

# Schalldämmung von Wärmedämm- Verbundsystemen mit zweilagiger Dämmschicht

**T 3341**

T 3341

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9797-5

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

IBP-Bericht B-BA 1/2016

## Schalldämmung von Wärmedämm-Verbundsystemen mit zweilagiger Dämmschicht

Das durchgeführte Forschungsvorhaben erfolgte im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Aktenzeichen: P 52-5-5.117-1467/15

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

38 Seiten Text

3 Tabellen

28 Abbildungen

Dr. Lutz Weber

M.Sc. Bernd Kaltbeitzel

Stuttgart, 31.05.2016

Institutsleiter



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

Abteilungsleiter



Dr.  
Peter Brandstät

Bearbeiter



Dr.  
Lutz Weber

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>WDVS mit zweilagiger Dämmschicht</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlagen	3
2.2	Bisheriger Kenntnisstand	4
2.3	Offene Fragen	5
2.4	Vorgehensweise	6
2.5	Prüfaufbauten - verwendete Baustoffe	7
2.5.1	Dämmstoffe	7
2.5.2	Putz und Mörtel	8
2.5.3	Klebstoff	9
2.6	Prüfaufbauten - Herstellung und Einbau	9
2.6.1	Herstellung der Aufbauten	9
2.6.2	Einbau in den Fensterprüfstand	13
2.6.3	Grundwände	14
2.7	Voruntersuchungen	16
2.7.1	Dynamische Steifigkeit	16
2.7.2	Einlagige Referenzsysteme aus EPS und EPS <sub>e</sub>	18
2.7.3	Einlagiges Referenzsystem aus EPS mit Dübeln	20
2.8	Messergebnisse	21
2.8.1	Zweilagiges WDVS aus unterschiedlichen Dämmplatten	21
2.8.2	Zweilagiges WDVS mit und ohne Dübel	23
2.8.3	Zweilagiges WDVS mit erhöhter Putzdicke	23
2.8.4	Ein- und zweilagiges WDVS aus Mineralfaser	24
2.8.5	WDVS aus Mineralfaser mit erhöhter Putzdicke	26
<b>3</b>	<b>Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 12354-1</b>	<b>27</b>
3.1	Vorhandene Messdaten	28
3.2	Untersuchte Berechnungsverfahren	29
3.2.1	CEN-Verfahren	30
3.2.2	IBP-Verfahren	31
3.2.3	Unterschiede zwischen CEN- und IBP-Verfahren	32
3.3	Ergebnisse	32
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>38</b>

# 1 Aufgabenstellung

Bei der Herstellung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) kommen aus logistischen und finanziellen Gründen zunehmend Konstruktionen zum Einsatz, bei denen die Dämmschicht aus zwei miteinander verklebten Dämmstofflagen besteht. Es soll untersucht werden, inwieweit das bei bauaufsichtlichen Zulassungen für einlagige WDVS eingesetzte Berechnungsverfahren auch hier anwendbar ist, oder ob gegebenenfalls Modifikationen des Verfahrens erforderlich sind.

Die Untersuchungen erfolgen auf experimenteller Basis durch Vergleichsmessungen an verschiedenen WDVS mit ein- und zweilagiger Dämmschicht. Die erforderlichen Schalldämm-Messungen werden an einem Wandausschnitt mit einer Fläche von ca. 1,8 m<sup>2</sup> in einem bauakustischen Prüfstand durchgeführt. Durch Abgleich der ermittelten Messdaten mit Rechenwerten werden die Anwendbarkeit des derzeitigen (vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik für einlagige WDVS entwickelten) Berechnungsverfahrens überprüft und soweit erforderlich geeignete Korrekturen zur Anpassung des Verfahrens an WDVS mit zweilagiger Dämmschicht erarbeitet.

Des Weiteren wird untersucht, welche Unterschiede zwischen dem derzeitigen Berechnungsverfahren für WDVS und dem neuen vereinfachten Modell aus dem Entwurf der DIN EN ISO 12354-1 vom März 2016 [1] bestehen. Da das vereinfachte Modell mittel- und langfristig in die DIN 4109 und in den Bereich der Zulassung einfließen soll, ist es erforderlich, die Auswirkungen vorab zu überprüfen.

## 2 WDVS mit zweilagiger Dämmschicht

### 2.1 Grundlagen

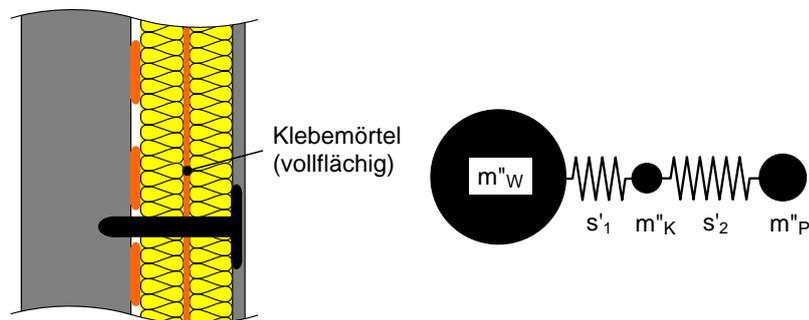
Übliche WDVS bestehen aus einlagigen Dämmstoffplatten, die auf die Grundwand aufklebt und anschließend verputzt werden. Hierdurch entsteht ein schwingungsfähiges System aus einer Feder (der Dämmschicht) und zwei Massen (Trägerwand und Putzschicht). Die akustischen Eigenschaften eines solchen Systems sind gut bekannt und können mit geeigneten Modellen berechnet werden.



**Abb. 1:** Aufbau und akustisches Modell (Masse-Feder-Masse-System) eines einlagigen WDVS. Hierbei bezeichnen  $m''_w$  die flächenbezogene Masse der

Grundwand,  $s'$  die dynamische Steifigkeit der Dämmung und  $m''_p$  die flächenbezogene Masse der Putzschicht.

Bei zweilagigen WDVS setzt sich die Dämmschicht aus zwei miteinander verklebten Dämmstofflagen zusammen. Da die Verbindung der beiden Lagen normalerweise durch eine mehrere Millimeter dicke Schicht aus mineralischem Klebemörtel erfolgt, wirkt der Mörtel als eine zusätzliche Masse, so dass ein akustisches System entsteht, das aus zwei Federn und drei Massen besteht (siehe Abb. 2). Neben der Grundresonanz, die auch bei einlagiger Dämmschicht vorhanden ist, treten hier noch weitere Resonanzen bei höheren Frequenzen in Erscheinung, die sich ähnlich wie die Grundresonanz als Einbrüche in der Schalldämmkurve äußern. Die Lage und Tiefe dieser Einbrüche bestimmt, wie stark sich die Schalldämmung von ein- und zweilagigen WDVS voneinander unterscheidet.



**Abb. 2:** Zweilagiges WDVS mit zugehörigem akustischem Modell. Die Bezeichnungen sind analog zu Abb. 1 gewählt, wobei jedoch zwischen der dynamischen Steifigkeit der inneren und der äußeren Dämmschicht,  $s'_1$  und  $s'_2$ , sowie zwischen zwei schwingenden Massen (flächenbezogene Masse der Klebeschicht  $m''_k$  und der Putzschicht  $m''_p$ ) zu unterscheiden ist.

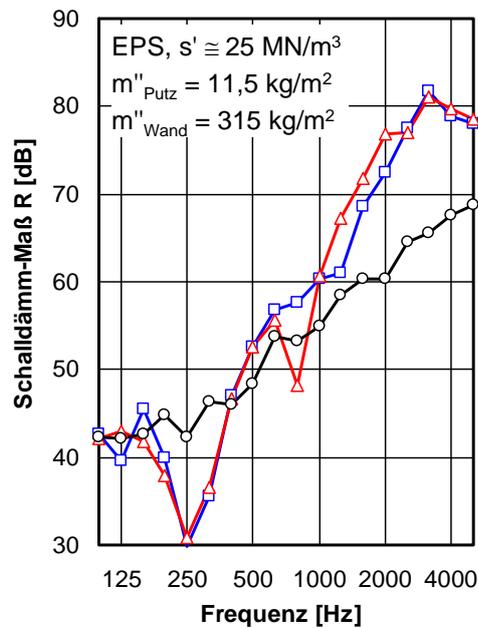
## 2.2 Bisheriger Kenntnisstand

Im Fraunhofer-Institut für Bauphysik wurden im Jahr 2013 erste Messungen an zweilagigen WDVS durchgeführt [2]. Die hierbei ermittelten Messergebnisse entsprachen im Wesentlichen den Erwartungen und ließen trotz deutlich sichtbarer Abweichungen im Frequenzverlauf der Schalldämmkurve bei den Einzahlangaben (bewertetes Schalldämm-Maß  $R_w$  und Spektrum-Anpassungswert  $C_{tr,50-5000}$ ) nur verhältnismäßig geringe Unterschiede erkennen. Dies ist der Grund, weshalb das derzeit für einlagige WDVS zur Bestimmung der Einzahlangaben verwendete Berechnungsverfahren mit hinreichender Genauigkeit auch hier eingesetzt werden kann.

Ein Beispiel für die durchgeführten Messungen (Vergleich eines ein- und eines zweilagigen WDVS mit ansonsten gleichem Aufbau) ist in Abb. 3 dargestellt. Bis zu einer Frequenz, die etwa dem Zweifachen der Grundresonanz entspricht, verlaufen die beiden Schalldämmkurven weitgehend identisch. Oberhalb davon ist bei dem zweilagigen Aufbau in einem verhältnismäßig schmalen Frequenzbereich von etwa zwei Terzen ein Dämmungseinbruch infolge einer zusätzlichen Resonanz erkennbar. Über dieser Reso-

nanz ergibt sich durch die zweilagige Dämmung, wie bei derartigen Systemen üblich, eine zusätzliche Verbesserung der Schalldämmung.

Bezogen auf die akustisch maßgeblichen Einzulangaben  $R_w$  und  $R_w + C_{tr,50-5000}$  beträgt der Unterschied zwischen der ein- und der zweilagigen Dämmung maximal etwa  $\pm 0,5$  dB. Dieser Wert liegt unterhalb der normalen Messunsicherheit (die Standardunsicherheit für Schalldämm-Messungen im Prüfstand nach DIN EN ISO 12999-1 [3] beträgt 1,2 dB) und ist deshalb in der baulichen Praxis im Normalfall nicht relevant.



Aufbau	Schalldämm-Maß [dB]	
	$R_w$	$R_w + C_{tr,50-5000}$
einlagig, 1 x 300 mm	51,5	42,6
zweilagig, 2 x 150 mm	50,4	43,4
Betonwand ohne WDVS	54,6	49,4

**Abb. 3:** Beispiel für die Schalldämmung eines ein- und eines zweilagigen WDVS aus expandiertem Polystyrol (EPS) an einer Betonwand [2]. Abgesehen von der zweigeteilten Dämmschicht waren beide Systeme gleich aufgebaut.

### 2.3 Offene Fragen

Die oben dargestellten Messungen beschränkten sich auf unverdübelt Systeme mit einer Dämmschicht aus expandiertem Polystyrol (EPS), wobei die beiden Dämmstofflagen jeweils aus demselben Material bestanden (d. h. gleiche Werte von Dichte und dynamischer Steifigkeit aufwiesen). Andere Konstruktionen wurden bislang nicht untersucht. Nach Rücksprache mit dem DIBt sind daher derzeit noch folgende Fragen offen:

- Wie verhalten sich WDVS, die aus zwei unterschiedlichen Dämmstofflagen (z. B. mit verschiedener dynamischer Steifigkeit) bestehen?

- Welchen Einfluss haben Dübel auf die Schalldämmung zweilagiger WDVS? Beim Vorhandensein von Dübeln ist zwar im Prinzip eine Verringerung der akustischen Unterschiede zwischen ein- und zweilagigen Systemen zu erwarten, dies sollte aber sicherheitshalber an einem Beispiel messtechnisch überprüft werden.
- Wie wirkt sich die Art der Verklebung (Klebeflächenanteil, Klebstoffdicke, etc.) auf die Schalldämmung zweilagiger Dämmsysteme aus? Hierbei ist insbesondere auch das Masseverhältnis zwischen der Klebeschicht und der äußeren Putzschicht von Interesse.
- Gelten die bislang für EPS gewonnenen Erkenntnisse in gleicher Weise auch für andere Dämmstoffe wie z. B. Mineralfaser?

## 2.4 Vorgehensweise

Die Beantwortung der obigen Fragen erfolgte durch systematische messtechnische Untersuchungen. Um Zeit und Kosten zu sparen, wurden die betrachteten WDVS dabei auf eine 120 cm x 145 cm große Stahlbetonplatte geklebt, die mit dem Gabelstapler in die Prüföffnung eines bauakustischen Fensterprüfstandes gehoben und dort umlaufend elastisch abgedichtet wurde. Die Messung der Schalldämmung erfolgte dann in der üblichen Art und Weise nach DIN EN ISO 10140-2 [4].

Die hierzu durchgeführten Voruntersuchungen belegen, dass sich die mit diesem Aufbau gemessenen Schalldämm-Maße bei Wänden aus Beton oder Mauerwerk im Allgemeinen nur wenig von großflächigen Bauteilen unterscheiden. Für die Veränderung der Schalldämmung der Grundwand durch ein WDVS (dies ist im vorliegenden Fall die eigentlich relevante Messgröße) ist der Unterschied so gut wie vernachlässigbar. Der beschriebene Aufbau ist für die hier betrachtete Fragestellung somit gut geeignet.

Im Folgenden ist die für die Untersuchungen verwendete Vorgehensweise in ihren wichtigsten Punkten in kurzer Form dargestellt:

- Die Untersuchungen umfassten eine Messreihe an neun verschiedenen WDVS. Neben der Schalldämmung der untersuchten Systeme wurde außerdem durch Messung nach DIN EN 29 052-1 [5] die dynamische Steifigkeit der untersuchten Dämmstoffe bestimmt. Bei dem verwendeten Mineralfaser-Dämmstoff wurde zusätzlich der längenbezogene Strömungswiderstand ermittelt (DIN EN 29053 [6]).
- Die Schalldämm-Messungen erfolgten in einem bauakustischen Fensterprüfstand mit einer genormten Prüföffnung von  $B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ . Als Grundwand bei allen Messungen dienten baugleiche Stahlbetonplatten mit Abmessungen von jeweils  $B \times H \times D = 1,20 \text{ m} \times 1,45 \text{ m} \times 0,13 \text{ m}$ , einer flächenbezogenen Masse von  $m'' \cong 315 \text{ kg/m}^2$  und einem bewerteten Schalldämm-Maß von  $R_w \cong 55 \text{ dB}$ .
- Bei den Untersuchungen wurden drei verschiedene Dämmstoffe betrachtet:
  - expandiertes Polystyrol (EPS) mit einer dynamischen Steifigkeit von  $s' = 39 \text{ MN/m}^3$ ,
  - elastifiziertes EPS (EPSe) mit  $s' = 13 \text{ MN/m}^3$  und
  - Mineralfaser-Lamellenplatten mit  $s' = 43 \text{ MN/m}^3$ .

- Die untersuchten Systeme wiesen entweder eine einlagige Dämmschicht mit einer Dicke von  $d = 200$  mm oder eine zweilagige Dämmung aus zwei 100 mm dicken Dämmstofflagen auf. Bei einigen Systemen bestanden die beiden Lagen aus dem gleichen, bei anderen Systemen hingegen aus unterschiedlichem Material. Neben der Art des Dämmstoffs wurden außerdem die Dicke der Klebeschicht, die Putzdicke und die Befestigungsart (mit oder ohne Dübel) variiert. Die Messwerte wurden sowohl untereinander als auch mit Berechnungsergebnissen verglichen. Zur Berechnung der Schalldämmung wurde dabei das derzeit in der bauaufsichtlichen Zulassung eingesetzte Verfahren verwendet [7, 8].
- Grundlegende Bedingung für den akustischen Vergleich zwischen ein- und zweilagigen Dämmsystemen ist, dass in beiden Fällen der gleiche Dämmstoff zum Einsatz kommt. Bei handelsüblichen Dämmplatten mit unterschiedlicher Dicke ist dies jedoch erfahrungsgemäß in der Regel nicht der Fall, selbst wenn die Platten nach Herstellerangabe den gleichen Elastizitätsmodul aufweisen. Um gleiche Materialeigenschaften sicherzustellen, wurden die für die Untersuchungen benötigten 200 mm dicken Dämmplatten daher aus zwei 100 mm dicken Platten zusammengeklebt. Die Verklebung erfolgte vollflächig mit einer sehr dünnen Schicht aus elastischem Dispersionskleber (Schichtdicke  $d \leq 0,5$  mm, flächenbezogene Masse  $m'' \leq 0,5$  kg/m<sup>2</sup>).
- Die Aufbringung der WDVS auf die Betonplatten erfolgte durch einen erfahrenen Handwerker außerhalb des Prüfstands. Da drei gleichartige Betonplatten zur Verfügung standen, konnten jeweils mehrere WDVS gleichzeitig hergestellt werden. Einbaubedingungen und Bauteileigenschaften (z. B. Dicke und flächenbezogene Masse von Klebe- und Putzschicht) wurden dabei genau dokumentiert. Nach ca. zwei Wochen Trocknungsdauer wurden die Prüfaufbauten dann mit dem Gabelstapler in die Prüföffnung des Fensterprüfstandes gehoben, umlaufend abgedichtet und akustisch vermessen.

## 2.5 Prüfaufbauten - verwendete Baustoffe

Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Prüfaufbauten ist in den Abschnitten des vorliegenden Berichts enthalten, in denen die für den jeweiligen Aufbau ermittelten Messergebnisse dargestellt sind. Im Folgenden werden deshalb lediglich in kurzer Form die für die Aufbauten verwendeten Baustoffe beschrieben. Informationen zur Herstellung der Prüfaufbauten und zum Einbau in den Prüfstand sind Ziffer 2.6 zu entnehmen.

### 2.5.1 Dämmstoffe

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden drei verschiedene Dämmstoffe verwendet. Im Folgenden sind die Bezeichnungen und die wichtigsten technischen Daten der Dämmstoffe aufgeführt. Die für die dynamische Steifigkeit  $s'$  angegebenen Werte beziehen sich jeweils auf eine Dämmstoffdicke von  $d = 100$  mm.

EPS      expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten, nicht elastifiziert  
 FEMA-Energiesparplatten Weiß-Blau EPS 035 WDV

d = 100 mm, Rohdichte ca. 20 kg/m<sup>3</sup>, Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,035$  W/(mK),  
Lieferformat 500 mm x 1000 mm  
s' laut Hersteller: keine Angabe  
s' nach DIN EN 29052-1: 38,6 MN/m<sup>3</sup>  
s' aus Schalldämmkurve: 65 MN/m<sup>3</sup>

EEPS elastifizierte EPS-Platten  
FEMA-Fassaden-Dämmplatten neoWall 035-E  
d = 100 mm, Rohdichte ca. 20 kg/m<sup>3</sup>, Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,035$  W/(mK),  
Lieferformat 500 mm x 1000 mm  
s' laut Hersteller:  $\leq 17$  MN/m<sup>3</sup>  
s' nach DIN EN 29052-1: 13,0 MN/m<sup>3</sup>  
s' aus Schalldämmkurve: 7,4 MN/m<sup>3</sup>

MFL Mineralfaser-Lamellenplatten  
FEMA-Steinlamellen-Dämmplatten Speedrock II  
d = 100 mm, Rohdichte ca. 80 kg/m<sup>3</sup>, Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,041$  W/(mK),  
Lieferformat 200 mm x 1200 mm  
s' laut Hersteller: keine Angabe  
s' nach DIN EN 29052-1: 42,4 MN/m<sup>3</sup>  
s' aus Schalldämmkurve: 152 MN/m<sup>3</sup>  
längenbezogener Strömungswiderstand:  $r \cong 28$  kPa s/m<sup>2</sup>  
Anmerkung: Da die Faserrichtung bei Lamellenplatten senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist, weisen die Platten eine vergleichsweise hohe dynamische Steifigkeit auf.

## 2.5.2 Putz und Mörtel

Zum Verputzen und Verkleben der Dämmplatten wurde bei allen Prüfaufbauten der gleiche Mörtel verwendet:

FEMA-THERM-Pulverkleber grau: hydraulisch abbindender, kunstharzvergüteter Klebe- und Beschichtungsmörtel, Trockenrohichte  $\rho = 1350$  kg/m<sup>3</sup> (eigene Messung).

Der Mörtel wurde an folgenden Stellen eingesetzt:

- Befestigung der Dämmplatten auf der Grundwand (Betonplatte):  
Aufbringen des Mörtels im Punkt-Wulst-Verfahren mittels einer hierfür angefertigten Schablone (siehe unten), Klebeflächenanteil 38 %, Mörteldicke 8 mm.
- Verklebung der Platten untereinander:  
Vollflächige Verklebung, Mörteldicke je nach Aufbau d = 3,0 mm bzw. d = 6,0 mm, resultierende flächenbezogene Masse  $m'' = 4,05$  kg/m<sup>2</sup> bzw.  $m'' = 8,1$  kg/m<sup>2</sup>.
- Außenputz auf der Oberseite der Dämmplatten:  
Auftragung in gleichmäßiger Dicke mittels Putzschiene, eingebettetes Armierungsgewebe, kein Oberputz, Putzdicke je nach Aufbau d = 8,0 mm bzw. d = 16,0 mm.

mm, resultierende flächenbezogene Masse  $m'' = 10,8 \text{ kg/m}^2$  bzw.  $m'' = 21,6 \text{ kg/m}^2$ .

### 2.5.3 Klebstoff

Bei Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass sich Dämmstoffplatten unterschiedlicher Dicke in ihrem Elastizitätsmodul stark voneinander unterschieden, obgleich die Platten nach Herstellerangabe aus dem gleichen Material bestanden. Zur Herstellung homogener, einlagiger Dämmplatten mit 200 mm Dicke wurden deshalb jeweils zwei gleiche 100 mm dicke Platten zusammengeklebt. Hierdurch war gewährleistet, dass alle untersuchten Proben unabhängig von ihrer Dicke die gleichen elastischen Eigenschaften aufwiesen. Die Verklebung erfolgte vollflächig mit einem elastischen Dispersionskleber, der mit sehr geringer Schichtdicke (maximal ca. 0,5 mm) auf die Platten aufgetragen wurde. Hierdurch ergab sich eine vollflächige kraftschlüssige Verbindung zwischen den Platten, ohne dass wesentliche 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 nur von verhältnismäßig geringer Bedeutung.

Für die beschriebene Herstellung der 200 mm dicken einlagigen Dämmplatten wurde folgender Klebstoff verwendet:

Dispersionskleber: FEMA-Dispersionskleber fein  
Dichte ca.  $1,2 \text{ kg/dm}^3$

## 2.6 Prüfaufbauten - Herstellung und Einbau

Die Herstellung der Prüfaufbauten erfolgte wie schon erwähnt außerhalb des Prüfstandes. Nach einer Trocknungsdauer von ca. 14 Tagen wurden die Aufbauten dann mit dem Gabelstapler in die Einbauöffnung des Fensterprüfstands gehoben und dort umlaufend abgedichtet. Anschließend erfolgte dann die Messung der Schalldämmung. Die technischen Daten und die Massen der verschiedenen Bestandteile der Aufbauten wurden bereits bei der Herstellung bestimmt. Vor dem Abriss und der Entsorgung wurden die Aufbauten dann zusätzlich noch einmal als Ganzes gewogen.

### 2.6.1 Herstellung der Aufbauten

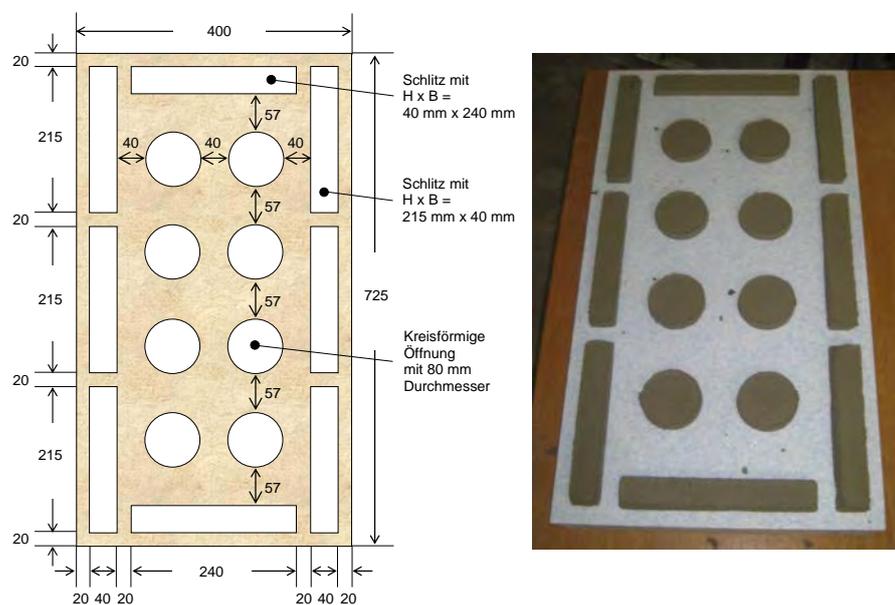
Abgesehen von den Unterschieden zwischen ein- und zweilagigen Systemen war die Vorgehensweise zur Herstellung der Prüfaufbauten bei allen Aufbauten vom Prinzip her gleich. Im Folgenden werden die erforderlichen Arbeitsschritte in kurzer Form beschrieben:

#### **Schritt 1:** Montage der Dämmung an der Grundwand

Die Befestigung der Dämmstoffplatten an der Grundwand erfolgte mit Klebemörtel, der im Punkt-Wulst-Verfahren mit einer einheitlichen Schichtdicke von 8 mm auf die Dämmstoffplatten aufgetragen wurde. Anschließend wurden die Platten dann mit ein-

heitlichem Druck leicht an die Grundwand angedrückt. Als Grundwand dienten drei baugleiche Stahlbetonplatten mit einer Dicke von 13 cm und den Maßen  $B \times H = 1,20 \text{ m} \times 1,45 \text{ m}$ .

Zur reproduzierbaren Verklebung der WDVS mit der Grundwand wurde die in Abb. 4 dargestellte Schablone (Lochfläche insgesamt ca. 38 %) verwendet, mit der der benötigte Klebemörtel unter genau definierten geometrischen Bedingungen auf die Dämmplatten aufgebracht wurde. 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 erhöht, wurde für die Berechnung der Schalldämmung von einem Klebeflächenanteil von 40 % ausgegangen.



**Abb. 4:** Schablone zur reproduzierbaren Auftragung des Klebemörtels auf die Dämmstoffplatten (links) und fertig beschichtete EPS-Platte vor der Anbringung an der Grundwand (rechts).

### Schritt 2: Aufkleben der zweiten Plattenlage

Nach der Befestigung der Dämmplatten an der Grundwand bestand bei zweilagigen Systemen der nächste Arbeitsschritt in der Anbringung der zweiten Dämmstofflage. Dies erfolgte durch vollflächige Verklebung unter Verwendung von handelsüblichem Klebemörtel. Die Dicke der Mörtelschicht betrug je nach Aufbau entweder  $d = 3 \text{ mm}$  oder  $d = 6 \text{ mm}$ , was einer flächenbezogenen Masse des Klebemörtels von  $m'' = 4,1 \text{ kg/m}^2$  oder  $m'' = 8,2 \text{ kg/m}^2$  entspricht. Die zweite Dämmstofflage wurde so aufgebracht, dass sie gegenüber der ersten Lage versetzte Plattenstöße aufwies.

### Schritt 3: Aufbringen des Außenputzes

Als Außenputz wurde der Einfachheit halber der gleiche Mörtel verwendet, der auch bei der Befestigung und Verklebung der Dämmstoffplatten Verwendung fand. Das Aufbringen des Außenputzes erfolgte praxisgerecht mit eingebettetem Armierungsgewebe. Die Schichtdicke des Putzes betrug je nach Aufbau entweder  $d = 8 \text{ mm}$  oder bzw.  $d = 16 \text{ mm}$  (zugehörige flächenbezogene Masse der Putzschicht  $m'' = 10,8 \text{ kg/m}^2$  oder  $m'' = 21,6 \text{ kg/m}^2$ ). Zwei Beispiele für fertige Prüfaufbauten sind in Abb. 5 dargestellt:



**Abb. 5:** Beispiele für zwei fertige Messaufbauten vor dem Einbau in den Fensterprüfstand. Dargestellt ist jeweils die seitliche Ansicht. Das linke Bild zeigt ein zweilagiges WDVS aus zwei unterschiedlichen Dämmstoffen (erkennbar an den verschiedenen Farben der beiden Dämmstofflagen). Im rechten Bild ist ein einlagiges System aus Mineralfaser dargestellt (wie oben erläutert besteht die 200 mm dicke Dämmschicht hier ebenfalls aus zwei gleichartigen 100 mm dicken Platten, die allerdings statt mit Mörtel mit einer sehr dünnen Schicht von Dispersionskleber verbunden sind).

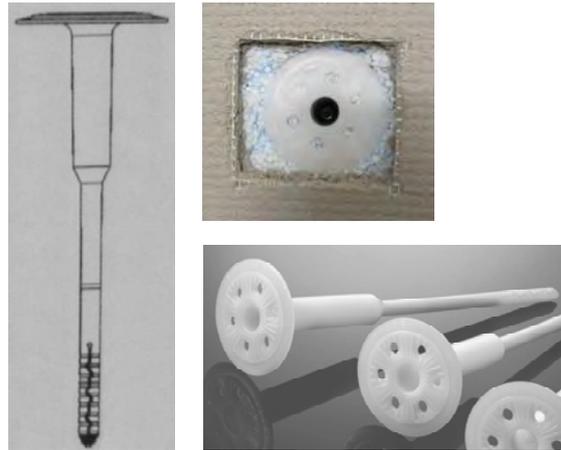
Da sich die flächenbezogene Masse der Putzschicht über die Resonanzfrequenz in starkem Maße auf die Schalldämmung auswirkt, sind reproduzierbare und vergleichbare Messungen nur bei konstanter Putzdicke möglich. Um eine einheitliche Dicke der Putzschicht zu erreichen, wurden an den Rändern der Dämmplatten Putzschienen angebracht, mit deren Hilfe der aufgetragene Putz mittels eines Glattscheits auf die gewünschte Dicke abgezogen wurde.

#### **Schritt 4:** Verdübelung

Bei einigen Versuchsaufbauten erfolgte die Befestigung des WDVS sowohl mit als ohne Dübel. Ziel hierbei war es, den akustischen Einfluss der Dübel zu untersuchen, indem die Schalldämmung des unverdübelten und des verdübelten Systems miteinander verglichen wurde. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, d. h. bis auf die Verdübelung alle anderen Konstruktionsparameter unverändert zu lassen, wurden die Dübel

nachträglich eingebaut. Es wurde also zunächst ohne Dübel gemessen, dann wurden die Dübel eingesetzt und die Messung wurde noch einmal wiederholt.

Zum nachträglichen Einbau der Dübel wurde zunächst die vorhandene Putzschicht lokal entfernt. Anschließend wurde dann der Dübel montiert und der Putz über dem Dübel wieder verschlossen. Position und Anzahl der Dübel waren bei allen Aufbauten gleich. Es wurden jeweils 7 Dübel je Prüfaufbau verwendet, was in etwa der bauüblichen Menge von 4 Dübeln pro Quadratmeter entspricht. Aufbau, Montage und Position der Dübel sind in Abb. 6 und 7 anhand von Fotos dargestellt.



**Abb. 6:** Aufbau der verwendeten Dübel (links und recht unten) sowie nachträglicher Einbau in die lokal geöffnete Putzschicht (rechts oben).



**Abb. 7:** Position der Dübel auf der Oberfläche des WDVS (links) und wiederhergestellte Putzschicht nach dem Einbau der Dübel (rechts).

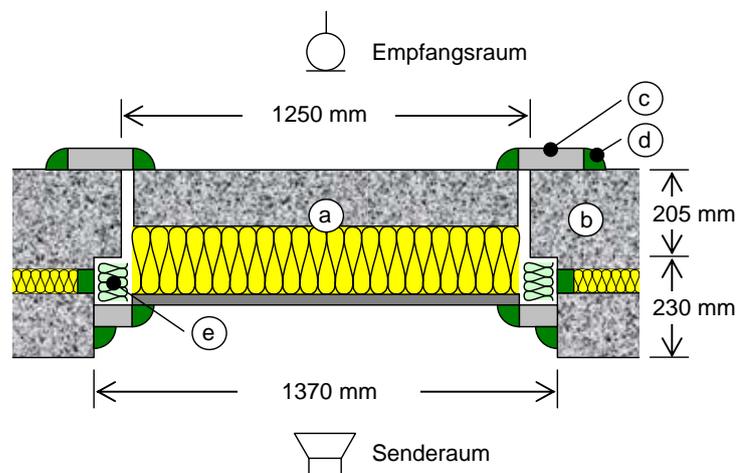
Bei den verwendeten Dübeln handelte es sich um bauaufsichtlich zugelassene Schraubdübel des Typs Fema-Therm-Schraubdübel STR U 2 G mit einer Länge von 255 mm (identisch mit dem Dübel ejothem STR U 2G der Firma EJOT). Der Dübel ist sowohl für vertiefte als auch für oberflächenbündige Montage in der Dämmschicht geeignet. Da der Einfluss auf die Schalldämmung bei vertiefter Montage erfahrungsgemäß nur gering ist (der akustische Einfluss von Dübeln ist vor allem darauf zurückzuführen, dass

die Dübel eine starre Verbindung - eine sogenannte Körperschallbrücke - zwischen Putzschicht und Grundwand herstellen), wurden die Dübel im vorliegenden Fall oberflächenbündig eingebaut, so dass der Dübelteller direkten Kontakt zur Putzschicht hatte.

## 2.6.2 Einbau in den Fensterprüfstand

Nach Fertigstellung und Trocknung wurden die Versuchsaufbauten als Ganzes in den Fensterprüfstand verbracht und in die dortige Prüföffnung eingebaut. Um einen Transport mit dem Gabelstapler zu ermöglichen, befanden sich an der Unterseite der der Prüfkörper zwei Aussparungen, in die sich die Gabel einschieben ließ (siehe Ziffer 2.6.3). Vor der Messung wurden die Aussparungen mit zwei Holzklötzen passender Größe verschlossen und beidseitig abgedichtet.

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 bzw. Stahlblech umlaufend mit plastischem bzw. elastischem Dichtstoff (Terostat oder Acryl) 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. 8 dargestellt:



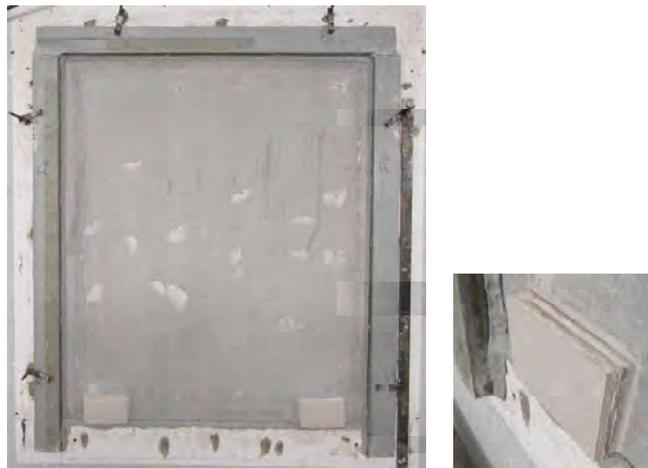
- a) Prüfkörper (Grundwand mit WDVS),  $B \times H = 1200 \text{ mm} \times 1450 \text{ mm}$
- b) Zweischalige Trennwand des Fensterprüfstands mit genormter Einbauöffnung
- c) Dichtleisten aus Gipskarton (im Senderaum) bzw. Stahlblech (im Empfangsraum)
- d) Fugendichtung aus Terostat (plastisch) oder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

**Abb. 8:** Montage eines Prüfkörpers in der Einbauöffnung des Fensterprüfstands (horizontaler Schnitt). Die Rückseite der Grundwand (13 cm dicke Stahlbetonplatte) verlief bündig mit der hinteren Kante der Einbauöffnung im Empfangsraum.

Die Fotos in den beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen die Einbausituation im Fensterprüfstand genauer:



**Abb. 9:** Im Fensterprüfstand eingebauter Versuchsaufbau vom Senderraum aus gesehen: Ausfüllen der umlaufenden Fugen mit schallabsorbierendem Schaumstoff (links) und anschließendes Verschließen der Fugen mit Gipskartonstreifen und Acryl (rechts).

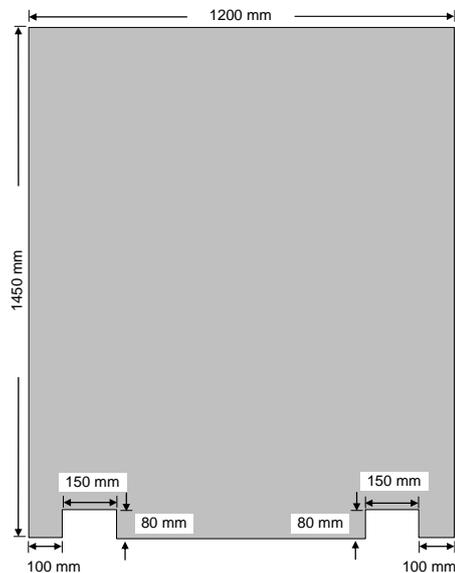


**Abb. 10:** Im Fensterprüfstand eingebauter Versuchsaufbau vom Empfangsraum aus gesehen: Im Empfangsraum erfolgte das Abdichten der umlaufenden Fugen mit Profilen aus Stahlblech sowie Terostat (links). Die Öffnungen für die Gabel des Staplers wurden jedoch auch hier mit Gipskarton verschlossen (rechts).

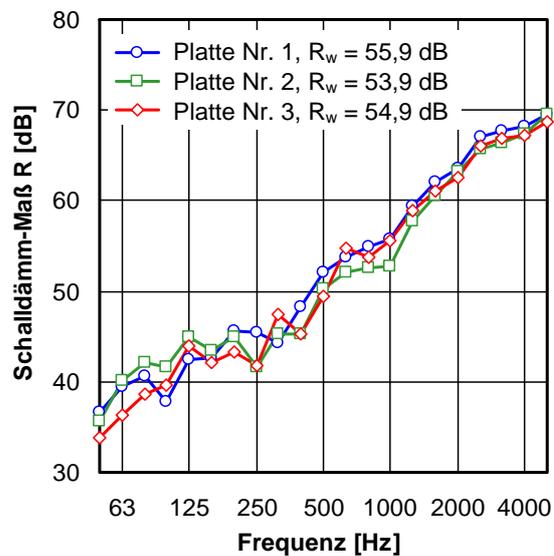
### 2.6.3 Grundwände

Als Grundwände zur Anbringung der untersuchten WDVS dienten wie schon erwähnt drei baugleiche Stahlbetonplatten mit den Maßen  $B \times H \times D = 1,20 \text{ m} \times 1,45 \text{ m} \times 0,13 \text{ m}$  und einer flächenbezogenen Masse von  $m'' \cong 315 \text{ kg/m}^2$ . Um einen Transport in senkrechter Lage zu ermöglichen, befanden sich am unteren Rand der Platten jeweils

zwei Aussparungen, in die sich die Gabel eines Staplers einschieben ließ (siehe Abb. 11). Vor der Messung der Schalldämmung wurden die Aussparungen selbstverständlich sorgfältig verschlossen und abgedichtet.



**Abb. 11:** Darstellung der für die akustischen Messungen im Fensterprüfstand als Grundwand verwendeten Stahlbetonplatten. Die beiden Aussparungen auf der Unterseite dienten zum Transport mit dem Gabelstapler.



**Abb. 12:** Schalldämmung der drei als Grundwände verwendeten Stahlbetonplatten ohne Wärmedämm-Verbundsystem.

Wegen der baugleichen Ausführung der drei Platten sind hinsichtlich der Schalldämmung nur verhältnismäßig geringe Unterschiede zu erwarten. Dies wird durch die in Abb. 12 dargestellten Messergebnisse bestätigt. Obgleich sich die Schalldämmkurven natürlich leicht von einander unterscheiden, stimmen die Einzulangaben mit  $R_w \cong 55,0 \pm 1,0$  dB im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit überein (die akustischen Diffe-

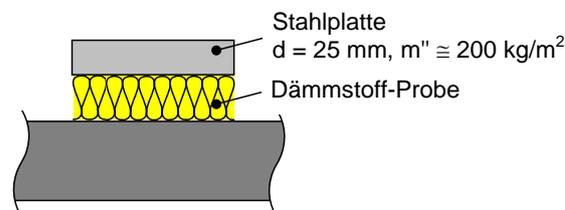
renzen sind vermutlich weniger auf abweichende Bauteileigenschaften der Platten als vielmehr auf unvermeidliche Unterschiede bei den Einbaubedingungen sowie die bei bauakustischen Prüfungen übliche messtechnische Streuung zurückzuführen). Für die Berechnung der Schalldämmung wird daher bei den Grundwänden im Folgenden einheitlich von einem bewerteten Schalldämm-Maß von  $R_w = 55,0$  dB ausgegangen.

## 2.7 Voruntersuchungen

### 2.7.1 Dynamische Steifigkeit

Die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht  $s'$  stellt eine der wichtigsten Eingangsgrößen zur Berechnung der Schalldämmung von WDVS dar, da sie zusammen mit der flächenbezogenen Masse der Putzschicht die Resonanzfrequenz des Systems bestimmt. Statt der dynamischen Steifigkeit  $s'$  kann aber selbstverständlich ebenso gut der dynamische Elastizitätsmodul des Dämmstoffs  $E_{dyn}$  herangezogen werden, der über die Beziehung  $s' = E_{dyn} / d$  (mit  $d =$  Dämmstoffdicke) direkt mit der dynamischen Steifigkeit verknüpft ist.

Standardmäßig wird die dynamische Steifigkeit von Dämmstoffen nach DIN EN 29052-1 [5] bestimmt, da DIN EN 29052-1 das einzige genormte Messverfahren für diese Größe darstellt. Hierbei wird die geprüfte Dämmstoffplatte auf eine ebene starre Unterlage gelegt und mit einer genormten Auflage aus einer 25 mm dicken Stahlplatte mit einer flächenbezogenen Masse von  $m'' \cong 200$  kg/m<sup>2</sup> beschwert (siehe Abb. 13). 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.



**Abb. 13:** Messaufbau nach DIN EN 29052-1 zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit von Trittschalldämmplatten (schematisch).

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 folgender Gleichung die dynamische Steifigkeit der Dämmstoffplatte bestimmt werden

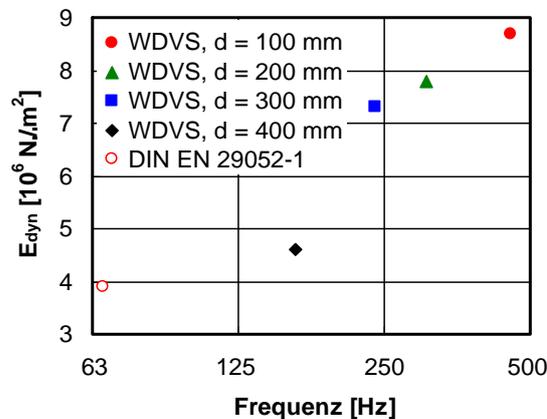
$$s' = 4 \pi^2 f_R^2 m'' , \quad (1)$$

wobei  $f_R$  die gemessene Resonanzfrequenz und  $m'' = 200 \text{ kg/m}^2$  die flächenbezogene Masse der schwingenden Stahlplatte bezeichnen.

Das Problem bei der Messung nach DIN EN 29052-1 besteht darin, dass die Resonanzfrequenz des Messaufbaus - also die Frequenz, bei der die Messung der dynamischen Steifigkeit erfolgt - erheblich unter der Resonanzfrequenz üblicher Wärmedämm-Verbundsysteme liegt. Da die dynamische Steifigkeit üblicher Dämmstoffe mit zunehmender Frequenz zumeist beträchtlich ansteigt (siehe Abb. 14), liefert die Berechnung der Resonanzfrequenz von WDVS auf Grundlage der nach DIN EN 29052-1 ermittelten dynamischen Steifigkeit oft deutlich zu niedrige Werte. Die derzeit verwendeten semiempirischen Berechnungsverfahren zur Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes von Wänden mit WDVS berücksichtigen diesen Effekt bereits. Für den frequenzabhängigen Vergleich von Messung und Rechnung kann es hingegen sinnvoll sein, die dynamische Steifigkeit aus dem resultierenden Dämmungseinbruch der gemessenen Schalldämmkurve zu bestimmen. Die Auswertung erfolgt hierbei analog zu Gl. (1):

$$s' = 4\pi^2 f_R^2 \frac{m''_P m''_W}{m''_P + m''_W} \cong 4\pi^2 f_R^2 m''_P \quad \text{für } m''_P \ll m''_W \quad (2)$$

Hierbei bezeichnet  $f_R$  die Resonanzfrequenz des WDVS (entspricht näherungsweise dem Minimum des Dämmungseinbruchs) und  $m''_P$  bzw.  $m''_W$  sind die flächenbezogenen Massen der Putzschicht und der Grundwand. Um möglichst genaue Werte zu erhalten, sollte die Resonanzfrequenz dabei nicht aus der Schalldämmkurve, sondern - wie z. B. in Ziffer 3.7.2 dargestellt - aus der Verbesserung der Schalldämmung der Grundwand durch das WDVS abgelesen werden.



**Abb. 14:** Dynamischer Elastizitätsmodul eines typischen Dämmstoffs (EPS) in Abhängigkeit von der Messfrequenz nach [9] (die Messfrequenz entspricht der Resonanzfrequenz des jeweiligen Schwingungssystems). Neben einer normgerechten Messung 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.

Da sich bei der Bestimmung der dynamischen Steifigkeit nach DIN EN 29052-1 und aus der Schalldämmkurve von WDVS unterschiedliche Werte ergeben, sind in Ziffer 2.5.1

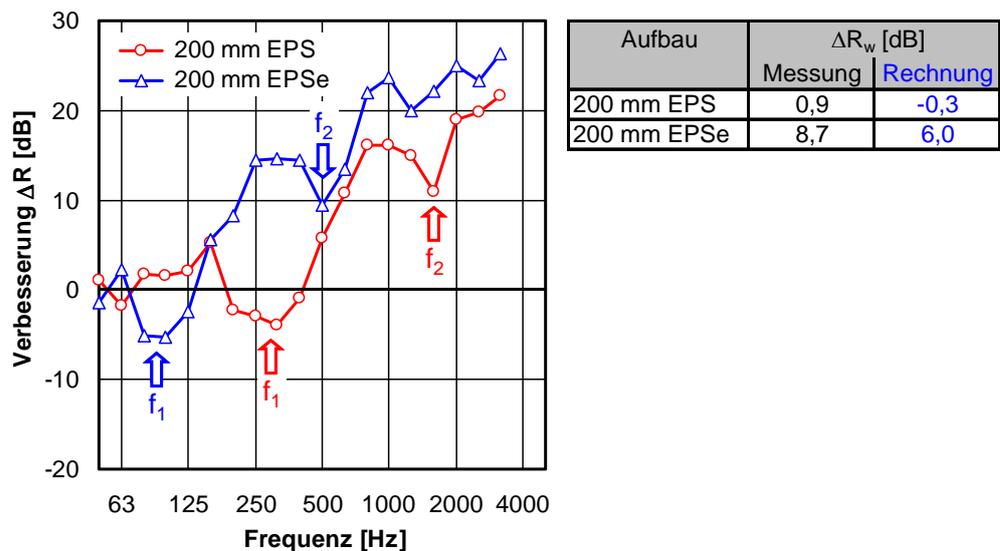
für die verwendeten Dämmstoffe jeweils beide Werte angegeben. Die hierzu herangezogenen Schalldämmkurven wurden an einlagigen WDVS mit 200 mm Dämmstoffdicke und 8 mm Putzdicke ( $m''_{\text{Putz}} = 10,8 \text{ kg/m}^2$ ) gemessen. Zur Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes von WDVS aus den Bauteileigenschaften wurde jeweils der nach DIN EN 29052-1 gemessene Wert der dynamischen Steifigkeit herangezogen.

## 2.7.2 Einlagige Referenzsysteme aus EPS und EPSe

Um Vergleichswerte für die untersuchten zweilagigen Dämmsysteme zu erhalten, wurden zunächst zwei einlagige Systeme aus EPS sowie aus elastifiziertem EPS (EPSe) gemessen. Abgesehen vom verwendeten Dämmstoff waren beide Systeme gleich aufgebaut (Dübel waren in beiden Fällen nicht vorhanden):

- Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- 200 mm dicke Dämmschicht aus EPS bzw. EPSe ( $s' = 38,6$  bzw.  $13,0 \text{ MN/m}^3$ )
- 8 mm Putz

Die gemessenen Werte sind in Abb. 15 dargestellt, wobei jeweils die Verbesserung der Schalldämmung der Grundwand durch das WDVS,  $\Delta R = R_{\text{mit WDVS}} - R_{\text{ohne WDVS}}$ , in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen ist. Da diese Auftragung die maßgebenden akustischen Effekte sehr viel deutlicher erkennen lässt, als dies bei einer normalen Schalldämmkurve der Fall wäre, wird die Darstellungsweise auch für alle folgenden Abbildungen verwendet. Die Messwerte bei 4000 Hz und 5000 Hz liegen teilweise bereits im Bereich der Grenzdämmung des Prüfstands und sind deshalb in den meisten Abbildungen nicht mit angegeben. Auf die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes hat dies jedoch keinen Einfluss, da hierbei nur der Frequenzbereich von 100- 3150 Hz berücksichtigt wird.



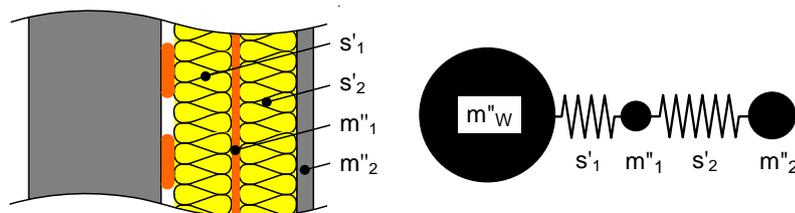
**Abb. 15:** Verbesserung der Schalldämmung durch zwei einlagige WDVS aus EPS und EPSe. Die neben der Abbildung dargestellte Tabelle enthält die resultierende

Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $\Delta R_w$ , wobei die schwarzen Werte aus den Messdaten und die blauen Werte rechnerisch ermittelt wurden.

Wie aus den in der obigen Abbildung dargestellten Ergebnissen zu entnehmen ist, stimmen die für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $\Delta R_w$  gemessenen und berechneten Werte erwartungsgemäß näherungsweise überein. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung liegen innerhalb des durch die Berechnungsgenauigkeit des verwendeten Modells aufgespannten Toleranzbereichs in Höhe von  $\pm 2,0$  dB (diese Angabe bezieht sich auf die Standardabweichung zwischen Messung und Rechnung [9, 10]). Die Berechnung erfolgte wie auch bei allen folgenden Messungen mit dem derzeit im Bereich der bauaufsichtlichen Zulassung verwendeten Verfahren, das seinerzeit im IBP entwickelt wurde [7, 8].

Auffällig bei den in Abb. 15 dargestellten Kurven ist, dass neben der Grundresonanz  $f_1$  jeweils noch eine weitere Resonanz  $f_2$  bei höheren Frequenzen vorhanden ist. Die zweite Resonanz ist darauf zurückzuführen, dass die 200 mm dicke Dämmschicht wie oben beschrieben aus zwei gleichartigen Platten mit einer Dicke von jeweils 100 mm besteht, die mit Dispersionsklebstoff zusammengeklebt sind. Obgleich die Klebeschicht zwischen den Platten sehr dünn und leicht ist, wirkt sie dennoch als schwingende Masse und erzeugt als solche einen Resonanzeinbruch in der Schalldämmkurve. Die Frequenz der beiden Resonanzen lässt sich nach der nachfolgend aufgeführten Gleichung aus [11] berechnen, wobei die Bedeutung der in der Gleichung verwendeten Symbole in Abb. 16 erläutert ist:

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



**Abb. 16:** Erläuterung der Gl. (3) verwendeten Symbole. Hierbei bezeichnen  $s'_1$  und  $s'_2$  die dynamischen Steifigkeiten der beiden Dämmstofflagen und  $m''_1$  sowie  $m''_2$  die flächenbezogenen Massen der schwingenden Putz- und Klebstoffschichten. Es wird vorausgesetzt, dass  $m''_1$  und  $m''_2$  sehr viel kleiner als die Masse der Grundwand  $m''_w$  sind.

Setzt man die vorhandenen Bauteildaten und die aus der gemessenen Schalldämmung ermittelten dynamischen Steifigkeiten der Dämmstofflagen in die obige Gleichung ein, so ergeben sich für die resultierenden Resonanzfrequenzen die in Tab. 1 aufgeführten Werte. Während sich für die Grundresonanz eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt, fallen die Abweichungen bei der zweiten Resonanz er-

heblich höher aus (oberer Teil der Tabelle). Die Abweichung lassen sich beseitigen, wenn man für die flächenbezogene Masse des Dispersionsklebstoffs zwischen den beiden Dämmstofflagen statt des tatsächlichen Wertes von  $m''_1 \cong 0,5 \text{ kg/m}^2$  einen fiktiven Wert von  $m''_1 = 1,2 \text{ kg/m}^2$  in die Gleichung einsetzt (unterer Teil der Tabelle).

Hierfür gibt es möglicherweise folgende Erklärung: obgleich es sich bei dem verwendeten Dispersionsklebstoff um ein elastisches Material handelt, ist der Kleber doch erheblich steifer als der damit verklebte EPS-Dämmstoff. Dies bedeutet, dass das EPS an der Oberfläche der Klebeschicht festgehalten wird und den Bewegungen der Schicht folgen muss. Die hierbei mitbewegte EPS-Masse vergrößert die schwingende Masse des Klebstoffs. Da die Rohdichte des EPS bei etwa  $20 \text{ kg/m}^3$  liegt, müsste der mitbewegte Bereich der Dämmschicht eine Schicht von etwa 15 - 20 mm beidseits des Klebstoffs umfassen, was im Hinblick auf die gesamte Dämmstoffdicke von  $2 \times 100 \text{ mm}$  durchaus realistisch erscheint.

Aufbau	Resonanzfreq. [Hz]			
	Messung		Rechnung	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
200 mm EPS	280	1550	274	2580
200 mm EPS <sub>e</sub>	95	530	93	870

Rechnung für  $m''_1 = 0,5 \text{ kg/m}^2$

Aufbau	Resonanzfreq. [Hz]			
	Messung		Rechnung	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
200 mm EPS	280	1550	272	1560
200 mm EPS <sub>e</sub>	95	530	92	526

Rechnung für  $m''_1 = 1,2 \text{ kg/m}^2$

**Tab. 1:** Vergleich der gemessenen mit den nach Gl. (3) berechneten Resonanzfrequenzen. Im oberen Teil der Tabelle wurde mit dem tatsächlichen Wert von  $m''_1 \cong 0,5 \text{ kg/m}^2$  gerechnet ( $m''_1$  bezeichnet hierbei die flächenbezogene Masse der zwischen den Dämmstofflagen vorhandenen Schicht aus Dispersionsklebstoff), im unteren Teil der Tabelle hingegen mit einem fiktiven Wert von  $m''_1 = 1,2 \text{ kg/m}^2$ .

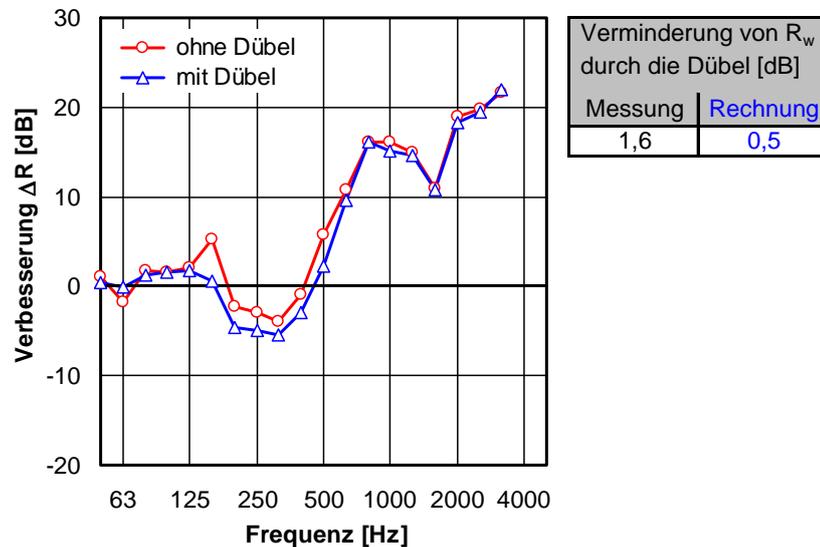
### 2.7.3 Einlagiges Referenzsystem aus EPS mit Dübeln

Da auch bei den akustischen Untersuchungen an Dübeln Vergleichswerte für ein einlagiges WDVS benötigt werden, wurde das in Ziffer 2.7.2 beschriebene einlagige EPS-System nachträglich mit Dübeln versehen. Hier der entsprechende Versuchsaufbau:

- Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- 200 mm dicke Dämmschicht aus EPS ( $s' = 38,6 \text{ MN/m}^3$ )
- 4 Dübel pro Quadratmeter
- 8 mm Putz

In Abb. 17 sind die mit ohne Dübel gemessenen Schalldämmwerte gemeinsam dargestellt. Die Unterschiede zeigen sich insbesondere im mittleren Frequenzbereich, wo

durch den Einfluss der Dübel eine deutliche Verminderung der Schalldämmung erfolgt. Bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß ergibt die Messung eine Verminderung um 1,6 dB, was im Rahmen der vorhandenen Prognosegenauigkeit recht gut mit dem berechneten Wert von 0,5 dB übereinstimmt.



**Abb. 17:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein einlagiges WDVS mit und ohne Dübel.

## 2.8 Messergebnisse

### 2.8.1 Zweilagiges WDVS aus unterschiedlichen Dämmplatten

Zur Herstellung eines zweilagigen Systems aus unterschiedlichen Dämmplatten wurden eine Platte aus EPS (mit einer dynamische Steifigkeit von  $s' = 38,6 \text{ MN/m}^3$  nach DIN EN 29052-1) und eine Platte aus EPSe (mit  $s' = 13,0 \text{ MN/m}^3$ ) mit Mörtel vollflächig zusammengeklebt. Der Prüfkörper hatte folgenden Aufbau:

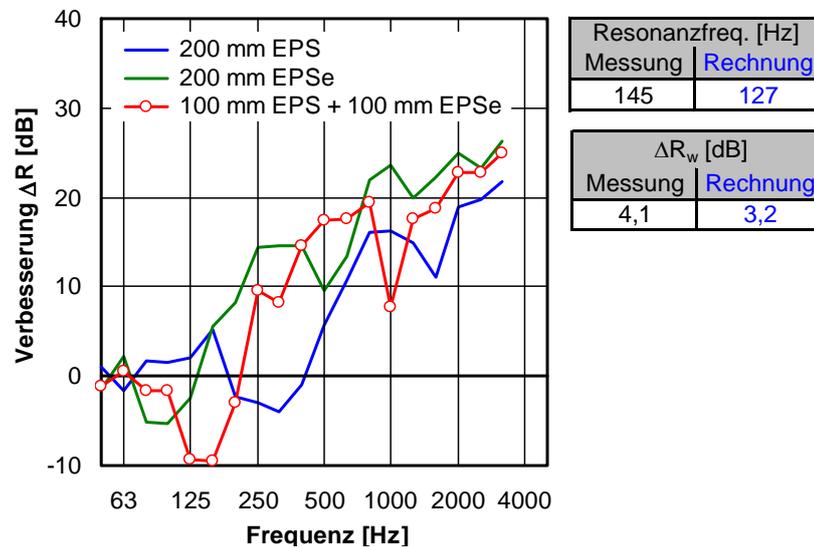
- Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- 100 mm dicke Dämmschicht aus EPS ( $s' = 38,6 \text{ MN/m}^3$ )
- 3 mm Klebemörtel (vollflächig aufgetragen)
- 100 mm dicke Dämmschicht aus EPSe ( $s' = 13,0 \text{ MN/m}^3$ )
- 8 mm Putz

Die für diesen Aufbau gemessene Schalldämmung ist Abb. 18 dargestellt, wobei zum Vergleich auch die Schalldämmkurven für die entsprechenden einlagigen Systeme eingezeichnet sind. Wie zu erkennen ist, liegt die Grundresonanz des zweilagigen Systems zwischen den entsprechenden Resonanzfrequenzen der beiden einlagigen WDVS. Dies lässt vermuten, dass sich das zweilagige System ähnlich wie ein einlagiges System verhält, dessen dynamische Steifigkeit dem resultierenden Wert der beiden einzelnen

Dämmschichten entspricht. Die resultierende dynamische Steifigkeit der beiden Dämmschichten lässt sich nach folgender Gleichung ermitteln:

$$s'_{\text{res}} = \left( \frac{1}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

wobei  $s'_1$  und  $s'_2$  die dynamischen Steifigkeiten der einzelnen Schichten (im vorliegenden Fall aus EPS und EPSe) bezeichnen. Setzt man den mit obiger Gleichung berechneten Wert von  $s'_{\text{res}}$  in die vorhandenen Berechnungsverfahren für die Resonanzfrequenz und für die Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes von einlagigen WDVS ein, so ergibt sich in beiden Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Die entsprechenden Ergebnisse sind den in Abb. 18 enthaltenen Tabellen zu entnehmen. Das bewertete Schalldämm-Maß des zweilagigen Systems lässt sich also in guter Näherung wie bei einem einlagigen WDVS mit resultierender dynamischer Steifigkeit der Dämmschicht berechnen. Die zusätzliche Masse der Klebeschicht zwischen den Dämmstofflagen bleibt hierbei unberücksichtigt.



**Abb. 18:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein zweilagiges WDVS aus zwei unterschiedlich steifen Dämmplatten (EPS und EPSe). Neben der gemessenen Schalldämmung (Kurve mit roten Punkten) sind zum Vergleich außerdem auch die Schalldämmkurven für die entsprechenden einlagigen Systeme aus 200 mm EPS und 200 mm EPSe mit eingezeichnet.

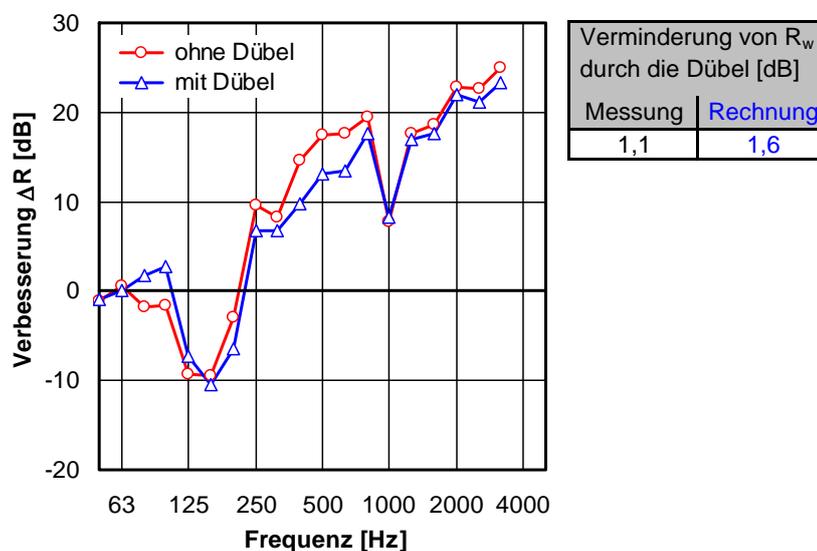
Aus Abb. 18 ist weiterhin zu entnehmen, dass die zweite Resonanz bei hohen Frequenzen bei dem zweilagigen System stärker ausgeprägt ist als bei den beiden einlagigen Systemen. Dies hängt damit zusammen, dass bei dem zweilagigen System eine vergleichsweise schwere Klebstoffschicht zwischen den beiden Dämmstofflagen vorhanden ist (3 mm Klebemörtel mit  $m'' \cong 4 \text{ kg/m}^2$ ). Die einlagigen WDVS bestehen zwar ebenfalls aus zwei zusammengeklebten Dämmplatten, die Klebeschicht ist hier jedoch erheblich dünner und leichter ist (0,5 mm Dispersionskleber mit  $m'' \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ ).

## 2.8.2 Zweilagiges WDVS mit und ohne Dübel

Um den Einfluss von Dübeln auf die Schalldämmung zweilagiger WDVS zu untersuchen, wurde das in Ziffer 2.8.1 beschriebene System aus zwei unterschiedlich steifen Dämmschichten nachträglich mit Dübeln versehen. Dadurch ergab sich folgender Aufbau:

- Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- 100 mm dicke Dämmschicht aus EPS ( $s' = 38,6 \text{ MN/m}^3$ )
- 3 mm Klebemörtel (vollflächig aufgetragen)
- 100 mm dicke Dämmschicht aus EPSe ( $s' = 13,0 \text{ MN/m}^3$ )
- 4 Dübel pro Quadratmeter
- 8 mm Putz

In Abb. 19 ist die mit und ohne Dübel gemessene Schalldämmung des Systems dargestellt. Die Dübel wirken sich in akustischer Hinsicht ähnlich wie bei dem in Ziffer 2.7.3 beschriebenen einlagigen WDVS aus. Daher stimmt auch die Verschlechterung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch die Dübel, die mit dem vorhandenen Modell für einlagige WDVS berechnet wurde, gut mit dem entsprechenden Messwert überein. Die zugehörigen Ergebnisse (gemessene Verschlechterung 1,1 dB, berechneter Wert 1,6 dB) sind in Abb. 19 aufgeführt.



**Abb. 19:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein zweilagiges WDVS mit und ohne Dübel.

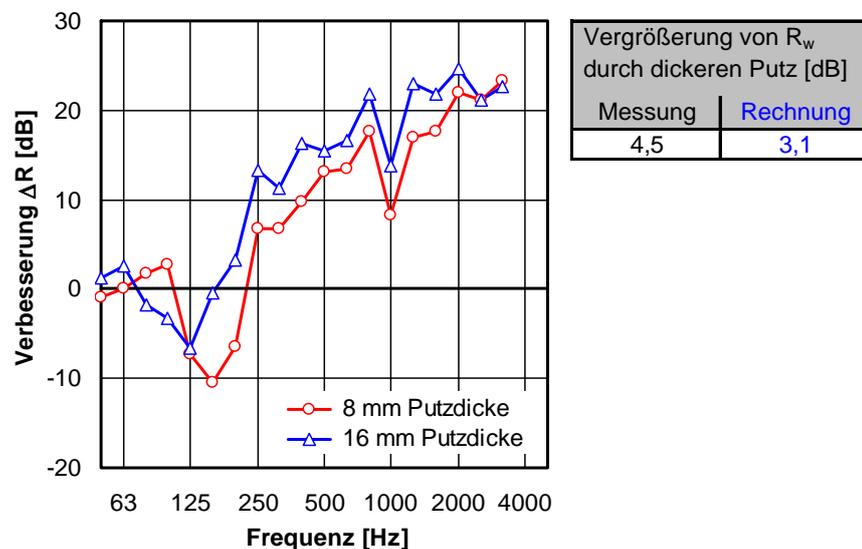
## 2.8.3 Zweilagiges WDVS mit erhöhter Putzdicke

Da die Schalldämmung zweilagiger WDVS auch von der Dicke des Außenputzes abhängt, wurden zwei ansonsten gleiche Systeme mit unterschiedlich dicker Putzschicht miteinander verglichen. Den Ausgangspunkt hierbei bildete das in Ziffer 2.8.2 beschrie-

bene verdübelte System, bei dem die Putzdicke nachträglich von 8 mm auf 16 mm erhöht wurde, wodurch die flächenbezogene Masse der Putzschicht von  $m'' = 10,8 \text{ kg/m}^2$  auf  $m'' = 21,6 \text{ kg/m}^2$  anstieg. Hier noch einmal der Aufbau der beiden Prüfobjekte:

- a) Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- b) 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- c) 100 mm dicke Dämmschicht aus EPS ( $s' = 38,6 \text{ MN/m}^3$ )
- d) 3 mm Klebemörtel (vollflächig aufgetragen)
- e) 100 mm dicke Dämmschicht aus EPSe ( $s' = 13,0 \text{ MN/m}^3$ )
- f) 4 Dübel pro Quadratmeter
- g) 8 mm bzw. 16 mm Putz

Wie den in Abb. 20 dargestellten Messergebnissen zu entnehmen ist, wirkt sich die Erhöhung der Putzdicke bei dem untersuchten zweilagigen WDVS in ähnlicher Weise aus, wie dies auch von einlagigen Systemen her bekannt ist. Neben einer Verschiebung der Grundresonanz zu tieferen Frequenzen hin, erfolgt - infolge der Verschiebung - ein deutlicher Anstieg der Schalldämmung im Frequenzbereich oberhalb der Resonanz. Es liegt daher nahe, zur Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes auch in diesem Fall das vorhandene Verfahren für einlagige WDVS heranzuziehen. Tatsächlich ergibt sich bei Vergleich der gemessenen und berechneten Werte eine gute Übereinstimmung der ermittelten Ergebnisse (siehe Tabelle in Abb. 20).



**Abb. 20:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein zweilagiges, verdübeltes WDVS mit unterschiedlicher Putzdicke bei ansonsten gleichem Aufbau.

### 2.8.4 Ein- und zweilagiges WDVS aus Mineralfaser

Da bislang ausschließlich Dämmsysteme aus Polystyrol betrachtet wurden, sollten zur Ergänzung und Vervollständigung der Untersuchungsergebnisse außerdem auch Messungen an einem Mineralfaser-System durchgeführt werden. Dabei wurden wiederum

ein ein- und ein zweilagiges System bei ansonsten gleichem Aufbau miteinander verglichen. Die beiden untersuchten Systeme waren folgendermaßen aufgebaut:

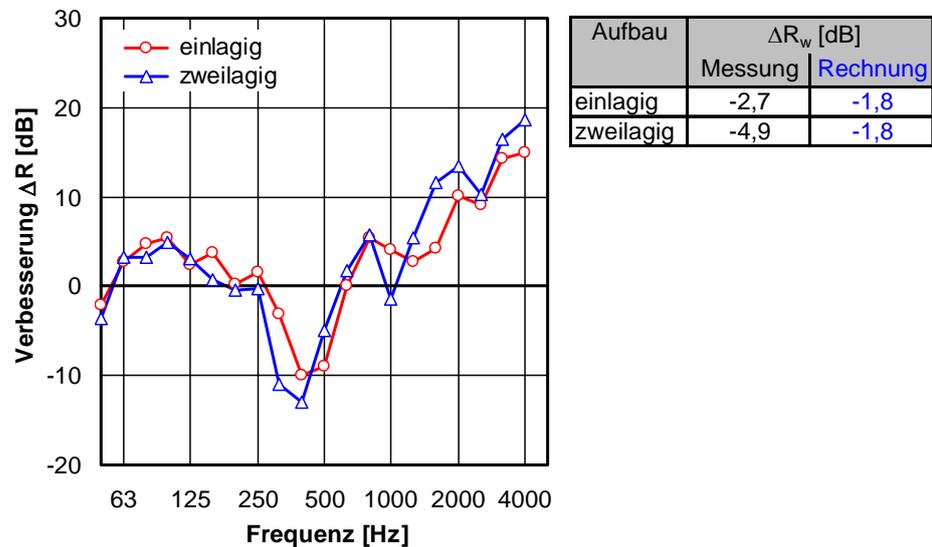
Einlagiges WDVS:

- a) Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- b) 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- c) 200 mm dicke Dämmschicht aus Mineralfaser ( $s' = 42,4 \text{ MN/m}^3$ )
- d) 8 mm Putz

Zweilagiges WDVS:

- a) Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- b) 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- c) 100 mm dicke Dämmschicht aus Mineralfaser ( $s' = 42,4 \text{ MN/m}^3$ )
- d) 6 mm Klebemörtel (vollflächig aufgetragen)
- e) 100 mm dicke Dämmschicht aus Mineralfaser ( $s' = 42,4 \text{ MN/m}^3$ )
- f) 8 mm Putz

Wie der obigen Beschreibung zu entnehmen ist, bestand ein weiterer Unterschied zu den bislang untersuchten Systemen in der Dicke der Klebeschicht zwischen den Dämmstoffplatten, die von bisher 3 mm auf nunmehr 6 mm erhöht wurde. Dadurch vergrößerte sich die flächenbezogene Masse des Klebemörtels von  $m'' = 4,05 \text{ kg/m}^2$  auf  $m'' = 8,1 \text{ kg/m}^2$ . Dies ist zwar nicht praxisüblich (dicke Klebeschichten werden schon aus Gründen der Material- und Arbeitersparnis vermieden), erweitert jedoch die Bandbreite der durchgeführten Untersuchungen und liefert Erkenntnisse über die Anwendungsgrenzen der eingesetzten Berechnungsverfahren.



**Abb. 21:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein ein- und ein zweilagiges WDVS aus Mineralfaser-Lamellenplatten bei ansonsten gleichem Aufbau.

Die Messergebnisse für das ein- und das zweilagige WDVS aus Mineralfaser sind in Abb. 21 dargestellt. Auf den ersten Blick sind an den Messkurven gegenüber den bislang untersuchten Systemen aus Polystyrol keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Allerdings erfolgt beim zweilagigen System eine leichte Verstärkung und Verschiebung der Grundresonanz, die bei den bisherigen Messungen nicht festzustellen war. Die Ursachen für diesen Effekt sind nicht völlig klar, es ist jedoch zu vermuten, dass sie in Zusammenhang mit der erhöhten Dicke der Klebeschicht stehen.

Die akustischen Unterschiede zwischen dem ein- und dem zweilagigen System äußern sich auch im bewerteten Schalldämm-Maß (siehe Tabelle in Abb. 21). Während sich für das einlagige System eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt, ist beim zweilagigen System eine erhöhte Abweichung vorhanden, die sich mit 3,1 dB bereits außerhalb der Standardabweichung des verwendeten Berechnungsverfahrens ( $\sigma = 2,0$  dB) bewegt. Die akustischen Unterschiede zwischen ein- und zweilagigem Aufbau sind hier offenbar so groß, dass das für einlagige WDVS entwickelte Verfahren nicht mehr uneingeschränkt verwendbar ist.

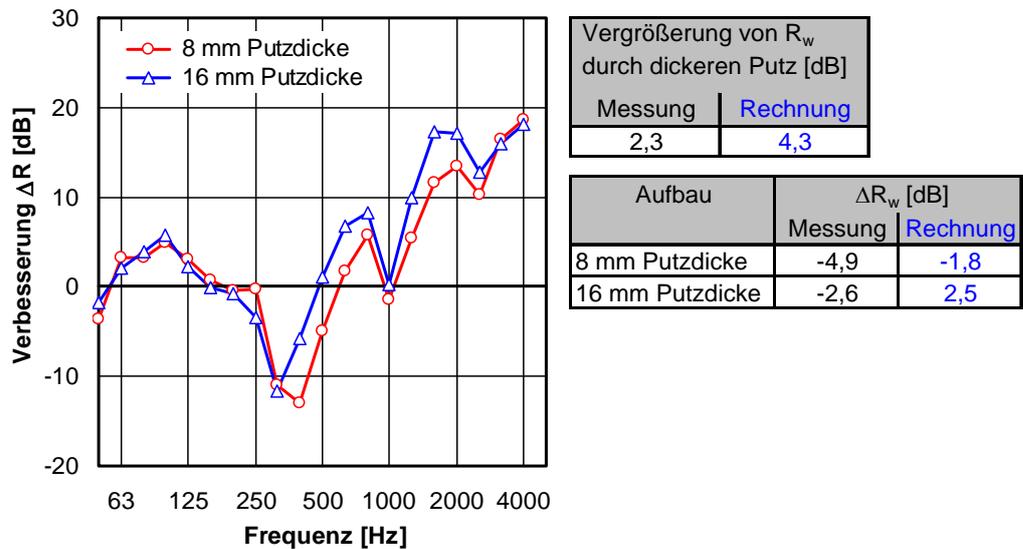
### 2.8.5 WDVS aus Mineralfaser mit erhöhter Putzdicke

Um den Einfluss der Putzdicke bei zweilagigen Dämmsystemen aus Mineralfaser zu untersuchen, wurde das in Ziffer 2.8.4 beschriebene System herangezogen und die Dicke der Putzschicht nachträglich von 8 mm auf 16 mm erhöht (entspricht einer Zunahme der flächenbezogene Masse von  $m'' = 10,8$  kg/m<sup>2</sup> auf  $m'' = 21,6$  kg/m<sup>2</sup>). Damit ergab sich für die beiden untersuchten Systeme folgender Aufbau:

- a) Grundwand (130 mm Stahlbeton)
- b) 8 mm Klebemörtel (Punkt-Wulst-Verfahren, Klebeflächenanteil ca. 40 %)
- c) 100 mm dicke Dämmschicht aus Mineralfaser ( $s' = 42,4$  MN/m<sup>3</sup>)
- d) 6 mm Klebemörtel (vollflächig aufgetragen)
- e) 100 mm dicke Dämmschicht aus Mineralfaser ( $s' = 42,4$  MN/m<sup>3</sup>)
- f) 8 mm bzw. 16 mm Putz

Die Messergebnisse für die beiden Aufbauten sind in Abb. 22 dargestellt. Der Verlauf der Schalldämmkurven entspricht auch hier auf den ersten Blick im Wesentlichen den Erwartungen (Absenkung der Grundresonanz und erhöhte Schalldämmung oberhalb des Resonanzbereichs bei Erhöhung der Putzdicke). Erst wenn man sich die in den Tabellen in Abb. 22 enthaltenen Einzahlangaben ansieht, wird klar, dass im Vergleich zu einlagigen WDVS offenbar doch erhebliche akustische Unterschiede bestehen. Für die Zunahme des bewerteten Schalldämm-Maßes bei Erhöhung der Putzdicke liefern Messung und Rechnung immerhin ähnliche Werte. Bei der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS,  $\Delta R_w$ , ergeben sich hingegen starke Abweichungen von 3,1 dB (bei 8 mm Putzdicke) sowie 5,1 dB (bei 16 mm Putzdicke). Daraus geht hervor, dass das bislang verwendete Berechnungsverfahren zwar im Prinzip auch bei zweilagigen WDVS anwendbar ist, dass es aber bei dicken Klebeschichten und Putzschichten mit hoher flächenbezogener Masse offenbar an seine Grenzen stößt. Da beides in der Praxis eher als Sonderfall anzusehen ist, erscheint eine Anpassung des Be-

rechnungsverfahrens an diese Bauweisen nicht unbedingt erforderlich, zumal dazu derzeit auch noch nicht genügend Messdaten vorliegen.



**Abb. 22:** Verbesserung der Schalldämmung durch ein zweilagiges WDVS aus Mineralfaser mit unterschiedlicher Putzdicke bei ansonsten gleichem Aufbau.

### 3 Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 12354-1

Der Entwurf der DIN EN ISO 12354-1 vom März 2016 [1] enthält ein neues Berechnungsverfahren für die Schalldämmung von Wänden mit WDVS, das in der CEN-Arbeitsgruppe CEN/AHG EticsAcoustics unter Leitung von E. Gerretsen entwickelt wurde. Das neue Verfahren, das im Folgenden kurz als CEN-Verfahren bezeichnet wird, beruht auf einem vorhandenen Modell des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) aus dem Jahr 2005 [7, 8], weist aber eine Reihe von Vereinfachungen auf. Da die DIN EN ISO 12354-1 für die bauakustische Planung von großer Bedeutung ist, bestand die Aufgabe, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des neuen Berechnungsverfahrens zu überprüfen.

Zunächst noch eine Anmerkung zu dem vorhandenen Berechnungsmodell aus dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP-Verfahren). Es handelt sich um ein semiempirisches Verfahren, das auf der Grundlage eines umfangreichen Datenbestandes an Prüfstandsmessungen (siehe unten) entwickelt wurde und im DIBt in leicht modifizierter Form im Bereich bauaufsichtlicher Zulassungen eingesetzt wird. Der Unterschied gegenüber dem Original-Verfahren 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  $-6 \text{ dB} \leq \Delta R_w \leq 16 \text{ dB}$  begrenzt. Für die im vorliegenden Bericht vorgestellten Berechnungen wurde das Original-Verfahren ohne Vorhaltemaß und ohne Beschränkung des Wertebereichs verwendet.

Um das CEN-Berechnungsverfahren zu überprüfen, wurde ein Datensatz herangezogen, der aus 200 Prüfstandsmessungen an Wänden mit WDVS bestand. Nähere Anga-

ben zu diesem Datensatz, der seinerzeit auch zur Entwicklung des IBP-Verfahrens verwendet wurde, sind dem nachfolgenden Abschnitt zu entnehmen. Für die Wände aus diesem Datensatz wurde jeweils eine Berechnung der Schalldämmung durchgeführt und mit den vorhandenen Messwerten verglichen. Anschließend erfolgte eine statistische Auswertung der zwischen Rechnung und Messung vorhandene Abweichungen. Als Vergleichsmaßstab wurde dabei neben dem CEN-Verfahren außerdem auch das IBP-Verfahren betrachtet.

### 3.1 Vorhandene Messdaten

Der für die Untersuchungen verwendete Datensatz bestand aus 200 Messungen an Massivwänden mit WDVS, die in den Jahren 1992 bis 2001 in der MPA Braunschweig und im IBP durchgeführt wurden. Da sämtliche Messungen in bauakustischen Prüfständen ohne Flankenübertragung stattfanden, ist von einer hohen Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Daten auszugehen. Für alle untersuchten Wände lagen Messwerte mit und ohne WDVS vor, so dass die Verbesserung  $\Delta R_w$  unmittelbar aus den Messdaten ermittelt werden konnte.

In dem Datensatz waren zahlreiche unterschiedliche Grundwände und alle bauüblichen Arten von WDVS vertreten. Für die verschiedenen Dämmstoffe werden im nachfolgenden Text folgende Abkürzungen verwendet:

EPS	expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten,
EEPS	elastifizierte EPS-Platten,
MFP	Mineralfaser-Putzträgerplatten,
MFL	Mineralfaser-Lamellenplatten.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Dämmstoffarten besteht darin, dass bei den Putzträgerplatten die Faserrichtung parallel zur Oberfläche verläuft, während sie bei den Lamellenplatten senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist. Dies hat zur Folge, dass sich für MFL-Platten normalerweise eine höhere dynamische Steifigkeit als für MFP-Platten ergibt.

Bei den 28 in dem Datensatz vertretenen Grundwänden handelte es sich um 23 Wände aus Kalksandsteinen, 1 Wand aus Verfüllziegeln, 2 Wände aus Leichtbeton-Hohlblocksteinen, 1 Wand aus Porenbeton sowie 1 Wand aus Hochlochziegeln. Die technischen Daten der Wände lagen in folgenden Bereichen:

Dicke:	$d = 115 - 300 \text{ mm}$ ,
Steinrohddichte:	$\rho_{\text{Stein}} = 500 - 1810 \text{ kg/m}^3$ ,
Flächenmasse:	$m'' = 165 - 490 \text{ kg/m}^2$ ,
bewertetes Schalldämm-Maß:	$R_w = 43 - 59 \text{ dB}$ .

Die 200 untersuchten WDVS ließen sich in 70 EEPS-Systeme, 56 EPS-Systeme, 25 MFP-Systeme, 48 MFL-Systeme sowie 1 PU-System (aus Polyurethan-Hartschaumplatten) unterteilen. Die Systeme wiesen folgenden technischen Eigenschaften auf.

Dämmstoffdicke:	$d = 40 - 200 \text{ mm},$
Rohdichte des Dämmstoffs:	$\rho = 15 - 141 \text{ kg/m}^3,$
dynamische Steifigkeit:	$s' = 3 - 144 \text{ MN/m}^3,$
Strömungswiderstand bei Mineralfaser:	$r = 17 - 64 \text{ kPa s/m}^2,$
berechnete Resonanzfrequenz:	$f_R = 57 - 580 \text{ Hz},$
gemessene Resonanzfrequenz:	$f_R = 63 - 710 \text{ Hz},$
Verbesserung von $R_w$ :	$\Delta R_w = -8 - 19 \text{ dB},$
Verbesserung von $(R_w + C_{tr})$ :	$\Delta(R_w + C_{tr}) = -11 - 14 \text{ dB}.$

Aus diesen Angaben geht hervor, dass der betrachtete Datensatz die gesamte Vielfalt bauüblicher Konstruktionen abbildet. Lediglich WDVS mit einer Dicke von mehr als 200 mm sind nicht vertreten, da derartige Dämmstoffdicken zu der Zeit, als die Messungen durchgeführt wurden, noch nicht üblich waren. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die Aussagekraft der Untersuchungen, da das im IBP entwickelte Berechnungsverfahren neuen Untersuchungen zufolge auch für WDVS mit erhöhter Dämmstoffdicke anwendbar ist [9].

### 3.2 Untersuchte Berechnungsverfahren

Die beiden betrachteten Berechnungsverfahren sind nicht zur frequenzabhängigen Berechnung der Schalldämmung bestimmt, sondern beschränken sich auf Einzelangaben wie das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  sowie die Summe von  $R_w$  und den Spektrum-Anpassungswerten  $C$  und  $C_{tr}$ . Bei der Berechnung wird zunächst die Verbesserung der Schalldämmung der Grundwand durch das WDVS ermittelt. Um die Schalldämmung der Wand mit WDVS zu erhalten, wird der ermittelte Wert dann anschließend zur Schalldämmung der Grundwand ohne WDVS addiert. In der nachfolgenden Gleichung ist dies am Beispiel des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  veranschaulicht:

$$R_w = R_{w,o} + \Delta R_w \quad (5)$$

mit  $R_w$  = bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand mit WDVS,  
 $R_{w,o}$  = bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS,  
 $\Delta R_w$  = Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS.

Alle nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Verbesserung  $\Delta R_w$ . Bezieht man auch die Spektrum-Anpassungswerte  $C$  und  $C_{tr}$  mit ein, so ergeben sich zusätzlich die Verbesserungen  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$ , die in DIN EN ISO 12354-1 gemäß der in Frankreich üblichen Schreibweise als  $\Delta R_A$  und  $\Delta R_{Atr}$  bezeichnet werden. Da für die beiden letztgenannten Verbesserungen Berechnungsformeln vorliegen, wurden sie gleichfalls mit in die Betrachtungen einbezogen.

Die Bestimmung der Spektrum-Anpassungswerte  $C$  und  $C_{tr}$  erfolgte jeweils im Frequenzbereich von 100 Hz - 3150 Hz, wobei sich bei Erweiterung auf den Bereich von 100 Hz - 5000 Hz so gut wie keine Unterschiede ergaben. Frequenzen unter 100 Hz wurden hingegen nicht betrachtet, da dies im CEN-Verfahren nicht vorgesehen ist. Zwar wurde zwischenzeitlich im IBP ein aktualisiertes Berechnungsverfahren für die

Verbesserung  $\Delta(R_w + C_{tr,50-5000})$  entwickelt [10]. Die Anwendung dieses Verfahrens war im vorliegenden Fall jedoch nicht sinnvoll, da ein Vergleich mit dem untersuchten CEN-Verfahren nicht möglich war. Die Berechnung der Einzulangaben erfolgte mit einer Genauigkeit von 0,1 dB.

Der wichtigste Eingangswert bei der Berechnung der Schalldämmung ist die Resonanzfrequenz des WDVS,  $f_R$ , die gemäß

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left( \frac{1}{m''_p} + \frac{1}{m''_w} \right)} \quad (6)$$

aus der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht,  $s'$ , und den flächenbezogenen Massen von Wand und Putzschicht,  $m''_w$  und  $m''_p$ , ermittelt wird. Daneben hängt die Verbesserung der Schalldämmung durch das WDVS außerdem in starkem Maße vom bewerteten Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS,  $R_{w,o}$ , ab.

Zur Erläuterung der beiden betrachteten Berechnungsverfahren sind die verwendeten Formeln in den beiden nachfolgenden Abschnitten dargestellt. Die Darstellung bezieht sich beispielhaft auf die Verbesserung  $\Delta R_w$ . Die Berechnung von  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$  erfolgt jedoch in völlig gleicher Weise, mit dem einzigen Unterschied, dass die Berechnungskoeffizienten andere Zahlenwerte aufweisen.

Das CEN-Verfahren zur Berechnung der Schalldämmung von Wänden mit WDVS ist in DIN EN 12354-1, Anhang D.2.3 - D.2.5 dargestellt. Da Verfahren in den Anhängen recht unübersichtlich und zum Teil auch unklar dargestellt ist, wurde es so aufbereitet, dass es in Gliederung und Notation dem IBP-Verfahren entspricht. Auf diese Weise lassen sich die beiden Verfahren direkt miteinander verglichen, so dass sich auch die Unterschiede (d. h. die im CEN-Modell vorgenommenen Vereinfachungen) gut zu erkennen sind.

### 3.2.1 CEN-Verfahren

Zur Berechnung der Verbesserung  $\Delta R_w$  werden beim CEN-Modell folgende Eingangswerte benötigt:

- Resonanzfrequenz des WDVS  $f_R$  (wird nach Gl. (6) berechnet),
- Art des Dämmstoffs (Mineralfaser oder Schaumstoff)
- Angabe darüber, ob das WDVS zusätzlich mit Dübeln befestigt war,
- Prozentualer Anteil der Verklebung an der Gesamfläche des WDVS,
- bewertetes Schalldämm-Maß der Grundwand ohne WDVS  $R_{w,o}$ .

Die grundlegende Berechnungsformel im CEN-Verfahren lautet:

$$\Delta R_w = \Delta R_{w,s} - K_D - K_K - K_T \quad [N/m^2] \quad (7.1)$$

mit  $\Delta R_{w,s}$  = Verbesserung unter Standardbedingungen (unverdübelt, 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.

Die in Gl. (7.1) enthaltenen Ausdrücke werden folgendermaßen berechnet (die Resonanzfrequenz  $f_R$  ist jeweils in Hz in die Gleichungen einzusetzen):

$$\Delta R_{w,s} = \begin{cases} [-36 \lg(f_R) + 82,5] \text{ dB} \geq -4 \text{ dB} & \text{für Mineralfaser-Dämmstoffe} \\ [-33 \lg(f_R) + 76,0] \text{ dB} \geq -3 \text{ dB} & \text{für Dämmplatten aus Schaumstoff} \end{cases} \quad (7.2)$$

$$K_D = 0,66 \Delta R_{w,s} - 1,2 \text{ dB} \quad \text{bei Verdübelung mit 4 - 10 Dübeln / m}^2 \quad (7.3)$$

$$K_K = [0,05 F - 2,0] \text{ dB} \quad \text{mit } F = \text{Anteil der verklebten Fläche in \%} \quad (7.4)$$

$$K_T = -aX \quad (7.5)$$

mit  $a = (1,35 \lg(f_R) - 3,5) \leq 0$   
 $X = R_{w,o} - 53 \text{ dB} \quad \text{mit } -10 \text{ dB} \leq X \leq +7 \text{ dB}$

### 3.2.2 IBP-Verfahren

Das IBP-Verfahren verwendet die gleichen Eingangswerte wie das CEN-Verfahren. Bei Mineralfaser-Systemen wird jedoch zusätzlich zwischen Putzträger- und Lamellenplatten unterschieden. Außerdem geht auch der Strömungswiderstand  $r$  mit in die Berechnung ein. Für die grundlegende Berechnungsformel ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\Delta R_w = \Delta R_{w,s} - K_D - K_K - K_T - K_S \quad [N/m^2] \quad (8.1)$$

- mit  $\Delta R_{w,s}$  = Verbesserung unter Standardbedingungen (unverdübelt, 40 % Klebefläche, Grundwand mit  $R_{w,o} = 53 \text{ dB}$ ),
- $K_D$  = Korrektur zur Berücksichtigung von Dübeln,
  - $K_K$  = Korrektur zur Berücksichtigung der Klebefläche,
  - $K_T$  = Korrektur für die Schalldämmung der Grundwand,
  - $K_S$  = Korrektur zur Berücksichtigung des Strömungswiderstandes bei Mineralfaser-Dämmstoffen.

Die Berechnung der in Gl. (8.1) enthaltenen Ausdrücke erfolgt gemäß:

$$\Delta R_{w,s} = (a \lg(f_R) + b) \text{ dB} \quad (\text{Koeffizienten } a \text{ und } b \text{ siehe Tab. 1}) \quad (8.2)$$

$$K_D = \begin{cases} 0 & \text{ohne Dübel} \\ 0,34 \Delta R_{w,s} + 0,4 \text{ dB} & \text{mit Dübeln (mindestens 4 Dübel pro m}^2) \end{cases} \quad (8.3)$$

$$K_K = [0,052 F - 2,1] \text{ dB} \quad \text{mit } F = \text{Anteil der verklebten Fläche in \%} \quad (8.4)$$

$$K_T = (-1,4 \lg(f_R) + 3,6) (R_{w,o} - 53 \text{ dB}) \quad (8.5)$$

$$K_S = \begin{cases} (-0,11 r + 3,8) \text{ dB} & \text{für MFP-Systeme} \\ (-0,38 r + 9,8) \text{ dB} & \text{für MFL-Systeme} \end{cases} \quad (8.6)$$

Der Strömungswiderstand  $r$  ist in der Einheit  $\text{kPa s/m}^2$  in Gl. (4.6) einzusetzen. Für die in Gl. (8.2) verwendeten Koeffizienten  $a$  und  $b$  sind abhängig von der Resonanzfrequenz  $f_R$  folgende Werte zu verwenden:

Frequenzbereich für $f_R$	Koeffizienten für Gl. (4.2) [-]			
	Polystyrol-Systeme		Mineralfaser-Syst.	
	$a$	$b$	$a$	$b$
$f_R < 125 \text{ Hz}$	-35,1	79,7	-35,9	82,4
$125 \text{ Hz} \leq f_R < 250 \text{ Hz}$	-26,7	62,0	-36,5	83,7
$f_R \geq 250 \text{ Hz}$	-2,4	3,8	5,4	-16,7

**Tab. 2:** Berechnungskoeffizienten  $a$  und  $b$  für Gl. (4.2) in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz  $f_R$ .

### 3.2.3 Unterschiede zwischen CEN- und IBP-Verfahren

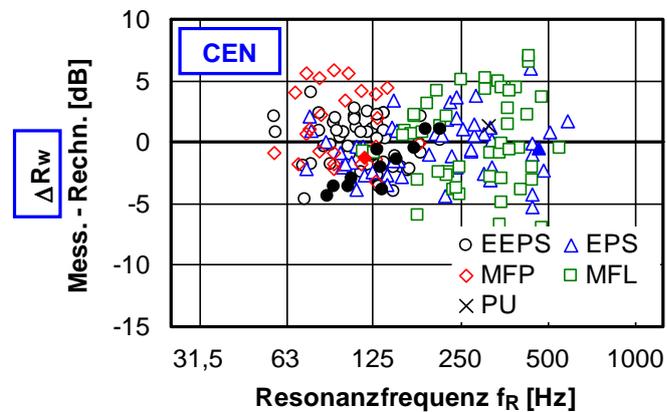
Wie aus den oben dargestellten Berechnungsformeln hervorgeht, stellt das CEN-Verfahren eine vereinfachte Version des IBP-Verfahrens dar, wobei sich der Berechnungsaufwand allerdings nur wenig verringert. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Verfahren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Gegensatz zum IBP-Verfahren wird der Strömungswiderstand von Mineralfaser-Dämmstoffen beim CEN-Verfahren nicht berücksichtigt.
- Das IBP-Verfahren unterscheidet zwischen Mineralfaser-Putzträgerplatten (Faserichtung parallel zur Plattenoberfläche) und Mineralfaser-Lamellenplatten (Faserichtung senkrecht zur Oberfläche). Beim CEN-Verfahren entfällt dieser Unterschied.
- Beim IBP-Verfahren wird zwischen drei verschiedenen Bereichen der Resonanzfrequenz ( $f_R < 125 \text{ Hz}$ ,  $125 \text{ Hz} \leq f_R < 250 \text{ Hz}$  und  $f_R \geq 250 \text{ Hz}$ ) unterschieden, für die jeweils unterschiedliche Berechnungskoeffizienten verwendet werden. Das CEN-Verfahren verwendet demgegenüber für alle Werte der Resonanzfrequenz den gleichen Koeffizientensatz.

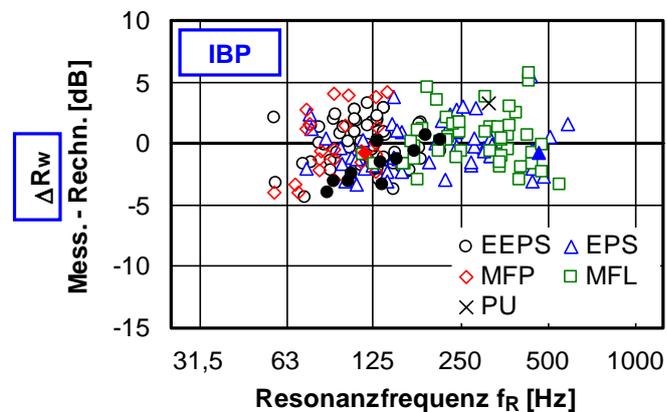
## 3.3 Ergebnisse

Die für die beiden betrachteten Berechnungsverfahren ermittelten Ergebnisse sind in den Abbildungen 23 bis 28 dargestellt. Aufgetragen ist jeweils die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Werten in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz des WDVS. Die Berechnungen erfolgten für die Verbesserungen  $\Delta R_w$ ,  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$  (siehe Titel der Ordinatenachse). Das jeweils verwendete Berechnungsverfahren (CEN- oder IBP-Verfahren) ist aus der Beschriftung in der linken oberen Ecke der Diagramme ersichtlich. Die Art des Dämmstoffs geht aus den verwendeten Symbolen her-

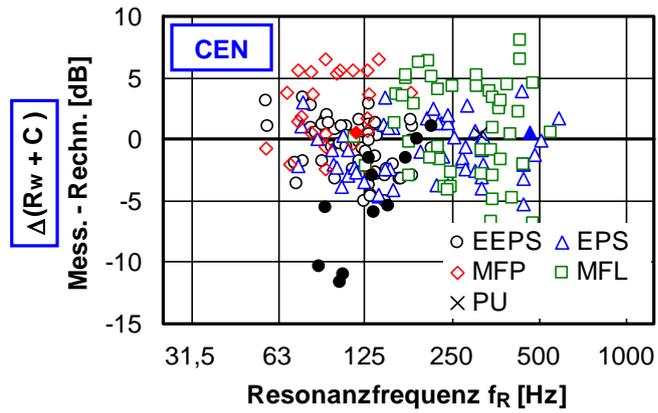
vor. Bei den ausgefüllten Symbolen handelt es sich um leichte Wände mit niedriger Rohdichte ( $\rho < 1000 \text{ kg/m}^3$ ).



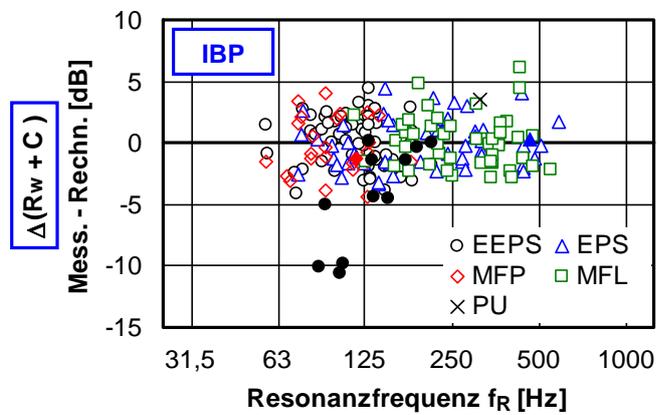
**Abb. 23:** Differenz zwischen Messung und Rechnung für die Verbesserung  $\Delta R_w$  bei Berechnung mit dem CEN-Modell. Die untersuchten WDVS (insgesamt 200 Systeme) bestanden aus unterschiedlichen Dämmstoffen, die in der Legende angegeben sind. Die ausgefüllten Symbole bezeichnen Messungen, die an leichten Wänden mit niedriger Rohdichte ( $\rho < 1000 \text{ kg/m}^3$ ) durchgeführt wurden.



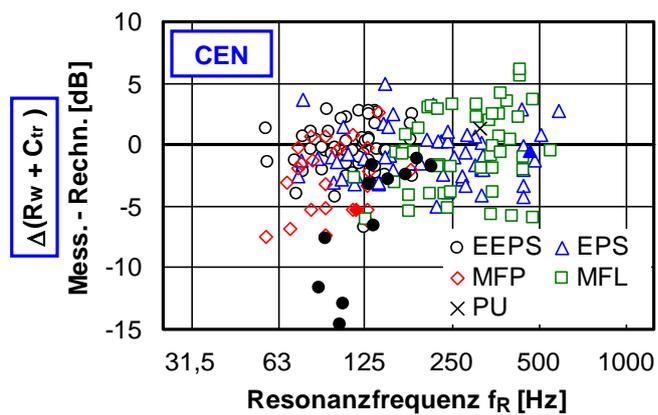
**Abb. 24:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 1, jedoch bei Verwendung des IBP-Modells.



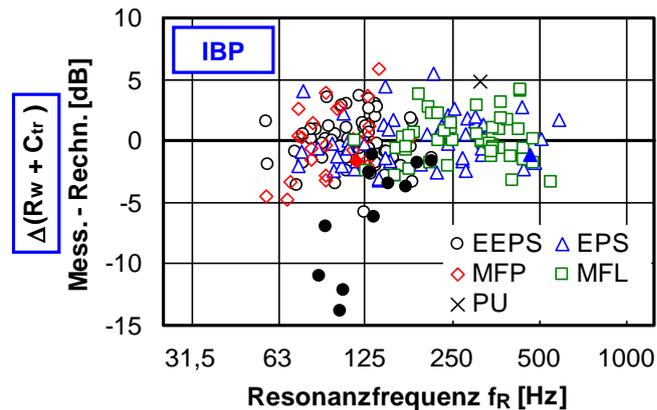
**Abb. 25:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 1, jedoch für die Verbesserung  $\Delta(R_w + C)$  in Verbindung mit dem CEN-Modell.



**Abb. 26:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 1, jedoch für die Verbesserung  $\Delta(R_w + C)$  in Verbindung mit dem IBP-Modell.



**Abb. 27:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 1, jedoch für die Verbesserung  $\Delta(R_w + C_{tr})$  in Verbindung mit dem CEN-Modell.



**Abb. 28:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 1, jedoch für die Verbesserung  $\Delta(R_w + C_{tr})$  in Verbindung mit dem IBP-Modell.

Aus den dargestellten Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass zwischen der Genauigkeit der beiden betrachteten Berechnungsverfahren und der Resonanzfrequenz des WDVS nur eine geringe Abhängigkeit besteht. Die höchste Berechnungsgenauigkeit ergibt sich in beiden Fällen für  $\Delta R_w$ . Beim CEN-Verfahren sind jedoch durchweg größere Unterschiede zwischen Messungen und Rechnung als bei Verwendung des IBP-Verfahrens zu verzeichnen.

Auffällig sind drei Ausreißer in den Berechnungsergebnissen für  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$ , die bei einer Resonanzfrequenz von etwa 80 Hz bis 100 Hz auftreten und in den Ergebnissen für  $\Delta R_w$  nicht vorhanden sind. Bei den Ausreißern handelt es sich um WDVS aus elastifiziertem Polystyrol, die auf leichten Grundwänden mit niedriger Rohdichte angebracht wurden. Sie weisen jeweils einen besonders scharfen und tiefen Dämmungseinbruch im Bereich der Resonanzfrequenz auf. Im bewerteten Schalldämmmaß macht sich dieser Einbruch wegen der Besonderheiten der Einzelnwertbildung (arithmetische Mittelung der ungünstigen Abweichungen unterhalb der Bezugskurve) nur wenig bemerkbar. In die Spektrum-Anpassungswerte C und  $C_{tr}$  geht er hingegen in voller Höhe ein.

In Tab. 3 sind die Ergebnisse einer statistischen Auswertung der in den Abbildungen 23 bis 28 aufgetragenen Werte wiedergegeben. Bedeutsam ist vor allem die in der rechten Tabellenspalte dargestellte Standardabweichung, die die Berechnungsgenauigkeit der betrachteten Verfahren repräsentiert. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen in den obigen Abbildungen weist das CEN-Verfahren auch hier in allen Fällen eine geringere Genauigkeit als das IBP-Verfahren auf.

Einzahl- angabe	Verfah- ren	Statistischer Kennwert [dB]			
		Min.	Max.	M.w.	$\sigma$
$\Delta R_w$	CEN	-6,8	7,0	-0,1	2,7
	IBP	-4,4	5,7	-0,1	2,0
$\Delta(R_w + C)$	CEN	-11,6	8,0	-0,2	3,3
	IBP	-10,6	6,1	-0,2	2,4
$\Delta(R_w + C_{tr})$	CEN	-14,6	6,0	-1,2	3,0
	IBP	-13,8	5,8	-0,3	2,6

Min. = größte negative Abweichung  
Max. = größte positive Abweichung  
M.w. = Mittelwert der Abweichungen  
 $\sigma$  = Standardabweichung

**Tab. 3:** Statistische Kennwerte für die Differenz zwischen Messung und Rechnung (Messergebnis minus Rechenwert). Auswertung für den gesamten vorhandenen Datensatz (insgesamt 200 Konstruktionen). Ergebnisse für die drei untersuchten Einzahlangaben ( $\Delta R_w$ ,  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$ ) jeweils in Verbindung mit zwei verschiedenen Berechnungsverfahren (CEN- und IBP-Verfahren). Weist die in der Tabelle dargestellte Abweichung einen positiven Wert auf, so liegt das Berechnungsergebnis unter dem gemessenen Wert.

In DIN EN ISO 12354-1 wird in Anhang D.2.5 für alle drei oben genannten Einzahlangaben - d. h.  $\Delta R_w$ ,  $\Delta(R_w + C)$  und  $\Delta(R_w + C_{tr})$  - für die Berechnungsgenauigkeit eine Standardabweichung von ungefähr 2 dB genannt. Gemäß den in der obigen Tabelle dargestellten Ergebnissen, wird diese Genauigkeit durch das CEN-Verfahren jedoch in keinem Fall erreicht.

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht hervor, dass das im Entwurf der DIN EN ISO 12354-1 enthaltene akustische Berechnungsverfahren für WDVS (CEN-Verfahren) etwas einfacher aufgebaut ist als das im IBP entwickelte Modell (IBP-Verfahren). Die Unterschiede sind allerdings nur gering und beeinflussen den erforderlichen Berechnungsaufwand nur unerheblich. Als Folge der Vereinfachungen weist das CEN-Verfahren im Vergleich zum IBP-Verfahren allerdings eine merklich verminderte Berechnungsgenauigkeit auf. In Bezug auf die Verbesserung des bewerteten Schalldämmmaßes durch des WDVS,  $\Delta R_w$ , äußert sich dies in einem Anstieg der Standardabweichung von  $\sigma = 2,0$  dB auf  $\sigma = 2,7$  dB (die Standardabweichung bezieht sich jeweils auf die Differenz zwischen Messung und Rechnung). Der in DIN EN ISO 12354-1, Anhang D.2.5 für die Berechnungsgenauigkeit angegebene Wert von  $\sigma \cong 2,0$  dB wird demnach in der Praxis merklich überschritten. Außerdem besteht beim CEN-Verfahren das Problem, dass die Berechnung für  $\Delta(R_w + C_{tr})$  im Mittel systematisch 1,2 dB zu hohe Werte liefert.

Man könnte nun einwenden, dass das IBP-Verfahren bei dem Vergleich im Vorteil gewesen sei, weil der für die Untersuchungen verwendete Datensatz die Entwicklungsgrundlage für das IBP-Verfahren bildete. Andererseits wurde das CEN-Verfahren ohne nennenswerte eigene Datenbasis auf Grundlage des IBP-Verfahrens entwickelt, so dass

es letztlich auf dem gleichen Datensatz beruht. Die für die beiden Berechnungsverfahren ermittelten Ergebnisse sind deshalb direkt miteinander vergleichbar.

Als Fazit der durchgeführten Untersuchungen ergibt sich, dass beide betrachteten Berechnungsverfahren von kleineren Einschränkungen abgesehen funktionieren und für die akustische Auslegung von WDVS herangezogen werden können. Das CEN-Verfahren ist gegenüber dem IBP-Verfahren ein wenig einfacher aufgebaut, weist im Gegenzug allerdings auch eine merklich verminderte Genauigkeit auf.

## 4 Zusammenfassung

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die akustischen Eigenschaften von zweilagigen Wärmedämm-Verbundsystemen untersucht. Um den Einfluss der Verklebung zwischen den beiden Dämmstoffplatten auf die Schalldämmung zu klären, wurde eine systematische Messreihe durchgeführt. Die Messungen erfolgten an einem vereinfachten Versuchsaufbau mit einer Fläche von 1,2 m x 1,45 m in einem bauakustischen Fensterprüfstand. Nach der Auswertung der Messungen wurden die Ergebnisse mit Berechnungen nach dem derzeit bei bauaufsichtlichen Zulassungen verwendeten Prognoseverfahren für einlagige Dämmsysteme verglichen. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse sind:

- Abgesehen von einer zweiten Resonanz bei höheren Frequenzen weisen zweilagige WDVS eine ähnliche Schalldämmung wie sonst baugleiche einlagige Systeme auf.
- Die vorhandenen Berechnungsmodelle für das bewertete Schalldämm-Maß von Wänden mit einlagigen WDVS sind daher auch für zweilagige Systeme verwendbar. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die flächenbezogene Masse des Klebstoffs zwischen den Dämmstoffplatten
  - a) weniger als ca. 4 kg/m<sup>2</sup> und
  - b) maximal ca. 40 % der Masse des Außenputzes beträgt.
- Die obigen Aussagen gelten für alle Arten von Dämmstoffen, Systeme mit und ohne Dübel sowie auch für WDVS, die aus zwei unterschiedlich dicken Dämmstofflagen oder zwei Dämmstofflagen aus unterschiedlichem Material bestehen. Im letztgenannten Fall ist bei der Berechnung der Schalldämmung die resultierende dynamische Steifigkeit der beiden Dämmschichten heranzuziehen.

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich das in E DIN EN ISO 12354-1: 2016-03 enthaltene Berechnungsverfahren für die Schalldämmung von WDVS (CEN-Verfahren) hinsichtlich der Berechnungsgenauigkeit von dem derzeit in Deutschland verwendeten Verfahren (DIBt-Verfahren) unterscheidet. Die Untersuchung erfolgte durch Vergleich von Rechnung und Messung für etwa 200 Datensätze und erbrachte folgende Ergebnisse:

- Das CEN-Verfahren stellt eine vereinfachte Variante des DIBt-Verfahrens dar, unterscheidet sich im Berechnungsaufwand jedoch kaum.

- Infolge der Vereinfachungen weist das CEN-Verfahren im Vergleich zum DIBt-Verfahren eine merklich verminderte Berechnungsgenauigkeit auf. Bei der Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch das WDVS,  $\Delta R_w$ , äußert sich dies z. B. in einem Anstieg der Standardabweichung von  $\sigma = 2,0$  dB auf  $\sigma = 2,7$  dB.
- Für die Einzahlangabe  $\Delta(R_w + C_{tr})$  liefert das CEN-Verfahren systematisch 1,2 dB zu hohe Werte.
- Die in E DIN EN ISO 12354-1 in Anhang D.2.5 genannte Berechnungsgenauigkeit von  $\sigma = 2,0$  dB wird in der Praxis zumeist deutlich überschritten.

## 5 Literatur

- [1] DIN EN ISO 12354-1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen (Entwurf, März 2016).
- [2] Müller, S.; Weber, L.: Technische Stellungnahme zur Schalldämmung von Massivwänden mit zweilagigem Wärmedämm-Verbundsystem. Untersuchung im Auftrag der DAW Stiftung & Co KG, Geschäftsbereich alsecco, 9. Jan. 2014.
- [3] DIN EN ISO 12999-1: Akustik - Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik - Teil 1: Schalldämmung (Sept. 2014).
- [4] DIN EN ISO 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (Dez. 2010).
- [5] DIN EN 29052-1: Akustik; Bestimmung der dynamischen Steifigkeit; Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden (Aug. 1992).
- [6] DIN EN 29053: Akustik - Materialien für akustische Anwendungen - Bestimmung des Strömungswiderstandes (Mai 1993).
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Weber, L.; Müller, S.: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen. Bericht B-BA 1/2014 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Feb. 2015.
- [10] Weber, L.: WDV-Systeme zum Thema Schallschutz. Technische Systeminfo 7 des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Herausgeber), Jan. 2013.
- [11] Blevins, R. D.: Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing Company, Reprint Edition 2001, S. 48, Tab. 6-2.