS in vollem Umfang und ohne Einbußen der Genauigkeit auch für Lochsteinwände - insbesondere auch für Wände aus Hochlochziegeln - verwenden lassen.

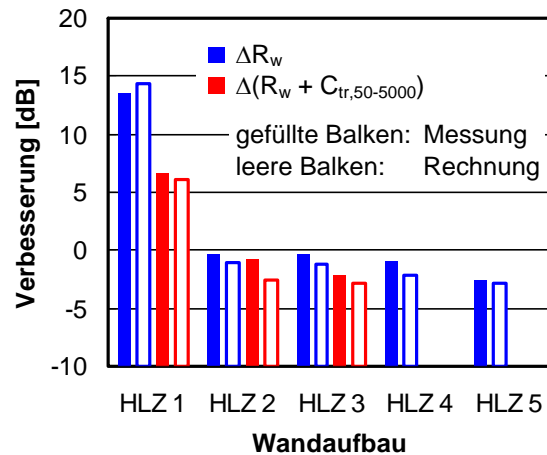


Abb. 54: Mess- und Berechnungsergebnisse für die in Tab. 13 beschriebenen HLZ-Wände. Dargestellt sind jeweils ΔR_w (blaue Balken) und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ (rote Balken). Sind die Balken gefüllt, handelt es sich um Messdaten, sind sie leer, sind es Berechnungsergebnisse. Für die Wände HLZ 4 und HLZ 5 liegen keine Ergebnisse für $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ vor.

8.4 WDVS auf Holzständerwand

Zum akustischen Verhalten von WDVS auf Wänden in Leichtbauweise liegen bislang nur wenige Erkenntnisse vor. Als in der Praxis häufigste Bauweise sind hierbei insbesondere Holzständerwände von Interesse. Akustische Untersuchungen sind hier dringend erforderlich. Andererseits ist die Konstruktionsvielfalt in diesem Bereich so groß, dass eine umfassende Betrachtung ein eigenes umfangreiches Forschungsprojekt erfordern würde. Deshalb wird im Folgenden exemplarisch nur eine einzelne repräsentative Holzständerwand mit genau definierten idealisierten Eigenschaften betrachtet. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, am Beispiel dieser Wand prinzipielle Erkenntnisse über das unterschiedliche Verhalten von WDVS auf Massiv- und Leichtbauwänden zu erhalten und daraus - auf Grundlage des derzeitigen beschränkten Wissensstandes - Empfehlungen für die bauliche Schallschutzplanung abzuleiten.

Die für die Untersuchungen verwendete Holzständerwand ist in Abschnitt 6.2.3 beschrieben. Die zugehörige Schalldämmkurve in Abb. 19 weist den für derartige Wände üblichen Verlauf mit niedrigem Schalldämm-Maß bei tiefen Frequenzen und vergleichsweise hoher Schalldämmung im oberen Frequenzbereich auf. Dieses bauarttypische Verhalten kommt auch im Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ zum Ausdruck, der bei der untersuchten Wand -13,3 dB beträgt. Das WDVS bestand aus 100 mm dicken Polystyrolplatten, die in üblicher Weise mit einer 8 mm dicken Putzschicht (flächenbezogene Masse 11 kg/m²) versehen wurde. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei Massivwänden wurde das WDVS hier jedoch - wie bei dieser Bauweise üblich - vollflächig auf die Außenschale der Ständerwand geklebt, wobei Dispersionskleber mit einer Schichtdicke von ca. 4 mm zum Einsatz kam. Wie bei den Massivwänden erfolgte auch bei der Holzständerwand keine Verdübelung des Dämmsystems.

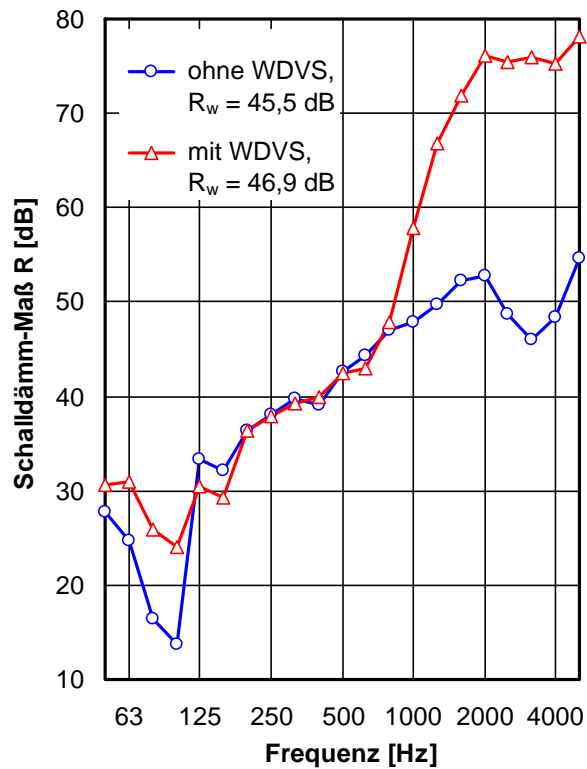


Abb. 55: Schalldämm-Maß der untersuchten Holzständerwand mit und ohne WDVS.

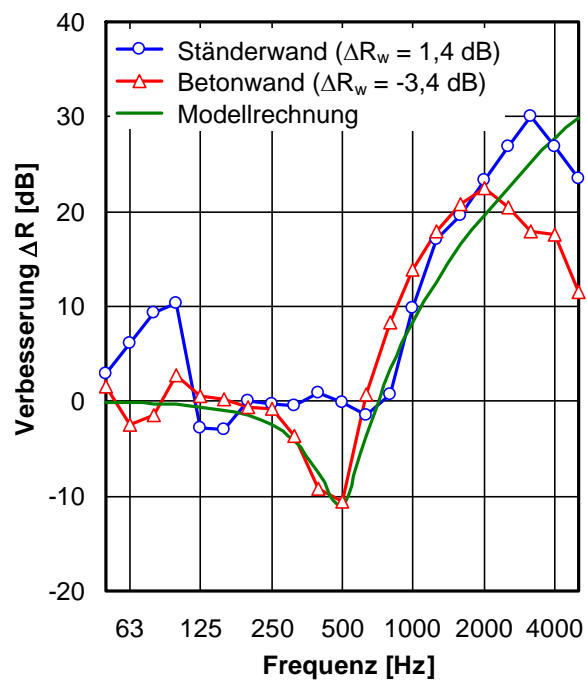


Abb. 56: Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS für die betrachtete Holzständerwand. Zum Vergleich sind außerdem die Verbesserung durch ein baugleiches WDVS auf einer 13 cm dicken Stahlbetonplatte (Platte Nr. 3 aus Abschnitt 6.2.1) und die nach Gl. (7) berechnete Verbesserung der Schalldämmung eingezeichnet. Die Parameter der verwendeten Berechnungsformel, die das Verhalten eines bedämpften Masse-Feder-Systems

repräsentiert, wurden so angepasst, dass sich die bestmögliche Übereinstimmung mit der für die Betonplatte ermittelten Messkurve ergab.

Die Schalldämmung der Holzständerwand mit und ohne WDVS ist in Abb. 55 dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass sich das akustische Verhalten des WDVS gegenüber dem Einsatz im Massivbau stark unterscheidet. Die Unterschiede werden noch deutlicher, wenn man, wie in Abb. 56, die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS bestimmt und mit den entsprechenden Werten für ein baugleiches WDVS auf einer Massivwand vergleicht. Während sich das WDVS auf der Massivwand in recht guter Näherung durch ein bedämpftes Masse-Feder-System (in Abb. 56 gleichfalls eingezeichnet) beschreiben lässt, ergibt sich auf der Ständerwand ein völlig anderes akustisches Verhalten. Auffällig sind vor allem das Fehlen des für WDVS ansonsten typischen Resonanzinbruchs in der Schalldämmkurve (bei 630 Hz allenfalls leicht angedeutet erkennbar), sowie die starke Zunahme der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen. Ersteres hängt möglicherweise mit der Bedämpfung der Außenschale durch das aufgeklebte WDVS, letzteres vermutlich mit der damit verbundenen Erhöhung der flächenbezogenen Masse zusammen (durch das Aufkleben des WDVS erhöht sich die flächenbezogene Masse der aus 13 mm dicken Spanplatten bestehenden Außenschale von 8,6 kg/m² auf ca. 24 kg/m²). Die genauen Zusammenhänge müssen jedoch noch näher untersucht werden.

Ein Berechnungsmodell für die Schalldämmung von Holzständerwänden mit WDVS lässt sich aus den Untersuchungen an einer einzigen Wand natürlich nicht ableiten. Auch Messergebnisse für einige weitere Ständerwände, die von der Knauf Gips KG zur Verfügung gestellt wurden, helfen hier nicht viel weiter, weil die erforderlichen Angaben zur Grundwand ohne WDVS fehlen. Es gibt jedoch bereits ein semiempirisches Berechnungsverfahren für diese Bauweise, das vor einigen Jahren - wenn auch auf Grundlage eines verhältnismäßig geringen Datenbestandes - im Rahmen eines Forschungsvorhabens im ift Rosenheim entwickelt wurde [31]. Im Folgenden wird überprüft, welches Ergebnis sich mit diesem Verfahren für die hier untersuchte Ständerwand ergibt. Leider beschränkt sich das Verfahren auf die Bestimmung von ΔR_w , so dass zu $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ keine Aussagen möglich sind.

Um die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS zu ermitteln, verwendet das oben erwähnte Verfahren folgende Beziehung:

$$\Delta R_w = [-11,5 \lg(f_R) + 33] \text{ dB} + K_{R,w,0} + K_{\text{Dämmstofftyp}} + K_{\text{Montage}} \quad (31)$$

mit f_R = Resonanzfrequenz des WDVS in Hz,
 $K_{R,w,0}$ = Korrektur für die Schalldämmung der Grundwand,
 $K_{\text{Dämmstofftyp}}$ = Korrektur für die Art des Dämmstoffs,
 K_{Montage} = Korrektur für die Montagebedingungen (Klebefläche, etc.).

Die Korrektur zur Berücksichtigung der Schalldämmung der Grundwand lässt sich hierbei mit folgender Gleichung bestimmen:

$$K_{R,w,0} = -0,68 R_{w,0} + 30,64 \text{ dB}, \quad (32)$$

wobei $R_{w,o}$ das bewertete Schalldämm-Maß der Holzständerwand ohne WDVS bezeichnet. Die beiden obigen Gleichungen gelten jeweils unter der Voraussetzung, dass das WDVS, wie im vorliegenden Fall, auf der Außenschale der Wand befestigt wird. Die Einzelheiten des Berechnungsverfahrens und die Werte für die Korrekturen $K_{\text{Dämmstofftyp}}$ und K_{Montage} sind in Anhang 1 (Auszug aus dem Forschungsbericht des ift Rosenheim) aufgeführt.

Bestimmt man die Resonanzfrequenz des WDVS mittels Gl. (4) (für die flächenbezogene Masse der Wand ist hier selbstverständlich nur die Außenschale zuzüglich des für die Befestigung des WDVS verwendeten Klebstoffs anzusetzen) und setzt das Ergebnis in Gl. (31) ein, so ergibt die Berechnung für die Verbesserung der Schalldämmung einen Wert von $\Delta R_w = 0,2$ dB, der recht gut mit dem Messergebnis in Höhe von 1,4 dB übereinstimmt. Ob dies auch für andere WDVS und andere Ständerwände zutrifft, bleibt natürlich offen. Für die praktische Planung sollte außerdem auch Zugriff auf $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ - bislang noch nicht im Berechnungsmodell enthalten - bestehen. Abgesehen davon bildet das beschriebene Modell als einziges derzeit für Holzständerwände mit WDVS verfügbares bauakustisches Prognoseverfahren zumindest eine wichtige Orientierungshilfe für die praktische Planung. Darüber hinaus sind jedoch in jedem Fall weitere gründliche Untersuchungen zum Verständnis der akustischen Zusammenhänge und zur Validierung und Optimierung des Berechnungsverfahrens erforderlich.

8.5 Verkehrslärmspektren

Da das bewertete Schalldämm-Maß R_w in erster Linie für den Schallschutz im Gebäudeinneren - d. h. bei Einwirkung üblicher Wohngeräusche - konzipiert wurde, ist es für Außenbauteile nur beschränkt geeignet. Durch die Einführung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} , die das Frequenzspektrum von Außengeräuschen in die Bewertung einbeziehen, wird dieses Problem erheblich entschärft, so dass die technischen Pegelangaben und die subjektiv wahrgenommene Schallschutzwirkung besser miteinander korrelieren. Obgleich die Spektrum-Anpassungswerte in DIN EN ISO 717-1 normativ verankert sind, sind sie in Deutschland bislang - abgesehen von einer unverbindlichen Empfehlung im Entwurf zur neuen DIN 4109 - nicht Bestandteil der geltenden baurechtlichen Schallschutzanforderungen. Um einen wirksamen Schallschutz zu gewährleisten, wird dennoch dringend empfohlen, die Spektrum-Anpassungswerte mit in die bauakustische Planung von Außenbauteilen einzubeziehen.

Im Prinzip ließe sich für jede Art von Außenlärm ein individueller Spektrum-Anpassungswert festlegen. Da dies jedoch bei der Anwendung erhebliche Verwirrung hervorrufen würde, beschränkt man sich auf die beiden Werte C und C_{tr} , die auf der Grundlage der in Abb. 1 dargestellten Frequenzspektren aus der gemessenen Schalldämmkurve berechnet werden. Obgleich diese Berechnung für unterschiedliche Frequenzbereiche erfolgen kann, besteht in der bauakustischen Fachwelt weitgehend Einigkeit darüber, dass nur die Verwendung des vollen Frequenzbereichs von 50 Hz bis 5000 Hz (also $C_{50-5000}$ oder $C_{tr,50-5000}$) eine korrekte Beurteilung der Schallschutzwirkung gewährleistet. Weniger klar ist hingegen, welcher der beiden Werte in der Praxis bei unterschiedlichen Außenlärmsituation anzuwenden ist. In DIN EN ISO 717-1 werden hierzu folgende Empfehlungen gegeben:

Anwendung von C bei:

- Schienenverkehr bei mittlerer und hoher Geschwindigkeit,
- Autobahnverkehr bei einer Geschwindigkeit von mehr als 80 km/h,
- Düsenflugzeugen in geringem Abstand.

Anwendung von C_{tr} bei:

- städtischem Straßenverkehr,
- Schienenverkehr bei geringer Geschwindigkeit,
- Propellerflugzeugen,
- Düsenflugzeugen in großem Abstand.

Diese Angaben sind nicht nur teilweise recht unklar, sondern treffen den vorliegenden Erfahrungen zufolge in der Praxis auch keineswegs immer zu. Um bei der Anwendung der Spektrum-Anpassungswerte größere Sicherheit zu erlangen, wurden deshalb in einem umfangreichen Messprogramm systematische Verkehrslärmmessungen durchgeführt und mit den zur Berechnung von C und C_{tr} verwendeten Frequenzspektren verglichen. Alle Messungen erfolgten im Nahbereich der untersuchten Lärmquellen (bei Straßen und Schienenwegen in einem Abstand von maximal etwa 10 m, bei Fluglärm in etwa 1000 m Abstand von der Start- und Landebahn in der Einfugschneise eines Verkehrsflughafens). Nach dem Abschluss der Messungen wurden die ermittelten Spektren zunächst auf einen Gesamtschallpegel von 0 dB(A) normiert. Danach wurden alle Messungen an gleichartigen Schallquellen (also z. B. an Wohnstraßen) durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes zu gemittelten Spektren zusammengefasst. Da auch die gemittelten Spektren auf einen Gesamtpegel von 0 dB(A) normiert wurden, lassen sie sich direkt untereinander und mit den genormten Frequenzspektren zur Berechnung von C und C_{tr} (ebenfalls auf 0 dB(A) normiert) vergleichen. Die Anzahl der durchgeführten Messungen betrug: 35 Messungen an Straßen, 36 Messungen an Schienenwegen sowie 15 Fluglärmmessungen.

Infolge der Dämpfung auf dem Ausbreitungsweg (hohe Frequenzen werden in weit stärkerem Maße bedämpft und abgeschirmt als dies bei tiefen Frequenzen der Fall ist) hängt das Frequenzspektrum der Schallimmissionen in starkem Maße vom Abstand zwischen Quelle und Immissionsort ab. Neben den Messungen im Nahbereich der Lärmquellen wurden deshalb auch Untersuchungen zur Abstandsabhängigkeit des Frequenzspektrums von Verkehrsräuschen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten exemplarisch an einem langen geraden Abschnitt einer Bundesstraße, der auf ebenem freiem Gelände ohne schallabschirmende Hindernisse verlief. Bei den Messungen wurde der Abstand zwischen Mikrophon und Straße schrittweise von 10 m auf 100 m erhöht. Obgleich sich die Messungen auf eine einzige Quelle beschränkten, lassen sich die Ergebnisse sinngemäß auf alle gleichartigen Linienschallquellen (d. h. auf alle langen geraden Strassen und Schienenwege) übertragen.

Die gemittelten Frequenzspektren der wichtigsten Arten von Geräuschquellen aus dem Bereich von Straßen-, Schienen- und Fluglärm sind in den Abbildungen 57 bis 59 dar-

gestellt. Am Beispiel des Straßenverkehrslärms in Abb. 57 ist zu erkennen, dass die Spektren für die verschiedenen Arten von Straßen trotz der vorhandenen Unterschiede einen verhältnismäßig ähnlichen Frequenzverlauf aufweisen. Für die Anwendung in der baulichen Praxis erscheint es daher gerechtfertigt, die Spektren durch nochmalige arithmetische Mittelung zu einer Kurve zusammenzufassen, die alle Arten von Straßen und somit den Straßenverkehr insgesamt repräsentiert. Ähnliches gilt auch für den Schienen und - mit Einschränkungen bei Hubschraubern - auch für den Flugverkehr.

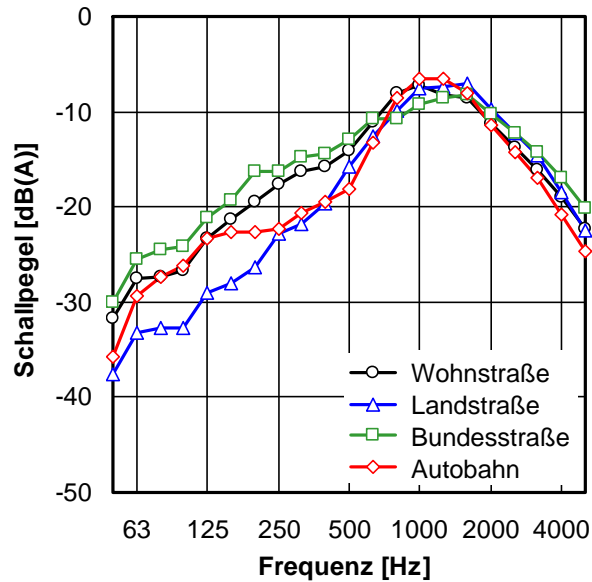


Abb. 57: Gemittelte Frequenzspektren für unterschiedliche Arten von Straßen. Die Spektren wurden in wenigen Metern Abstand vom Fahrbahnrand gemessen und sind jeweils auf einen Gesamtschallpegel von 0 dB(A) normiert.

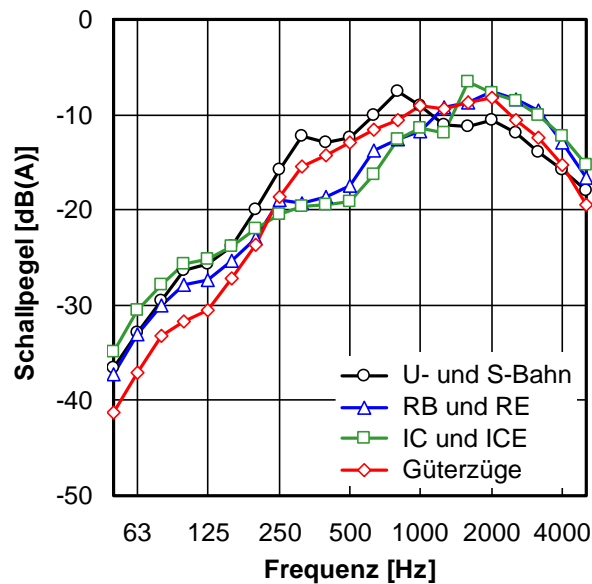


Abb. 58: Gemittelte Frequenzspektren für unterschiedliche Schienenwege bzw. Schienenfahrzeuge. Gleiches Messverfahren und gleiche Darstellung wie in Abb. 57.

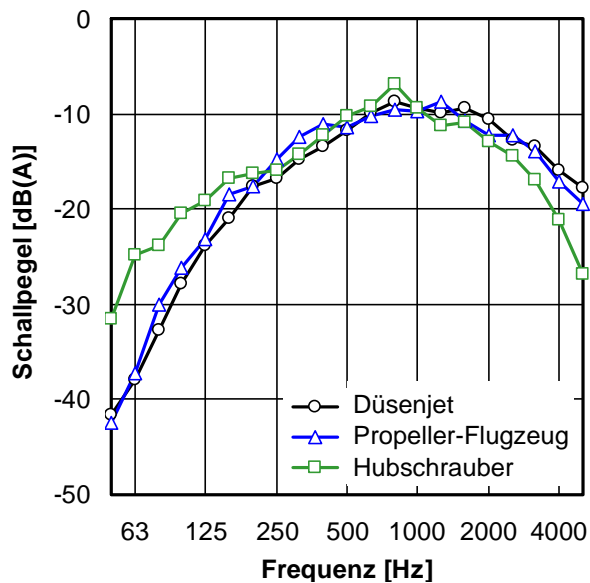


Abb. 59: Gemittelte Frequenzspektren für unterschiedliche Typen von Flugzeugen. Sämtliche Messungen wurden in etwa 1000 m Abstand von der Start- und Landebahn in der Einfugschneise eines Verkehrsflughafens durchgeführt. Die Spektren sind jeweils auf einen Gesamtschallpegel von 0 dB(A) normiert.

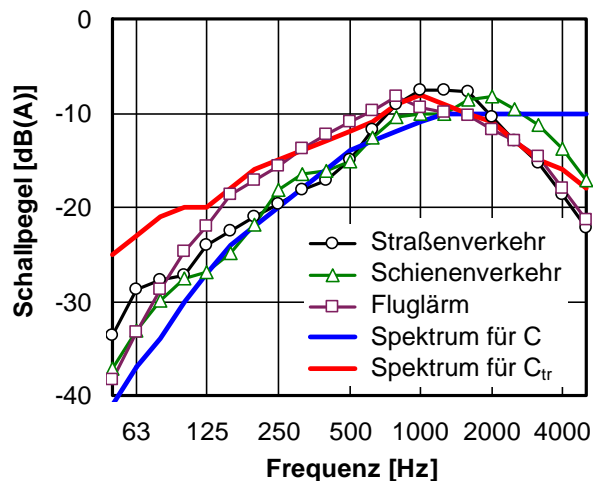


Abb. 60: Mittelungsspektren für Straßen-, Schienen- und Flugverkehr im Vergleich zu den zu den beiden genormten Geräuschkpektren zur Ermittlung von C und C_{tr} nach DIN EN ISO 717-1. Alle Spektren sind auf einen Gesamtschallpegel von 0 dB(A) normiert. Die Messung der Verkehrsgeräusche erfolgte jeweils im Nahbereich der Quellen.

In Abb. 60 sind die drei gemittelten Verkehrslärmspektren für Straßen-, Schienen- und Flugverkehr und die beiden genormten Geräuschkpektren zur Berechnung von C und C_{tr} im Vergleich zueinander dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen die Verkehrslärmspektren bei den meisten Frequenzen zwischen den Kurven für C und C_{tr}. Eine Entscheidung darüber, welcher der beiden Spektrum-Anpassungswerte im Einzelfall heranzuziehen ist, lässt sich demnach aus den ermittelten Messergebnissen zunächst nicht ohne weiteres ableiten. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass alle durchgeführ-

ten Messungen im Nahbereich der betrachteten Verkehrswege erfolgten. Wie aus dem in Abb. 61 dargestellten Beispiel - dem durch eine Bundesstraße in unterschiedlicher Entfernung erzeugten Geräuschspektrum - zu ersehen ist, treten mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle die tieffrequenten Geräuschanteile immer stärker in den Vordergrund. Bereits in einem Abstand von weniger als 50 m sind die für die bauakustische Bewertung maßgebenden Terzpegel unterhalb von etwa 250 Hz so stark angewachsen, dass sie dem zur Berechnung von C_{tr} verwendeten Spektrum entsprechen. Dieser Effekt wird noch erheblich verstärkt, wenn sich im Ausbreitungsweg schallabschirmende Hindernisse befinden. In solchen Fällen ist für die bauliche Schallschutzplanung daher der Spektrum-Anpassungswert C_{tr} heranzuziehen.

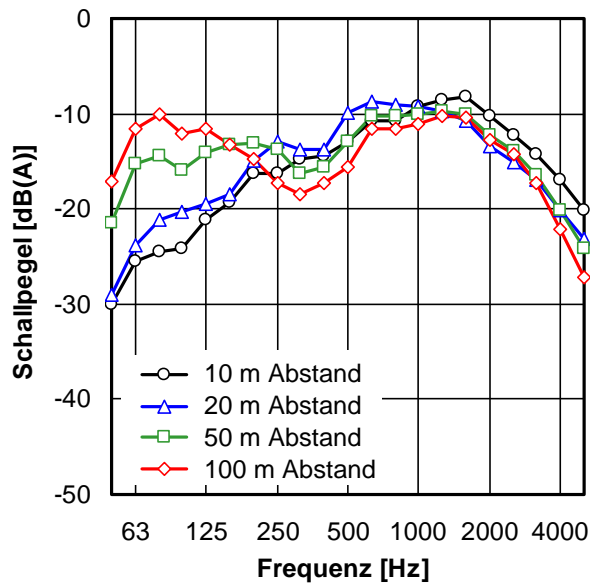


Abb. 61: Frequenzspektrum von Straßenverkehrsgeräuschen in unterschiedlichem Abstand von der Fahrbahn (zum Vergleich jeweils auf einen Gesamtschallpegel von 0 dB(A) normiert). Die Messungen erfolgten an einem langen geraden Abschnitt einer Bundesstraße auf ebenem freiem Gelände.

In der Praxis setzt sich der auf die Außenhülle von Bauten einwirkende Geräuschpegel zumeist aus zahlreichen verschiedenen Beiträgen zusammen, die von Schallquellen in unterschiedlicher Entfernung hervorgerufen werden. Die maßgebenden Anteile sind dabei zumeist auf Verkehrsgeräusche (hauptsächlich Straßenverkehrslärm) zurückzuführen. Dass nur eine einzige Schallquelle in unmittelbarer Nähe des betrachteten Außenbauteils vorhanden ist, kommt hingegen verhältnismäßig selten vor. Hieraus geht hervor, dass die Beurteilung der Schallschutzwirkung von Außenbauteilen normalerweise unter Verwendung des Spektrum-Anpassungswertes C_{tr} bzw. - da auch die Frequenzen unterhalb von 100 Hz einbezogen werden sollten - des Wertes $C_{tr,50-5000}$ erfolgen sollte.

Für diese Empfehlung, auf die im vorliegenden Bericht bereits mehrfach hingewiesen wurde, gibt es noch weitere Argumente. So werden von den Bewohnern von Bauten, die nachträglich mit WDVS versehen wurden, immer wieder Beschwerden über eine Verschlechterung des baulichen Schallschutzes geäußert. Erfolgt die Planung unter Ein-

beziehung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$, sind derartige Beschwerden im Allgemeinen nicht mehr zu befürchten. Als positiv ist auch zu bewerten, dass durch diese Vorgehensweise die Gründe für die derzeit weit verbreitete Verwendung weicher Dämmstoffe mit den damit verbundenen bautechnischen Nachteilen (erhöhte Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen, verstärkte Gefahr der Rissbildung) entfallen. Schließlich ist bei der Planung von Bauten zu berücksichtigen, dass innerhalb der zu erwartenden Lebensdauer mit einer weiteren Verkehrszunahme und infolgedessen mit einem Anstieg der resultierenden Lärmbelastung zu rechnen ist [54, 55]. Die Berücksichtigung von $C_{tr,50-5000}$ gewährleistet im Vergleich zur derzeitigen Planungspraxis einen deutlich höheren akustischen Sicherheitsspielraum und trägt auf diese Weise zu einer nachhaltigen Bauweise bei.

Es gibt also viele Gründe, die dafür sprechen, den Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ in die akustische Planung von Außenbauteilen einzubeziehen. Im Falle von WDVS erfolgt dies dadurch, dass man die Resonanzfrequenz des Systems so bemisst, dass die akustische Optimierung statt wie derzeit üblich im Hinblick auf ΔR_w in Bezug auf $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erfolgt. Wie hierbei vorzugehen ist, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

9 Planungshinweise

In der praktischen bauakustischen Planung werden WDVS zumeist so ausgelegt, dass sich eine möglichst niedrige Resonanzfrequenz ergibt, da auf diese Weise die größtmögliche Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes ΔR_w erreicht wird. Im Hinblick auf die in Deutschland für Außenbauteile geltenden Schallschutzanforderungen ist diese Vorgehensweise völlig korrekt. In der Praxis führt sie jedoch häufig statt der angestrebten Verbesserung zu einer Verschlechterung des baulichen Schallschutzes. Um einen wirkungsvollen Schallschutz der Außenbauteile gegenüber dem üblicherweise einwirkenden Verkehrslärm zu gewährleisten, sollte die akustische Planung wie bereits mehrfach erwähnt statt auf der Basis von ΔR_w unter Verwendung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erfolgen. Abgesehen davon, dass dies vielen Planern nicht ausreichend bekannt war, bestand dazu bislang jedoch auch keine praktikable Möglichkeit, da eine rechnerische Vorherbestimmung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bisher nicht möglich war.

Das in dem durchgeführten Forschungsvorhaben zu diesem Zweck entwickelte Berechnungsverfahren erlaubt es nun erstmals, die technischen Eigenschaften von WDVS so auszulegen, dass eine gezielte Optimierung der Schalldämmung im Hinblick auf $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erfolgt. Da die Grundwand zumeist vorgegeben ist, erfolgt die akustische Optimierung des Systems in erster Linie durch Anpassung der Resonanzfrequenz. Dies wird im Folgenden an einem praxisnahen Beispiel demonstriert, bei dem von folgenden baulichen Voraussetzungen ausgegangen wird:

- Das bewertete Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS beträgt $R_{w,o} = 53$ dB (dies entspricht bauüblichem Vollsteinmauerwerk mit einer flächenbezogenen Masse von etwa 280 kg/m^2).

- Der verwendete Dämmstoff besteht aus Polystyrol (ob es sich dabei um EPS oder EEPS handelt, spielt keine Rolle, da die Elastifizierung des Materials nicht mit in die Berechnung eingeht).
- Die Verklebung des WDVS mit der Grundwand erfolgt teilflächig mit einem Klebeflächenanteil von ca. 40 %.

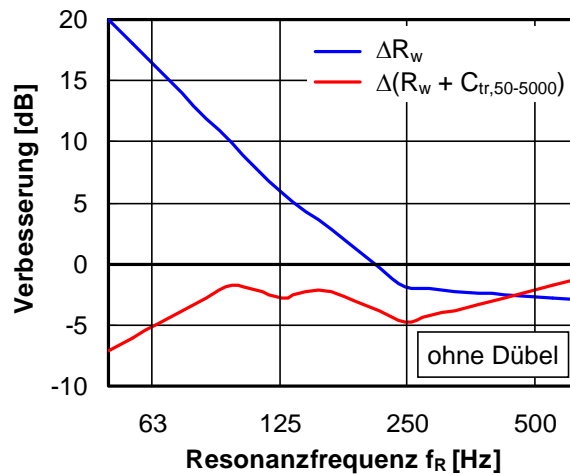


Abb. 62: Verbesserung der Schalldämmung der Grundwand durch das WDVS in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz. Die für ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ berechneten Kurven beziehen sich auf die oben beschriebene Bausituation. Es wurde angenommen, dass die Befestigung des WDVS ohne Dübel erfolgt.

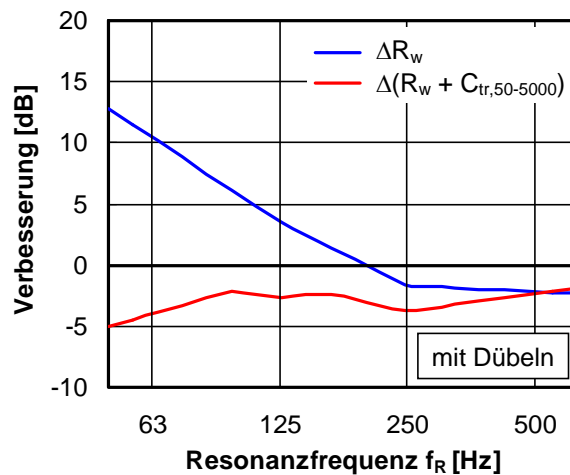


Abb. 63: Gleiche Darstellung wie in Abb. 62, jedoch für eine zusätzliche Befestigung des WDVS mit Dübeln.

Aus den Abbildungen 62 und 63 geht hervor, wie sich die Resonanzfrequenz des WDVS unter den oben beschriebenen baulichen Voraussetzungen auf ΔR_w und $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ auswirkt. Die Berechnung der dargestellten Kurven erfolgte mit den in den Abschnitten 7.1 und 7.2 beschriebenen Verfahren, wobei zunächst der unverdübelte Zustand (Abb. 62) und anschließend der Zustand mit Dübeln (Abb. 63) betrachtet wur-

de (die Anzahl der Dübel spielt dabei keine Rolle, sofern wie vorgeschrieben zumindest 4 Dübeln je Quadratmeter Wandfläche vorhanden sind). Aus den Abbildungen sind folgende grundlegenden Erkenntnisse zu entnehmen:

- Die Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz ist bei $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ erheblich schwächer ausgeprägt als bei ΔR_w .
- Alle Werte von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ liegen im negativen Bereich. Dies bedeutet, dass unabhängig von der Resonanzfrequenz des WDVS immer eine - wenn auch zu- meist verhältnismäßig geringe - Verschlechterung des Schallschutzes erfolgt. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ bei Grundwänden mit niedriger Schalldämmung durchaus auch positive Werte annehmen kann. Im Vergleich zu den für ΔR_w ermittelten Werten fällt diese Verbesserung allerdings nur verhältnismäßig gering aus (max. ca. 5 dB bei einer Grundwand mit $R_{w,o} = 45$ dB).
- Bei niedrigen Resonanzfrequenzen weist ΔR_w die höchsten, $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ hingegen die geringsten Werte auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Resonanz- einbruch der Schalldämmkurve hier in einen Frequenzbereich fällt, in dem die Grundwand eine niedrige Schalldämmung aufweist, während gleichzeitig ein ver- hältnismäßig hoher Verkehrslärmpegel vorhanden ist. In die Berechnung von ΔR_w geht dieser Frequenzbereich nicht ein, so dass statt der tatsächlich vorhandenen Verschlechterung eine starke Verbesserung der Schallschutzwirkung vorgetäuscht wird.
- Um einen optimalen Schallschutz gegenüber Verkehrslärm zu erreichen, sollte die Resonanzfrequenz des WDVS im Bereich von etwa 100 Hz bis 160 Hz liegen. Nied- rige Resonanzfrequenzen unter 80 Hz sind hingegen zu vermeiden.
- Bei zusätzlicher Befestigung des WDVS mit Dübeln sind abgesehen von einer Ab- schwächung der vorhandenen akustischen Effekte keine wesentlichen Änderungen der akustischen Eigenschaften zu verzeichnen. In Abb. 63 äußert sich dies in einer Abflachung der berechneten Kurven bei ansonsten unverändertem Verlauf.

Ogleich der Aufbau des WDVS und insbesondere auch die Schalldämmung der vor- handenen Grundwand erheblichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften haben, lassen sich die aus dem oben dargestellten Beispiel abgeleiteten Erkenntnisse mit gerin- gen Einschränkungen im Prinzip auf alle Außenwände mit WDVS übertragen. Um einen wirkungsvollen Schallschutz gegenüber Verkehrslärm sicherzustellen, darf die Reso- nanzfrequenz des WDVS grundsätzlich nicht zu tief abgestimmt werden. Der Einsatz weicher Dämmstoffe ist deshalb in der Regel zu vermeiden. Dämmstoffe mit zu hoher Steifigkeit erweisen sich jedoch gleichfalls nicht als günstig, weshalb eine Resonanzfre- quenz von etwa 100 Hz bis 160 Hz in akustischer Hinsicht normalerweise den besten Kompromiss darstellt.

Eine Alternative zu den üblicherweise verwendeten Dämmstoffen aus Polystyrol und Mineralfaser bilden mineralische Schäume. Sie sind so steif, dass sich im maßgebenden bauakustischen Frequenzbereich keine Schwingungen ausbilden können, so dass die Schalldämmung der Grundwand praktisch unverändert bleibt. Für das oben betrachtete Beispiel, in dem alle herkömmlichen Dämmstoffe eine Verschlechterung des Schall-

schutzes bewirken, stellen mineralische Schäume aufgrund ihres akustisch neutralen Verhaltens daher in schalltechnischer Hinsicht die beste Lösung dar.

10 Nachhaltigkeit von WDVS

Über die Zweckmäßigkeit von wärmedämmenden Maßnahmen an der Außenhülle von Gebäuden wird in letzter Zeit kontrovers diskutiert. Neben der Problematik des Feuchtschutzes (Schimmelbildung) und des Brandschutzes stellt dabei insbesondere auch die Nachhaltigkeit ein wichtiges Thema dar. Im Hinblick darauf werden in der Öffentlichkeit vor allem zwei Einwände gegen Wärmedämm-Verbundsysteme vorgebracht:

- Die Herstellung der Dämmsystemen erfordert einen höheren Energieaufwand als die resultierende Einsparung von Heiz- / Kühlenergie.
- Langfristig (nach Ablauf ihrer baulichen Lebensdauer) verursachen Wärmedämm-Verbundsysteme gravierende Entsorgungsprobleme.

Objektive und sachkundige Ausführungen zu den beiden genannten Punkten finden sich beispielsweise in [56] und [57]. Was die Energiebilanz von WDVS betrifft, so kommt es dabei zum einen auf die bauliche Ausgangssituation, die klimatischen Bedingungen und die Art der Nutzung und zum anderen auf den eingesetzten Dämmstoff an. Nachwachsende Rohstoffe sind gegenüber herkömmlichen Materialien wie Polystyrol, Mineralfaser oder Polyurethan grundsätzlich im Vorteil, da sie bei der Herstellung erheblich weniger Energie benötigen (ca. 100 kWh/m³ gegenüber bis zu 1300 kWh/m³). Die energetische Amortisationsdauer von WDVS aus nachwachsenden Rohstoffen beträgt deshalb oft weniger als ein Jahr. Herkömmliche Dämmstoffe weisen demgegenüber deutlich längere Amortisationszeiten von bis zu etwa fünf Jahren auf. Im Hinblick auf ihre zu erwartende Lebensdauer sind jedoch auch diese Dämmstoffe energetisch positiv zu bewerten, da die Energieeinsparung in der Nutzungsphase den Energieaufwand bei der Herstellung in der Regel deutlich übertrifft.

Die Entsorgung von Wärmedämm-Verbundsystemen nach Ablauf ihrer Lebensdauer stellt bislang tatsächlich ein nicht unerhebliches Problem dar. Dies gilt insbesondere für die derzeit häufigste Bauweise, bei der die einzelnen Bestandteile des Systems fest miteinander verklebt sind. Zwar ist auch bei derartigen Verbundsystemen ein Recycling im Prinzip möglich, geeignete Verfahren zur Trennung der verschiedenen Komponenten (Klebstoff / Mörtel, Dämmstoff, Armierung und Putz) sind jedoch bislang nur sehr eingeschränkt verfügbar. Demontierte Dämmsysteme werden deshalb derzeit zumeist auf eine Deponie verbracht, was in energetischer und ökologischer Hinsicht leider den ungünstigsten Fall darstellt. Negativ wirken sich dabei vor allem die hohen Transport- und Lagerkosten infolge der geringen Materialdichte sowie die eingeschränkte biologische Abbaubarkeit vieler Dämmstoffe aus [58, 59]. Ein zusätzliches Problem stellen auch die bei WDVS zur Vermeidung von Algen- und Pilzbefall vielfach eingesetzten Biozide dar, die ebenso wie Flammschutzadditive wegen ihrer Toxizität die Verwertungsmöglichkeiten beim Recycling einschränken [60, 61].

Energetisch sinnvoller aber ökologisch gleichfalls nicht ganz unbedenklich ist die thermische Verwertung der Systeme, bei der sich etwa die Hälfte der für die Herstellung benötigten Energie in Form von Wärme zurückgewinnen lässt. Bei der Verbrennung wird das Volumen des Abrissmaterials um etwa den Faktor 50 - 150 verkleinert, so dass das Restmaterial bei der Lagerung auf der Deponie kaum noch Raum beansprucht. Die bei der Verbrennung über das Rauchgas freigesetzten Schadstoffe lassen sich durch vorhandene Filter- und Reinigungstechniken (in modernen Verbrennungsanlagen Standard) fast vollständig aus dem Abgas entfernen, so dass keine schädlichen Schadstoffemissionen zu befürchten sind.

Die im Hinblick auf Ökologie und Nachhaltigkeit beste Lösung stellt aber natürlich die Trennung und Wiederverwertung der einzelnen Komponenten der zu entsorgenden Dämmsysteme dar. Bislang waren hierzu nur verhältnismäßig wenige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu verzeichnen, was sicherlich auch damit zusammenhängt, dass in der Vergangenheit nur relativ geringe Mengen an Abrissmaterial anfielen. Dies wird sich in Zukunft, wenn eine größere Anzahl von Systemen ihre bauliche Lebensdauer erreichen, erheblich ändern. Es ist daher davon auszugehen, dass zukünftig auf diesem Gebiet erheblich stärker geforscht und entwickelt wird, so dass die zur Materialtrennung und -verwertung benötigten Verfahren bei Bedarf rechtzeitig zur Verfügung stehen werden. Ein Beispiel für ein solches Forschungsvorhaben ist das vom Fachverband WDVS, dem Industrieverband Hartschaum und dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gemeinsam finanzierte Projekt "Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des Wärmedämmverbundsystems nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur thermischen Verwertung", das derzeit im Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München durchgeführt wird. Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Wiederverwertung von Dämmmaterialien aus Kunststoff stellt der CreaSolv® Prozess dar, bei dem die Kunststoffabfälle zunächst in einem speziellen Lösungsmittel aufgelöst werden. Nach dem Reinigen der Lösung von Fremdstoffen erfolgt dann das Ausfällen des Ziel-Kunststoffes, der anschließend sortenrein weiterverarbeitet werden kann [61 - 63].

11 Zusammenfassung

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurde untersucht, welchen Einfluss Wärmedämm-Verbundsysteme auf die Schalldämmung der Grundwand haben. Dabei standen neuartige Konstruktionsweisen im Vordergrund, zu denen bislang nur unzureichende Erkenntnisse vorlagen. Es sollte geklärt werden, wie sich die Schalldämmung derartiger Systeme im Rahmen der bauakustischen Planung rechnerisch vorherbestimmen lässt. Als Arbeitsgrundlage diente ein vorhandenes semiempirisches Berechnungsverfahren, das auf früheren Untersuchungen im Fraunhofer-Institut für Bauphysik beruht und sich in der Praxis gut bewährt hat [2, 3]. Um es auch für neuartige Wandsysteme nutzen zu können, wurde es angepasst, erweitert und ergänzt.

Den Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten bildete eine Messreihe, bei der die Schalldämmung von Wänden mit und ohne WDVS systematisch untersucht wurde. Die Mes-

sungen fanden unter exakt definierten und reproduzierbaren Bedingungen in einem bauakustischen Prüfstand statt und umfassten folgende Konstruktionen:

- Grundwände: Bauteile aus Stahlbeton, Wände aus Hochlochziegeln und Holzständerwände,
- Dämmsysteme: WDVS mit bauüblicher und erhöhter Dämmstoffdicke sowie zweilagige Dämmsysteme, bei denen auf ein bereits vorhandenes WDVS noch ein weiteres System aufgebracht wurde.

Als weiterer wichtiger Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Berechnungsverfahren zur Vorherbestimmung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ entwickelt. Diese Einzahlangebe, die die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS beschreibt und sich auf die Summe von bewertetem Schalldämm-Maß R_w und Spektrum-Anpassungswert $C_{tr,50-5000}$ bezieht, ist für die praxisgerechte akustische Planung von Außenbauteilen von großer Bedeutung. Da bei der Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten in Verbindung mit unterschiedlichen Außenlärmerszenarien Unklarheiten bestehen, wurden außerdem umfangreiche Verkehrslärmessungen an Straßen, Schienenwegen und Flughäfen durchgeführt. Die unter Verwendung der Messergebnisse erarbeiteten Planungshinweise tragen zur Verbesserung der Planungssicherheit und zur Vermeidung von Schallschutzmängeln bei.

Die wichtigsten Ergebnisse des durchgeführten Forschungsvorhabens lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Wärmedämm-Verbundsysteme mit erhöhter Dicke der Dämmschicht (betrachtet wurden Systeme mit einer Dicke von bis zu 400 mm) weisen gegenüber WDVS mit üblicher Dämmstoffdicke keine akustischen Besonderheiten auf. Zur Vorherberechnung der Schalldämmung können in beiden Fällen die gleichen Verfahren verwendet werden.
- Zur Berechnung der Schalldämmung von zweilagigen WDVS wird ein fiktives einlagiges System betrachtet, das man erhält, indem man die Putzschicht des inneren WDVS und den darauf befindlichen Klebemörtel gedanklich aus dem Aufbau entfernt. Von der auf diese Weise berechneten Verbesserung der Schalldämmung muss anschließend noch ein Korrekturwert abgezogen werden (4 dB bei ΔR_w und 2 dB bei $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$).
- Bei Wänden aus Hochlochziegeln tritt zwischen dem WDVS und den Steinen keine erkennbare Wechselwirkung auf. Die vorhandenen akustischen Berechnungsverfahren, die ursprünglich für Vollsteinwände entwickelt wurden, lassen sich ohne Beeinträchtigung der Genauigkeit in unveränderter Form auch für Wände aus Hochlochziegeln verwenden. Diese Aussage gilt sinngemäß für alle Arten von Lochsteinmauerwerk sowie auch für Baustoffe mit niedriger Rohdichte.
- Bei der Anbringung auf Wänden in Leichtbauweise, wie z. B. Holzständerwänden, zeigen WDVS ein völlig anderes akustisches Verhalten als auf Massivwänden. Zur Entwicklung eines zuverlässigen Verfahrens zur Vorhersage der Schalldämmung

sind in diesem Bereich noch umfangreiche Untersuchungen erforderlich. Vorläufig kann hierzu behelfsweise ein im ift Rosenheim entwickeltes semiempirisches Modell verwendet werden [31], das jedoch noch besser erprobt und validiert werden muss.

- Mit einem im Rahmen des Forschungsvorhabens neu entwickelten semiempirischen Berechnungsverfahren lässt sich $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$ zuverlässig vorherbestimmen. Die Berechnung erfolgt mit den gleichen Eingangsdaten wie bei dem vorhandenen Verfahren zur Bestimmung von ΔR_w und erreicht eine ähnliche Genauigkeit (die Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung beträgt 2,1 dB).
- Um einen wirkungsvollen Schallschutz der Außenbauteile zu gewährleisten, sollte die bauakustische Planung im Normalfall (bei üblichem Verkehrslärm als maßgebender Geräuschquelle) unter Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes $C_{tr,50-5000}$ erfolgen. Bei Wärmedämm-Verbundsystemen erfolgt dies dadurch, dass die Resonanzfrequenz auf einen Wert im Bereich von etwa 100 Hz bis 160 Hz abgestimmt wird. Hierdurch wird die Übertragung von Außenlärm ins Innere des Gebäudes im allgemeinen am besten unterbunden. Etwas höhere Werte der Resonanzfrequenz sind dabei normalerweise nicht kritisch. Frequenzen unter 80 Hz sind hingegen zu vermeiden.
- Aus logistischen und finanziellen Gründen werden WDVS in zunehmendem Maße aus Dämmstoffplatten hergestellt, die aus mehreren miteinander verklebten Plattenlagen bestehen. Die Verklebung erfolgt vor Ort auf der Baustelle. Den bisherigen Erkenntnissen zufolge wirkt sich der mehrschichtige Aufbau - zumindest bei Platten aus Polystyrol - normalerweise nur geringfügig auf die Schalldämmung aus, so dass sich die vorhandenen akustischen Berechnungsverfahren weiterhin anwenden lassen [64]. Genauere Untersuchungen hierzu finden derzeit im Rahmen eines separaten Forschungsvorhabens statt [65].

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben konnten zahlreiche offene Fragen geklärt und die akustische Planungssicherheit für Außenwände mit WDVS erheblich verbessert werden. Andererseits besteht in einigen Punkten jedoch weiterhin erheblicher Forschungsbedarf. Dies betrifft vor allem leichte Außenwände in Ständerbauweise, die in der Praxis zunehmend an Bedeutung gewinnen und über deren akustische Eigenschaften in Verbindung mit WDVS bislang nur wenig bekannt ist.

12 Literatur

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Weber, L.: Effect of ETHICS on the flanking transmission of outer walls. Fortschritte der Akustik - DAGA 2004 (Straßburg), Tagungsband, S. 475 - 476.
- [6] Weber, L.; Leistner, P.: Aktuelle Ergebnisse zum Schallschutz von Fassaden und Außenbauteilen. Bauphysik 26 (2004), H. 6, S. 300 - 304.
- [7] Weber, L.: Akustisches Berechnungsmodell für Wärmedämm-Verbundsysteme. Fortschritte der Akustik - DAGA 2005 (München), Tagungs-CD, S. 465 - 466.
- [8] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise (November 1989).
- [9] DIN EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung (Juni 2013).
- [10] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen and die Schalldämmung (Entwurf, Nov. 2013).
- [11] DIN EN 29052-1: Akustik - Bestimmung der dynamischen Steifigkeit - Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (Aug. 1992).
- [12] Rückward, W.: Einfluß von Wärmedämm-Verbundsystemen auf die Luftschalldämmung. Bauphysik 4 (1982), H. 2, S. 54 - 56.
- [13] Rückward, W.: Luftschalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen - leichte und schwere Putzschichten im Vergleich. Bauphysik 4 (1982), H. 5, S. 161 - 165.
- [14] Paulmann, K.: Neue Untersuchungen zur Luftschalldämmung von Wänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Bauphysik 16 (1994), H. 4, S. 115 - 121.
- [15] 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).
- [16] Scholl, W.: Schalldämmung mit Wärmedämm-Verbundsystemen, Teil 1: Systeme mit elastifizierten Polystyrol-Dämmplatten. Bauphysik 21 (1999), H. 1, S. 20 - 28.
- [17] Frommherz, J.: Modellierung der Schalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit LAYERS. Diplomarbeit im Studiengang Bauphysik der Fachhochschule Stuttgart - Hochschule für Technik und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2001).

- [18] Rabold, A.; Bacher, S.: Wärmedämm-Verbundsysteme und Außendämmungen aus nachwachsende 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.
- [19] Weber, L.; Scholl, W.: Literaturstudie über den Einfluss der Lochung auf die Schalldämmung und Schall-Längsdämmung von Mauersteinen. IBP-Bericht B-BA 6/1996 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), April 1997.
- [20] Scholl, W.; Weber, L.: Einfluss der Lochung auf die Schalldämmung und Schall-Längsdämmung von Mauersteinen - Ergebnisse einer Literaturlauswertung. Bauphysik 20 (1998), H. 2, S. 49 - 55.
- [21] Weber, L.: Vorstudie zur schalltechnischen Optimierung von Hochlochziegeln. IBP-Bericht B-BA 5/1998 im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Nov. 1999.
- [22] Weber, L.; Bückle, A.: Schalldämmung von Lochsteinwänden - neue Erkenntnisse. Bauphysik 20 (1998), H. 6, S. 239 - 245.
- [23] Weber, L.: Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung von Wänden aus gelochten Mauersteinen - 1. Projektabschnitt. IBP-Bericht B-BA 3/2002 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), April 2002.
- [24] Weber, L.: Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung von Wänden aus gelochten Mauersteinen - 2. Projektabschnitt. IBP-Bericht B-BA 3/2003 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Sept. 2003.
- [25] Weber, L.; Leistner, P.: Aktuelle Ergebnisse zum Schallschutz von Fassaden und Außenbauteilen. Bauphysik 26 (2004), H. 6, S. 300 - 304.
- [26] Schneider, M.; Weber, L.; Fischer, H.-M.; Müller, S.; Gierga, M.: Verlustfaktor-Korrektur der Schalldämmung bei gefülltem Ziegelmauerwerk. Bauphysik 32 (2010), H. 1, S. 17 - 26.
- [27] Jacqus, G.; Jean, P.; Berger, S.; Gibiat, V.; Villot, M.; Ciukaj, S.: Experimental and Numerical Identification of Lamb Waves in Hollow Brick Walls. Acta Acustica 98 (2012), S. 928 - 935.
- [28] Kernöcker, R.; Schild, R.: Schalldämmung von Ziegelwänden mit WDVS. Broschüre der Sto Ges. m.b.H. und des Zieglerverbandes für Oberösterreich und Salzburg (Herausgeber), 2009.
- [29] Hongisto, V.: Sound insulation of double panels - Comparison of existing prediction models. Acta Acustica 92 (2006), S. 61 - 78.
- [30] Sharp, B. H.: Prediction methods for the sound transmission of building elements. Noise Control Engineering Journal 11 (1978), S. 53 - 63.
- [31] 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.

- [32] DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärm-spektrum (Nov. 1997).
- [33] Gösele, K.: Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. *Acustica* 20 (1968), S. 334 - 342.
- [34] Weber, L.; Koch, S.: Anwendung von Spektrum-Anpassungswerten - Teil 1: Luftschalldämmung. *Bauphysik* 21 (1999), H. 4, S. 167 - 170.
- [35] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen (Aug. 1987).
- [36] DIN EN ISO 10140-1 bis -5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand (Dez. 2010 bis Sept. 2014).
- [37] Weber, L.; Dietz, D.; Brandstetter, K.-D.: Formatabhängigkeit der Schalldämmung von Verglasungen. *Fortschritte der Akustik - DAGA 2014 (Oldenburg)*, Tagungs-CD, S. 652 - 653.
- [38] DIN 4109-32: Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Eingangsdaten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Massivbau (Entwurf, Nov. 2013).
- [39] Schmidt, H.: *Schalltechnisches Taschenbuch - Schwingungskompodium*. VDI Verlag, 5. Aufl. (1996), S. 281.
- [40] Cremer, L.; Heckl, M.: *Körperschall*. Springer-Verlag, 2. Auflage (1996), Abschnitt 3.5.2.
- [41] 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.
- [42] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen (Entwurf, Nov. 2013).
- [43] Beschlussbuch des Arbeitskreises der Prüfstellen für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse für den Schallschutz im Hochbau (AK Schallprüfstellen), Abschnitt 4.6, Stand Sept. 2011.
- [44] DIN EN 12354-1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (Dez. 2000).
- [45] Weber, L.; Buchele, A.: Akustische Sanierung von Wohngebäuden mit Vorsatzschalen und Vorsatzkonstruktionen - Berechnung, Planung, Optimierung. IBP-Bericht B-BA 2/2008 im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Aug. 2009.
- [46] EN 12354-1: Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms (Entwurf, Sept. 2014).

- [47] Weber, L.: WDV-Systeme zum Thema Schallschutz. Technische Systeminfo 7 des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Herausgeber), Jan. 2013.
- [48] Beschlussbuch des DIBt SVA B2 "Schalldämmung und Schalldämmstoffe", Beschluss-Nr. 3.22, S. 1 - 4, Stand März 2010.
- [49] Beiblatt 1 zu DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren (Nov. 1989).
- [50] Beiblatt 3 zu DIN 4109: Schallschutz im Hochbau - Berechnung von $R'_{w,R}$ für den Nachweis der Eignung nach DIN 4109 aus Werten des im Labor ermittelten Schalldämm-Maßes R_w (Juni 1996).
- [51] Blevins, R. D.: Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing Company, Reprint Edition 2001, S. 48, Tab. 6-2.
- [52] Maysenhölder, W.: Eindimensionales bauakustisches Berechnungsprogramm auf der Grundlage von Transfermatrizen. IBP-Eigenentwicklung, Dez. 2014.
- [53] Prüfbericht PB 4.2/06-355-1 der MFPA Leipzig GmbH im Auftrag der Knauf Marmorit GmbH (Juni 2007).
- [54] Beckmann, K. et. al.: Mobilität 2020 - Perspektiven für den Verkehr von morgen, Schwerpunkt: Straßen- und Schienenverkehr. acatech - Konvent für Technikwissenschaften (Herausgeber), Fraunhofer IRB Verlag (2006).
- [55] Büringer, H.; Schmidtmeier, D.: Straßenverkehr in Baden-Württemberg - Fahrleistungen und Emissionen. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 11/2011, S. 5 - 13.
- [56] Kienzlen, V.; Erhorn, H.; Krapmeier, H.; Lützkendorf, T.; Werner, J.; Wagner, A.: Über den Sinn von Wärmedämmung - Argumente zur Überwindung von Missverständnissen - Positionspapier 4/2014. Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA), u. a., April 2014.
- [57] Sprengard, C.; Tremel, S.; Holm, A. H.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe - Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen. Forschungsbericht FO-12/12 des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. München (FIW München), November 2013.
- [58] Scheibengraf, M.; Reisinger, H.: Abfallvermeidung und -verwertung: Baurestmassen - Detailstudie zur Entwicklung einer Abfallvermeidungs- und verwertungsstrategie für den Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006. Report REP-0009 des Umweltbundesamtes, ISBN 3-85457-808-3 (2005).
- [59] Bandyopadhyay, A.; Chandra Basak, G.: Studies on photocatalytic degradation of polystyrene. Materials Science and Technology. 23, Nr. 3 (2007), S. 307 - 317.
- [60] Krueger, N.; Hofbauer, W.; Schwerd, R.; Breuer, K.: Biozide - Algen und Pilze ade? Farbe und Lack, H. 02.2014, S. 48 - 53.
- [61] EPS-Loop: Recycling von EPS-Abfall zu re-expandierbarem Polystyrol. Forschungsvorhaben des Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV),

- Mitteilung auf der Webseite des IVV (<http://www.ivv.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/kunststoff-rezyklate/recycling-eps-abfall>), Jan. 2015.
- [62] CreaSolv® Prozess, Mitteilung auf der Webseite der CreaCycle GmbH (<http://www.creacycle.de/de/der-prozess.html>), Jan. 2015.
- [63] Verfahren zum Recycling von Kunststoffen und dessen Verwendung. Patent DE 10 2005 026 451 A1 2006.12.14, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Erfinder: Mäurer, A.; Schlummer, M.; Beck, O. (veröffentlicht Dez. 2006).
- [64] Weber, L.; Müller, S.: Technische Stellungnahme zur Schalldämmung von Massivwänden mit zweilagigem Wärmedämm-Verbundsystem. Stellungnahme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag der DAW Stiftung & Co KG, Geschäftsbereich alsecco (Jan. 2014)
- [65] Weber, L.; Müller, S.: Schalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit zweilagiger Dämmschicht. Forschungsvorhaben des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), in Bearbeitung.

13 Danksagung

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

- den an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern (Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e.V., UNIPOR Ziegel Marketing GmbH, Knauf Marmorit GmbH und Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V.) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens, die Bereitstellung von Baumaterialien und die bautechnische Beratung,
- Herrn Prof. Dr. Waldemar Maysenhölder für die Durchführung bauakustischer Berechnungen und die fachliche Begleitung des Forschungsvorhabens,
- Herrn Prof. Dr. Schew-Ram Mehra für die Mitwirkung im Beratergremium,
- Herrn Bernd Kaltbeitzel und Frau Christina Brandt für Messungen der dynamischen Steifigkeit sowie Verkehrslärmmessungen,
- Herrn Thomas Glaser für die gewissenhafte und sorgfältige Durchführung der meisten handwerklichen Arbeiten.

Anhang

A.1 Berechnungsverfahren für Holzständerwände

$\Delta R_{w,WDVS}$: 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>
$K_{Dämmstofftyp} =$	$\begin{cases} -4 \text{ dB} & \text{für WDVS aus elastifiziertem EPS} \\ -2 \text{ dB} & \text{für WDVS aus EPS} \\ 0 \text{ dB} & \text{für WDVS aus MF} \\ 1 \text{ dB} & \text{für WDVS aus HWF} \end{cases}$
$K_{Montage} =$	$\begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{Bei vollflächiger Verklebung} \\ 3 \text{ dB} & \text{Bei punktwiseiger Verklebung} \\ 3 \text{ dB} & \text{Bei Verschraubung ohne Anpressdruck} \end{cases}$
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 der Schalldämmung durch WDVS auf Holzständerwänden. Auszug aus dem Forschungsbericht 310 2910 des ift Rosenheim [31], Abschnitt 5, Seite 39.