

**Kriterien für die schalltechnisch günstige  
Ausführung von Wänden aus gelochten  
Mauersteinen. 2. Projektabschnitt**

**T 3054**

**T 3054**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2003, ISBN 3-8167-6614-5

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.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)

**Fraunhofer-Institut für Bauphysik**

**IBP-Bericht B-BA 3/2003**

**Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung  
von Wänden aus gelochten Mauersteinen  
2. Projektabschnitt**

von

L. Weber

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
(Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. K. Sedlbauer)



Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung ·  
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten · Forschung, Entwicklung,  
Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Institutsleitung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult.  
Karl Gertis

## **IBP-Bericht B-BA 3/2003**

### **Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung von Wänden aus gelochten Mauersteinen**

#### **2. Projektabschnitt**

im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin

Geschäftszeichen: P 32-5-5.46-906/99

Projekt-Nr.: 422061

Dieser Bericht umfaßt:    30 Seiten Text  
                                  1 Tabelle  
                                  20 Bilder  
                                  9 Anhänge mit insgesamt 12 Seiten

Stuttgart, den 11. September 2003

Wb

Bearbeiter:

Dr. rer. nat. L. Weber

Abteilungsleiter:

Dr.-Ing. P. Leistner

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. K. Sedlbauer

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	4
2	Berechnung der Durchgangsdämmung .....	5
2.1	Änderung der Massekurve .....	6
2.2	Erprobung des Verfahrens an neuen Daten .....	7
2.3	Eingrenzung des Anwendungsbereichs .....	7
2.4	Anwendungsregeln .....	9
2.5	Genauigkeit.....	10
2.6	Praktische Erfahrungen .....	11
2.7	Einsatz in der bauaufsichtlichen Zulassung .....	13
3	Schwingungsmessungen an Steinverbänden.....	13
4	Schall-Längsdämmung .....	15
4.1	Meßaufbau .....	16
4.2	Meßdurchführung .....	17
4.3	Berechnungen nach DIN EN 12354-1 .....	18
4.4	Ergebnisse .....	21
4.4.1	Körperschall-Nachhallzeit und Stoßstellendämmung .....	21
4.4.2	Durchgangs- und Längsdämmung.....	22
4.4.3	Vergleich von Messung und Rechnung .....	23
4.4.4	Rechnung mit Einzahlangaben .....	24
5	Zusammenfassung .....	25
6	Literaturverzeichnis .....	28

## 1 Einleitung

Da Lochsteinwände häufig eine erheblich geringere Schalldämmung als gleich schwere homogene Bauteile aufweisen, hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) unter finanzieller Beteiligung der Herstellerverbände das Fraunhofer-Institut für Bauphysik mit der Durchführung eines entsprechenden Forschungsvorhabens beauftragt. Neben der Untersuchung der akustischen Zusammenhänge besteht das Ziel des Vorhabens vor allem darin, ein zuverlässiges Berechnungsmodell zu entwickeln, mit dem sich die Schalldämmung von Lochsteinwänden aus den technischen Daten der Steine und dem Wandaufbau vorherbestimmen läßt.

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erfolgte in zwei Abschnitten. Im ersten Projektabschnitt, dessen Ergebnisse im Bericht B-BA 3/2002 [1] dokumentiert sind, wurde ein Vorhersageverfahren für die Durchgangsdämmung von Lochsteinwänden in drei Genauigkeitsstufen entwickelt. Im zweiten Projektabschnitt, über den hier berichtet wird, wird die erste Genauigkeitsstufe (rechnerische Vorherbestimmung der Schalldämmung anhand der Bauteildaten ohne Einbeziehung akustischer Meßwerte) verfeinert und ergänzt. Außerdem wird die Längs- und Stoßstellendämmung von Lochsteinwänden näher untersucht.

In Absprache mit den Betreuern des Forschungsvorhabens wurde der Arbeitsschwerpunkt im zweiten Projektabschnitt auf die Untersuchung der Schall-Längsdämmung gelegt. Dies hat neben fachlichen auch praktische Gründe, da Lochsteine hauptsächlich bei Außenwänden eingesetzt werden und Schallschutzmängel bei Außenwänden zumeist infolge erhöhter Längsleitung entstehen (Schallübertragung zwischen benachbarten Wohnungen entlang des Flankenweges Ff). Die Durchgangsdämmung ist demgegenüber weniger kritisch, da sie in den meisten Fällen durch die Fenster bestimmt wird.

Da der vorliegende Bericht die Fortführung der im 1. Projektabschnitt begonnenen Arbeiten beschreibt, wird auf die Erläuterung der Untersuchungs- und Berechnungsgrundlagen weitgehend verzichtet. Diese sind in ausführlicher Form

im vorangehenden Bericht B-BA 3/2002 nachzulesen. Eine Übersicht über alle verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen ist in Anhang 1 enthalten

## **2 Berechnung der Durchgangsdämmung**

Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der Fertigstellung des im ersten Projektabschnitt entwickelten Berechnungsverfahrens für die Durchgangsdämmung von Lochsteinwänden (erste Genauigkeitsstufe). Von Seiten des Auftraggebers wird dieses Verfahren gegenüber der zweiten Genauigkeitsstufe, bei der die Schalldämmung auf der Grundlage von Schwingungsmessungen an Steinverbänden ermittelt wird, mit erhöhter Priorität bewertet, da es zukünftig im Bereich bauaufsichtlicher Zulassungen eingesetzt werden soll.

Zur Erweiterung der Datengrundlage und zur Erprobung des Verfahrens an einem zweiten, unabhängigen Datensatz war zunächst vorgesehen, die Hersteller von Lochsteinen anzuschreiben und um die Überlassung von Schalldämm-Messungen zu bitten. Nach Rücksprache mit Vertretern der Herstellerverbände wurde jedoch wegen mangelnder Erfolgsaussichten von diesem Vorhaben Abstand genommen und die Sammlung weiterer Daten auf die von der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel zur Verfügung gestellten Meßergebnisse beschränkt. Wegen der geringen Anzahl dieser Messungen (es handelte sich um Meßwerte an fünf Wänden) wurde auf eine Überarbeitung des Berechnungsverfahrens verzichtet und lediglich die Anwendbarkeit in bezug auf die neuen Daten überprüft. Des weiteren wurden bei der praktischen Anwendung zu Tage getretene Unzulänglichkeiten des Verfahrens behoben, Unklarheiten bei der Durchführung der Berechnungen beseitigt und der Anwendungsbereich des Verfahrens eingegrenzt.

Die Einbeziehung weiterer Einflußgrößen in das Berechnungsmodell wurde unterlassen, da hierdurch gemäß den Ausführungen in Ziffer 2.5 derzeit keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit zu erwarten wäre. Dies gilt auch für die Berücksichtigung der versteifenden Wirkung des Außenrahmens der Steine, da die seitlichen Steinränder - zumindest bei den akustisch bedeutsamen Grundschwingungen - weitgehend in Ruhe bleiben und deshalb für die Schalldämm-

mung in erster Näherung von untergeordneter Bedeutung sind. Über den akustischen Einfluß der stirnseitigen Rahmenteile (innere und äußere Deckelplatte der Steine) liegen bislang zu wenige Erkenntnisse vor, um eine Einbindung in das Berechnungsmodell zu ermöglichen.

## 2.1 Änderung der Massekurve

Einen wichtigen Bestandteil des Prognoseverfahrens bildet die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes einer ungelochten Wand, die die gleiche Flächenmasse wie die untersuchte Lochsteinwand aufweist. Das Berechnungsergebnis wird im Prognosemodell als  $R_{w,u}$  bezeichnet. Bislang wurde zur Berechnung von  $R_{w,u}$  für alle Arten von Steinen einheitlich eine aus DIN 4109, Beiblatt 1 und 3 abgeleitete Näherungsformel verwendet (B-BA 3/2002, Ziffer 3.4.2). Da sich hierbei jedoch für Wände aus Bimsbeton systematisch zu niedrige Werte ergaben, wurde eine Differenzierung der Berechnungsformel nach Baustoffarten vorgenommen, die auf entsprechenden Untersuchungen an der Fachhochschule Stuttgart beruht [2]. Zugleich wurde die Größe  $\Delta R_{w,L}$ , die den Einfluß der Lochung auf die Schalldämmung beschreibt, um 0,2 dB angehoben, um auf diese Weise zu erreichen, daß die mittlere Abweichung zwischen Messung und Rechnung den Wert Null annimmt. Für  $\Delta R_{w,L}$  ergibt sich auf diese Weise der geänderte Ausdruck

$$\Delta R_{w,L} = K_{\text{Stein}} / K_{\text{Wand}} + 0,2 \text{ dB} \geq 0 . \quad (1)$$

Das geänderte Berechnungsmodell und eine kurze Erläuterung der im Modell verwendeten Formelzeichen sind in Anhang 2 zusammengestellt. Bei Ziegeln erfolgt die Berechnung von  $R_{w,u}$  nach wie vor nach DIN 4109. Für Wände aus Kalksandstein und Bimsbeton werden hingegen alternative Berechnungsformeln verwendet. Hierdurch vermindert sich die Schalldämmung der Kalksandsteinwände geringfügig (um 0,1 bis 0,4 dB), während die Schalldämmung der Bimsbetonwände deutlich (um 0,7 bis 2,7 dB) ansteigt. Die Verwendung geänderter Massekurven verbessert die Berechnungsgenauigkeit des Prognosemodells bezogen auf den gesamten Datenbestand um ca. 0,2 dB. Angaben über die erreichte Meßgenauigkeit sind Ziffer 2.5 zu entnehmen.



## 2.2 Erprobung des Verfahrens an neuen Daten

Zur Erprobung und Verfeinerung des Berechnungsmodells wurden von der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel neue Schalldämm-Messungen an fünf Wänden aus Hochlochziegeln zur Verfügung gestellt. Obgleich Herkunft und Dokumentation der Daten zum Teil lückenhaft waren, wurden die Ergebnisse dennoch in die Untersuchungen einbezogen, da keine anderen Werte zur Verfügung standen. Der Aufbau der fünf Wände und die Lochbilder der verwendeten Steine sind in den Anhängen 3 und 4 wiedergegeben. Anhang 3 enthält außerdem auch Angaben über die gemessenen und berechneten Schalldämm-Maße.

Drei der Steine (die Steine TR1, TR2 und TR3) wiesen ein Lochbild auf, für das das Berechnungsverfahren nicht oder nur mit verminderter Genauigkeit anwendbar ist. Trotz dieser Einschränkung ergaben sich für die Steine TR2 und TR3 mit  $\Delta R_w = 3,5 \text{ dB}$  und  $-2,5 \text{ dB}$  nur verhältnismäßig geringe Abweichungen zwischen Messung und Rechnung. Bei dem Stein TR1 betrug die Abweichung hingegen  $6,5 \text{ dB}$ , so daß die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens hier nicht mehr gewährleistet ist. In Anbetracht des inhomogenen Lochbildes dieses Steins, war dies - wie auch aus den Darlegungen in Ziffer 2.3 hervorgeht - auch nicht anders zu erwarten.

Bei den Steinen VR10 und VU8 bestanden hinsichtlich der Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens keine Einschränkungen. Während beim Stein VR10 mit  $\Delta R_w = 1,6 \text{ dB}$  eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt wurde, trat beim Stein VU8 mit  $\Delta R_w = -5,1 \text{ dB}$  eine ungewöhnlich hohe Abweichung auf. Die Ursache für diese Abweichung ist unklar. Möglicherweise ist sie gar nicht auf das Berechnungsverfahren, sondern auf meßtechnisch bedingte Streuungen zurückzuführen. Auf diesen Punkt wird in Ziffer 2.5 noch genauer eingegangen.

## 2.3 Eingrenzung des Anwendungsbereichs

Für den praktischen Einsatz des Berechnungsverfahrens werden Kriterien benötigt, mit deren Hilfe sich eindeutig entscheiden läßt, ob eine gegebene Wand die geltenden Anwendungsvoraussetzungen erfüllt. Im folgenden werden daher die Anwendungsgrenzen des Berechnungsverfahrens abgesteckt. Das Verfahren ist anwendbar für:

- Einschalige Massivwände aus gelochten Mauersteinen mit einer Breite von 240 bis 365 mm (geringfügig größere Breiten sind unkritisch),
- praxisübliche Bauteilabmessungen (Mindestgröße der Wand ca. 10 m<sup>2</sup>),
- bauübliche Anbindung der Plattenränder an die Flankenbauteile.

Die Einschränkung des Anwendungsbereichs auf Steinbreiten von mindestens 240 mm ist für die Praxis nicht nachteilig, da bei Steinen mit geringerer Breite die Lochung in der Regel keinen merklichen Einfluß auf die Schalldämmung hat. Derartige Wände lassen sich demnach rechnerisch wie ungelochtes Mauerwerk behandeln.

Neben den genannten Voraussetzungen, die sich auf die Bauteilabmessungen und die Flankenanschlüsse beziehen, muß auch das Lochbild der Steine bestimmte Bedingungen erfüllen, da ein vereinfachtes Berechnungsmodell, das die komplizierten dynamischen Eigenschaften des Steingefüges durch einen einzelnen geometrischen Parameter nachbildet, naturgemäß nicht alle denkbaren Lochungen erfassen kann. Wichtige Voraussetzungen sind deshalb:

- Homogene Verteilung der Löcher innerhalb des Steinquerschnitts (kleine Inhomogenitäten, wie z. B. Grifflöcher, sind unkritisch, sofern sie insgesamt nicht mehr als 10% der Querschnittsfläche umfassen),
- eindeutige Zugehörigkeit zu einer der beiden im Berechnungsmodell unterschiedenen Steinklassen (Steine mit und ohne durchgehende Querstege).

Die letzte Forderung, obgleich scheinbar trivial, kann in der Praxis Probleme bereiten. Dies betrifft solche Steine, die lediglich über einen oder zwei durchgehende Stege verfügen und ansonsten versetzte Lochebenen aufweisen. Beispiele hierfür sind die Steine TU1 und TU2 im Bericht B-BA 3/2002 sowie die Steine TR1, TR2 und TR3 in Anhang 4. Sofern nur ein durchgehender Steg in der Steinmitte vorhanden ist (dies ist bei den Steinen TU1, TU2, TR2 und TR3 der Fall), hat die durch den Steg bewirkte Aussteifung bei den üblichen Stegdicken von wenigen Millimetern nur verhältnismäßig geringen Einfluß auf die Schalldämmung. Es ist deshalb günstiger, diese Steine rechnerisch so zu behandeln, als wenn sie nur versetzte Stege aufweisen würden. Die Berechnung des Steifigkeitsparameters erfolgt hierbei in üblicher Weise, abgesehen davon,

daß Anfangs- und Endpunkt des Weges  $s$  nicht in der Mitte der Außenflächen, sondern in der Mitte zwischen dem seitlichen Rahmen und dem durchgehenden Quersteg liegen. Für die vier oben erwähnten Steine ergeben sich bei dieser Vorgehensweise Abweichungen zwischen Messung und Rechnung in Höhe von  $\Delta R_w = -3,7$  dB bis  $4,8$  dB. Das beschriebene Verfahren ist vermutlich auch bei Steinen mit zwei durchgehenden Stegen anwendbar, wobei sich Anfangs- und Endpunkt des Weges  $s$  in die Mitte zwischen den beiden Stegen befinden müssen. Für den Stein TR1 trifft dies wegen seines inhomogenen Lochbildes allerdings nicht zu.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß es sich bei den mit dem Berechnungsmodell ermittelten Werten um das bewertete Schalldämm-Maß ohne Flankenübertragung handelt. Eine entsprechende Bausituation ist normalerweise nur in bauakustischen Prüfständen vorhanden. Da am Bau immer zusätzliche Flankenwege vorliegen, ist die Schalldämmung dort grundsätzlich geringer.

#### **2.4 Anwendungsregeln**

Bei der praktischen Erprobung des Berechnungsverfahrens zeigte sich, daß bei der Anwendung zum Teil noch Unklarheiten bestehen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Daher werden im folgenden Anwendungsregeln formuliert, die eine einheitliche Durchführung der Berechnungen ermöglichen und damit reproduzierbare Ergebnisse gewährleisten sollen:

- Berücksichtigung nicht durchgehender Löcher:  
Griffaschen und Dollenlöcher werden bei der Bestimmung des Steifigkeitsmaßes im allgemeinen nicht berücksichtigt. Eine Ausnahme bilden Löcher, die fast durch den gesamten Stein reichen und deshalb wie durchgehende Löcher zu behandeln sind.
  
- Bestimmung des Steifigkeitsmaßes  $S$ :  
Das Steifigkeitsmaß  $S$  ist gemäß  $S = B/s$  definiert, wobei  $B$  die Steinbreite und  $s$  den kürzesten Weg von der Vorder- zur Rückseite des Steins entlang der Stege bezeichnen. Der Weg verläuft in der Stegmitte und beginnt und endet jeweils in der Mitte der Stirnflächen (siehe Bild 1) Der seitliche Rahmen des Steins und durchgehende Querstege sind hierbei ausgenommen.

- Steine mit einem oder zwei durchgehenden Querstegen:  
Bei Steinen mit nur einem durchgehenden Quersteg wird die Berechnung wie bei Steinen mit versetzten Stegen durchgeführt. Anfangs- und Endpunkt des Weges  $s$  liegen in diesem Fall in der Mitte zwischen dem durchgehenden Steg und dem seitlichen Rahmen des Steins. Bei Steinen mit zwei durchgehenden Stegen wird in gleicher Weise verfahren, wobei der Weg  $s$  jedoch in der Mitte zwischen den beiden Stegen beginnt und endet.
  
- Negative Werte von  $\Delta R_{w,L}$ :  
Die Größe  $\Delta R_{w,L}$  bezeichnet die Verminderung der Schalldämmung der untersuchten Wand durch die Lochung der Steine. Sie muß immer größer oder gleich Null sein. Sollte sich bei der Berechnung für  $\Delta R_{w,L}$  ausnahmsweise ein negativer Wert ergeben, so ist dieser gleich Null zu setzen. Wände mit  $\Delta R_{w,L} \leq 0$  verhalten sich schalltechnisch wie gleich schwere homogene Wände.
  
- Durchgehende Querstege mit ungleichförmiger Dicke:  
Bei durchgehenden Querstegen mit veränderlicher Dicke ist zur Bestimmung der mittleren Stegdicke  $d_Q$  eine Mittelung über die gesamte Steglänge vorzunehmen. Berücksichtigt werden hierbei nur die Bereiche neben den Löchern. Ein Beispiel für einen Stein mit kreisförmigen Löchern ist in Bild 2 dargestellt. Weisen die einzelnen Stege unterschiedliche Dicken auf, so ist bei der Bestimmung von  $d_Q$  auch hierüber zu mitteln.

## 2.5 Genauigkeit

Für die Anwendbarkeit des entwickelten Berechnungsmodells ist maßgebend, wie stark sich die gemessenen und berechneten Werte des bewerteten Schalldämm-Maßes voneinander unterscheiden. In Anhang 5 sind die Meß- und Berechnungsergebnisse für alle untersuchten Wände tabellarisch zusammengestellt. Eine Übersicht über die ermittelten Ergebnisse ist außerdem in Bild 3 sowie - nach verschiedenen Arten von Steinen unterschieden - in Anhang 6 wiedergegeben. Wie aus der statistischen Auswertung der Ergebnisse hervorgeht, ist der Unterschied zwischen Messung und Rechnung im Mittel gleich Null, während die zugehörige Standardabweichung 2,4 dB beträgt. Gemäß Anhang 6 ist die Berechnungsgenauigkeit bei allen Steintypen von ungefähr gleicher Grö-

Benennung (maßgebender Kennwert ist hier der quadratisch gemittelte Fehler  $\overline{\Delta R_w^q}$ ).

Hinsichtlich der Genauigkeit des entwickelten Berechnungsmodells ist zu berücksichtigen, daß die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung nicht allein von der Qualität der Berechnungsverfahren, sondern in gleichem Maße auch von der Zuverlässigkeit der Meßwerte abhängen. Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit von Schalldämm-Messungen zu erhalten, kann man einen im Jahr 1998 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durchgeführten Ringversuch heranziehen, bei dem eine Massivwand aus Kalksandvollsteinen unter genau kontrollierten Bedingungen bei zwölf verschiedenen Prüfstellen gemessen wurde [3 bis 5]. Hierbei wurde bezogen auf das bewertete Schalldämm-Maß eine Standardabweichung von etwa 2 dB ermittelt (dieser Wert gilt für den Fall, daß - wie auch bei den hier betrachteten Lochsteinwänden - keine Umrechnung der Schalldämmung auf einen einheitlichen Verlustfaktor erfolgte). Da bei Lochsteinwänden konstruktionsbedingt von einer stärkeren Streuung der Bauteileigenschaften und damit von einer höheren Meßunsicherheit als bei einer homogenen KSV-Wand auszugehen ist [6, 7], dürfte die Standardabweichung hier deutlich über 2 dB liegen. Vergleicht man dies mit der Genauigkeit des entwickelten Berechnungsmodells von  $\sigma = 2,4$  dB, so ist zu erkennen, daß selbst mit einer erheblich breiteren Datenbasis keine wesentlich höhere Genauigkeit erreichbar wäre. Die Einbeziehung weiterer Meßdaten hätte daher vor allem den Sinn, Steintypen und Wandkonstruktionen, die bislang noch nicht in ausreichendem Maße vertreten sind, in besserer Weise im Berechnungsmodell zu berücksichtigen.

## 2.6 Praktische Erfahrungen

Nach Abschluß des ersten Projektabschnitts wurde das Berechnungsverfahren von den in der Betreuungsgruppe vertretenen Industrieverbänden einer praktischen Erprobung unterzogen. Hierbei wurden abgesehen von einigen Unklarheiten bei der Handhabung des Verfahrens keine schwerwiegenden Mängel festgestellt. Zwar traten bei einigen Hochlochziegeln (den Steinen TR1, TR2 und TR3 in Anhang 4) starke Abweichungen zwischen Messung und Rechnung auf. Dies lag jedoch entweder daran, daß die Berechnung nicht korrekt durchgeführt

wurde, oder daß die Anwendungsvoraussetzungen des Modells nicht in ausreichendem Maße erfüllt waren.

Des Weiteren wurden an der Fachhochschule Stuttgart Berechnungen zur Überprüfung des Prognoseverfahrens durchgeführt [8]. Das Ziel dieser Berechnungen war nicht, die Übereinstimmung zwischen Meß- und Berechnungsergebnissen zu untersuchen, sondern die Anwendbarkeit des Modells bei verschiedenen Arten von Lochbildern zu überprüfen und die resultierende Pegelminderung gegenüber einer gleich schweren homogenen Wand zu bestimmen. Die Berechnungen wurden für 126 Hochlochziegel aus 26 verschiedenen Zulassungen durchgeführt und ergaben eine mittlere Absenkung des bewerteten Schalldämmmaßes von  $\Delta R_{w,L} = 10,2$  dB. Dieses Ergebnis liegt um 2,2 dB über dem Wert, der vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik für den zur Entwicklung des Berechnungsmodells verwendeten Datensatz ermittelt wurde. Der Unterschied dürfte hauptsächlich auf die Auswahl der untersuchten Steine zurückzuführen sein, da sich in den letzten Jahren aus wärmetechnischen Gründen eine Entwicklung zu filigraneren Lochbildern und breiteren Steinen hin vollzogen hat, die sich negativ auf die akustischen Eigenschaften der Wände auswirkt. (Die oben genannten Werte von  $\Delta R_{w,L}$  beziehen sich auf Hochlochziegel. Angaben für andere Arten von Steinen sind Anhang 7 zu entnehmen.)

Im Gegensatz zu Hochlochziegeln oder Steinen aus Bimsbeton dient die Lochung bei Kalksandsteinen nicht zur Verminderung des Wärmedurchgangs, sondern zur Einstellung der gewünschten Rohdichte. Aus diesem Grund weisen Kalksandsteine zumeist ein völlig anderes Lochbild auf, das sich durch wenige, großflächige und zumeist runde Löcher auszeichnet, die häufig reihenförmig und ohne Versatz angeordnet sind. Solche Steine sind in aller Regel als schalltechnisch unkritisch anzusehen, so daß die Anwendung des Berechnungsmodells für Lochsteine eigentlich nicht erforderlich ist. Eine Ausnahme bilden lediglich die sogenannten Yali-Steine (Steine VL1 und VL2 im Bericht B-BA 3/2002), die über eine ziegelähnliche Lochung verfügen. Nach Herstellerangabe sind diese Steine jedoch nur wenig verbreitet.

## 2.7 Einsatz in der bauaufsichtlichen Zulassung

Das in Anhang 2 beschriebene Berechnungsverfahren kann in Verbindung mit den Erläuterungen in Ziffer 2.3 und 2.4 sowie den Bildern 1 und 2 direkt in die bauaufsichtliche Zulassung übernommen werden. Zur Berücksichtigung der Berechnungsunsicherheit ist allerdings noch die Festlegung eines Sicherheitsabschlages erforderlich, der vom Berechnungsergebnis zu subtrahieren ist. Die Höhe des Sicherheitsabschlages ist letztlich eine Ermessensfrage, die vom DIBt-Sachverständigenausschuß B2 entschieden werden muß. Die folgenden statistischen Betrachtungen können hierbei als Entscheidungshilfe dienen:

Für die Festlegung eines Sicherheitsabschlages ist maßgebend, wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß der Meßwert  $R_{w,mess}$  den Rechenwert  $R_{w,rech}$  abzüglich des Sicherheitsabschlages  $A_S$  nicht unterschreitet. Unter der Annahme, daß die Abweichung zwischen Messung und Rechnung einer statistischen Normalverteilung folgt, ergeben sich im vorliegenden Fall für diese Wahrscheinlichkeit folgende Werte:

Sicherheitsabschlag	Wahrscheinlichkeit für $R_{w,mess} \geq R_{w,rech} - A_S$
2 dB	79,8%
3 dB	89,5%
4 dB	95,2%
5 dB	98,2%

In Anbetracht der angegebenen Wahrscheinlichkeiten und im Vergleich zu den für andere Bauteile geltenden Bestimmungen erscheint der auf der vorangehenden Sitzung des Sachverständigenausschusses vorgeschlagene Sicherheitsabschlag in Höhe von 5 dB als überhöht. Ein Abschlag von 3 dB oder maximal 4 dB sollte im vorliegenden Fall ausreichen.

## 3 Schwingungsmessungen an Steinverbänden

Obgleich die zweite Genauigkeitsstufe des im Bericht B-BA 3/2002 beschriebenen Prognoseverfahrens (Bestimmung der Schalldämmung aus Schwingungsmessungen an Steinverbänden) voraussichtlich keinen Eingang in die bauauf-

sichtlichen Zulassung finden wird, stellen die Messungen dennoch eine nützliche Ergänzung des in Ziffer 2 beschriebenen Berechnungsmodells (erste Genauigkeitsstufe) dar. Sie können zum Beispiel dann eingesetzt werden, wenn das Berechnungsmodell nicht anwendbar ist oder keine eindeutigen Ergebnisse liefert. Der wesentliche Vorteil der Schwingungsmessungen gegenüber herkömmlichen Schalldämm-Messungen besteht in dem erheblich geringeren Aufwand zur Erstellung des Prüfaufbaus. So muß statt einer vollständigen Wand nur ein Verband aus sieben Steinen aufgemauert werden, wodurch sich auch die erforderlichen Trocknungszeiten verkürzen. Außerdem ist für die Messungen kein bauakustischer Prüfstand erforderlich, so daß sich das Verfahren insbesondere auch für die Produktentwicklung eignet.

Trotz dieser Vorteile wurde auf die Weiterentwicklung des Verfahrens auf Wunsch des Auftraggebers zunächst verzichtet. Es wurden jedoch Schwingungsmessungen an zwei weiteren Steinsorten vorgenommen, um die akustischen Grundlagen des Verfahrens besser abzusichern. Die Messungen erfolgten nach der im Bericht B-BA 3/2002 beschriebenen Methode an Verbänden aus je sieben Steinen. Der Aufbau der Verbände entsprach genau den zuvor zur Durchführung der Schalldämm-Messungen errichteten Wänden, so daß die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse in dieser Beziehung sichergestellt war. Da die Schalldämm- und Schwingungsmessungen im zeitlichen Abstand von mehreren Jahren vorgenommen wurden, war die Gleichartigkeit der verwendeten Steine jedoch nur bedingt gewährleistet. Zwar waren bei der Lochung und den Abmessungen keine Unterschiede erkennbar. Da sich die Masse der Steine jedoch teilweise um bis zu 20% unterschied, ist davon auszugehen, daß auch bei den akustischen Eigenschaften Unterschiede bestanden.

Die Schwingungsmessungen wurden an den Steinsorten VL9 und VL10 vorgenommen. Es handelte sich in beiden Fällen um Bimsbetonvollblöcke (Lochflächenanteil  $\leq 10\%$ ) mit Langlöchern und versetzten Querstegen, die sich jedoch im Lochbild und der Breite voneinander unterschieden. Eine Beschreibung der untersuchten Steine ist in Anhang 8 wiedergegeben. Die Bilder 4 und 5 zeigen die aus den Schwingungsmessungen ermittelte Transferimpedanz, aus der sich die Resonanzfrequenz der Steine und die Tiefe des durch die Resonanz hervorgerufenen Dämmungseinbruchs entnehmen läßt. Die beiden letzt-



genannten Werte, die als Grundlage zur Berechnung der Schalldämmung dienen, sind in den Bildern ebenfalls mit angegeben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind zusammen mit den zugehörigen Meßwerten in den Bildern 6 und 7 dargestellt. Wie sich den Bildern entnehmen läßt, ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung weniger gut, als dies bei den beiden im Bericht B-BA 3/2002 betrachteten Steinen der Fall war. So zeigt die für den Stein VL9 berechnete Schalldämmung einen zu starken Dämmungseinbruch, während sich für den Stein VL 10 eine um etwa eine Terz zu hohe Resonanzfrequenz ergibt (bei Verschiebung der Resonanz von 1600 auf 1250 Hz würden Meß- und Rechenwerte gut übereinstimmen). Trotz der Unterschiede im Frequenzverlauf der Schalldämmung wird beim bewerteten Schalldämm-Maß mit  $\Delta R_w = 1$  dB (bei Stein VL9) und  $\Delta R_w = -2$  dB (bei Stein VL10) eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung erreicht.

Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist vermutlich zum großen Teil auf die schon erwähnten Unterschiede zwischen den für die Schalldämm- und Schwingungsmessungen verwendeten Steinen zurückzuführen. Möglicherweise spielt auch die bei manchen Steinsorten in starkem Maße vorhandene Streuung der Produkteigenschaften eine Rolle, die dazu führen kann, daß sich äußerlich gleiche Steine in ihren akustischen Eigenschaften stark voneinander unterscheiden [9]. In Anbetracht dieser Unterschiede stellen die ermittelten Ergebnisse trotz der Abweichungen zwischen Messung und Rechnung eine Bestätigung der akustischen Prinzipien des entwickelten Vorhersageverfahrens dar. Derzeit sind zwar noch Verbesserungen und Ergänzungen notwendig, die Voraussetzungen für die Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens sind jedoch gegeben.

#### **4 Schall-Längsdämmung**

Die Schall-Längsleitung von Lochsteinwänden kann im Wohnungsbau unter Umständen schwerwiegende Schallschutzmängel hervorrufen. Ein zuverlässiges Verfahren zur Vorhersage der Längsdämmung ist deshalb für Planung und Zulassung von großer Bedeutung. Für homogene Wände ist ein solches Verfahren bereits vorhanden und durch DIN EN 12354-1 [10] in der europäischen Normung

verankert. Zur Anwendung im Massivbau liegen inzwischen umfangreiche Erfahrungen vor [11 bis 21]. Noch unklar ist derzeit jedoch, inwieweit das Verfahren, bei dem die Längsdämmung aus der Durchgangs- und Stoßstellendämmung der beteiligten Bauteile berechnet wird, auch bei Lochsteinwänden anwendbar ist, da die bislang vorliegenden Meßdaten keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Längs- und Durchgangsdämmung erkennen ließen [6]. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die meisten Messungen zur Bestimmung der Längsdämmung mit elastischer Anbindung der Querwand (d. h. einem Stoßstellendämm-Maß von  $K_{ij} \cong 0$ ) erfolgten, so daß die Anwendungsvoraussetzungen für DIN EN 12354-1 nicht gegeben waren. Die hier durchgeführten Untersuchungen hatten deshalb vor allem das Ziel, zu untersuchen, wie genau sich die Schall-Längsdämmung von Lochsteinwänden unter praxisnahen baulichen Bedingungen (d. h. bei starrer Verbindung der Bauteile) nach DIN EN 12354-1 vorherbestimmen läßt.

Zur Klärung dieser Frage wurden im Diagonalprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik Schalldämm-Messungen an drei verschiedenen Prüfaufbauten durchgeführt. Die Aufbauten bestanden jeweils aus einer Längswand aus gelochtem Mauerwerk und einer Querwand mit hoher Flächenmasse, die starr miteinander verbunden waren. Die Anordnung der Wände entsprach einer in der Praxis häufig anzutreffenden Bausituation, bei der zwei fremde Wohnräume, zwischen denen sich eine schwere Wohnungstrennwand befindet, über eine durchlaufende Außenwand aus Lochsteinen in Verbindung stehen. Die verwendete Meßanordnung ist als idealisierte Nachbildung eines üblichen Wohngebäudes aufzufassen, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass die Außenwände am Bau zumeist durch Fenster oder Türen unterbrochen sind.

#### **4.1 Meßaufbau**

Die geometrische Anordnung der Wände war bei allen untersuchten Aufbauten gleich und ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Längs- und Querwand wurden T-förmig in den Diagonalprüfstand eingebaut, wobei sich in Verlängerung der Querwand eine hochschalldämmende Trennwand in Leichtbauweise befand, die über einen elastischen Anschluß an die Längswand verfügte. Durch die Wände wurde der Prüfstand in vier Räume aufgeteilt, die im folgenden mit den Ziffern 1 bis 4 bezeichnet werden. Da zwischen den Räumen (in Decke, Boden und Au-

Benwänden) jeweils elastische Trennfugen vorhanden waren, wurde die Schallübertragung über die Prüfstandsflanken größtenteils unterbunden. Die Bezeichnungen und Abmessungen der Prüfräume sind Bild 8 zu entnehmen.

Während die Querwände in allen Fällen aus massivem Mauerwerk bestanden und sich auch hinsichtlich ihrer Masse nur wenig voneinander unterschieden, wiesen die Längswände erhebliche Unterschiede auf. Bei Aufbau 1 wurde die Längswand aus 300 mm breiten Hochlochziegeln mit versetzten Querstegen und Gitterlochung errichtet. Die Längswände der Aufbauten 2 und 3 bestanden jeweils aus Bimsbetonvollblöcken (Lochflächenanteil  $\leq 10\%$ ) mit Langlöchern und versetzten Querstegen. Der eine dieser Blöcke war 300 mm, der andere 356 mm breit. Der Verbindung zwischen Quer- und Längswand erfolgte jeweils durch Stumpfstoß mit Mauerankern in jeder Lagerfuge. Genaue Angaben zum Wandaufbau und den verwendeten Steinen sind in den Anhängen 8 und 9 wiedergegeben.

Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen war in erster Linie die Schallübertragung zwischen den Räumen 2 und 3. Von den dreizehn zwischen diesen Räumen vorhandenen Schallübertragungswegen waren im vorliegenden Fall nur vier Wege (der Weg Dd und je ein Weg Ff, Df und Fd) von Bedeutung. Die genannten Wege sind in Bild 9 schematisch dargestellt. Die übrigen Übertragungswege waren durch die Trennfugen des Prüfstands unterbrochen oder wegen der hohen Masse der Prüfstandsflanken akustisch von untergeordneter Bedeutung. Die Schallübertragung zwischen den Räumen 1 und 4 erfolgte im wesentlichen nur über den Flankenweg Ff.

#### **4.2 Meßdurchführung**

Die Flankendämmung der Längswand,  $R_{Ff}$ , wurde durch Messung der Luftschallübertragung zwischen den Räumen 1 und 4 ermittelt. Alle gemessenen Schalldämm-Maße wurden auf die Fläche der Trennwand zwischen den Räumen 2 und 3 bezogen. Da die Fläche dieser Wand fast genau  $10 \text{ m}^2$  betrug (sie lag je nach Aufbau zwischen  $10,04$  und  $10,25 \text{ m}^2$ ) stimmen die ermittelten Schalldämm-Maße bis auf eine Abweichung von maximal  $0,1 \text{ dB}$  mit den entsprechenden Norm-Schallpegeldifferenzen überein. Um die Schalldämmung der Querwand,

$R_{Dd}$ , zu bestimmen, wurde die Längswand in den Räumen 2 und 3 mit Vorsatzschalen versehen (diese Messung wurde nur bei Aufbau 1 durchgeführt).

Die Messung der Stoßstellendämmung erfolgte in üblicher Weise, indem eines der betrachteten Bauteile mit einem elektrodynamischem Körperschallsender (Shaker) angeregt und die mittleren Schnellepegel auf dem angeregten Bauteil und dem Empfangsbauteil bestimmt wurden. Für die Körperschallmessungen wurde ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer verwendet, der an einer mit der Wand verklebten Gewindescheibe aus Aluminium festgeschraubt wurde. Der Shaker wurde mit einem MLS-Signal gespeist und in gleicher Weise wie der Beschleunigungsaufnehmer an der Wand befestigt. Die Messung der Körperschall-Nachhallzeit erfolgte gleichfalls unter Verwendung der MLS-Technik, wobei zusätzlich eine zeitinverse Frequenzfilterung des Meßsignals vorgenommen wurde, um die Messung kurzer Nachhallzeiten zu ermöglichen. Zur Durchführung der Luft- und Körperschallmessungen wurden die jeweils geltenden Meßvorschriften herangezogen [22 bis 25].

### 4.3 Berechnungen nach DIN EN 12354-1

Bei dem in DIN EN 12354-1 beschriebenen Berechnungsmodell wird die Schalldämmung zwischen angrenzenden Räumen ermittelt, indem die über die verschiedenen Übertragungswege in den Empfangsraum eingeleiteten Schallanteile einzeln berechnet und energetisch addiert werden. Geht man davon aus, daß zwischen Sende- und Empfangsraum keine Luftschall-Nebenwege (Schächte, Kanäle, etc.) vorhanden sind, so ergibt sich für die resultierende Schalldämmung folgender Ausdruck:

$$R' = -10 \lg \left( 10^{-R_{Dd}/10 \text{ dB}} + \sum_{i,j} 10^{-R_{ij}/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

mit  $R'$  = Schalldämm-Maß mit Nebenwegen,

$R_{Dd}$  = Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils,

$R_{ij}$  = Flankendämm-Maß bei Schallübertragung über die Bauteile  $i$  und  $j$ .

Die Summe in obiger Gleichung umfaßt insgesamt zwölf Übertragungswege (je vier Wege  $F_f$ ,  $F_d$  und  $D_f$ ), wobei das Flankendämm-Maß jeweils auf die Fläche

des trennenden Bauteils bezogen wird. Die genannten Wege sind in Bild 9 schematisch dargestellt. Beschränkt man sich auf den Fall unverkleideter Bauteile (d. h. keine Vorsatzschalen in Sende- und Empfangsraum), so lassen sich die Flankendämm-Maße gemäß DIN EN 12354-1 nach der Beziehung

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \overline{D_{v,ij}} + 10 \lg \left( \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

mit  $R_i, R_j$  = Schalldämm-Maße der Bauteile i und j,

$\overline{D_{v,ij}}$  = richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz zwischen den Bauteilen i und j,

$S_s$  = Fläche des trennenden Bauteils,

$S_i, S_j$  = Fläche der Bauteile i und j,

berechnen. Die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz ist gemäß

$$\overline{D_{v,ij}} = (D_{v,ij} + D_{v,ji})/2 \quad (4)$$

mit  $D_{v,ij}$  = Schnellepegeldifferenz zwischen den Bauteilen i und j bei Anregung des Bauteils i,

$D_{v,ji}$  = Schnellepegeldifferenz zwischen den Bauteilen j und i bei Anregung des Bauteils j,

definiert und hängt mit dem Stoßstellendämm-Maß  $K_{ij}$  wie folgt zusammen:

$$K_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 \lg \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

mit  $l_{ij}$  = gemeinsame Kantenlänge zwischen den Bauteilen i und j,

$a_i, a_j$  = äquivalente Absorptionslängen der Bauteile i und j.

Die äquivalente Absorptionslänge (hier am Beispiel des Bauteils i) ist definiert als:

$$a_i = \frac{2,2 \pi^2 S_i}{c_L T_{s,i}} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad (6)$$

mit  $c_L$  = Schallgeschwindigkeit in Luft (Rechenwert  $c_L = 340$  m/s),  
 $T_{s,i}$  = Körperschall-Nachhallzeit des Bauteils  $i$ ,  
 $f, f_{\text{ref}}$  = Frequenz und Bezugsfrequenz ( $f_{\text{ref}} = 1000$  Hz).

Durch den Bezug der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz auf die äquivalente Absorptionslänge in Gl. (5) wird erreicht, daß  $K_{ij}$  zu einer invarianten Größe wird, die nur von der Beschaffenheit der Stoßstelle und nicht von der Randeinspannung der Bauteile abhängt.

Da die akustischen Eigenschaften von Bauteilen von den jeweiligen Einbaubedingungen (insbesondere der Energieableitung an den Bauteilrändern) abhängen, sind in die Gleichungen (2) und (3) zur Berechnung der Schalldämmung am Bau sogenannte in-situ-Werte einzusetzen. Die Ermittlung der benötigten in-situ-Werte kann rechnerisch erfolgen, indem zu den im Prüfstand gemessenen Werten eine in-situ-Korrektur addiert wird. Für die Durchgangsdämmung von Bauteilen ( $R_{Dd}$ ,  $R_i$  oder  $R_j$ ) ergibt sich:

$$R_{\text{situ}} = R_{\text{lab}} - 10 \lg \left( \frac{T_{s,\text{situ}}}{T_{s,\text{lab}}} \right) \text{dB}, \quad (7)$$

wobei sich die Indizes situ und lab auf die jeweilige Einbausituation (am Bau oder im Prüfstand) beziehen. Für die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz gilt entsprechend:

$$\overline{D_{v,ij,\text{situ}}} = K_{ij} - 10 \lg \left( \frac{l_{ij,\text{situ}}}{\sqrt{a_{i,\text{situ}} a_{j,\text{situ}}}} \right) \text{dB} \geq 0. \quad (8)$$

Da die Berechnung der Schalldämmung und die Messung der Eingabewerte am selben Aufbau erfolgten, entfällt im vorliegenden Fall die in-situ-Korrektur der Meßwerte. Auch das Stoßstellendämm-Maß wird nicht benötigt, da der für die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz ermittelte Meßwert direkt in Gl. (3) eingesetzt werden kann. Im folgenden wird deshalb zur Beschreibung der

Stoßstellendämmung nur die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz verwendet.

Die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens nach von DIN EN 12354-1 ist an folgende Voraussetzungen gebunden:

- diffuse Biegewellenfelder auf allen Bauteilen (dies ist nur bei genügend hohen Frequenzen erfüllt und setzt außerdem voraus, daß die innere Dämpfung der Bauteile nicht zu groß ist),
- diffuse Luftschallfelder im Sende- und Empfangsraum,
- schwache Kopplung zwischen den Bauteilen,
- Unabhängigkeit der verschiedenen Übertragungswege.

Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, was z. B. bei Bauteilen mit hoher innerer Dämpfung der Fall sein kann, vermindert sich die Berechnungsgenauigkeit erheblich. In manchen Fällen kann die Genauigkeit so stark abnehmen, daß die Anwendung des Verfahrens nicht mehr sinnvoll ist.

## **4.4 Ergebnisse**

### **4.4.1 Körperschall-Nachhallzeit und Stoßstellendämmung**

Die Körperschall-Nachhallzeit der untersuchten Aufbauten ist in den Bildern 10 (Längswände) und 11 (Querwände) dargestellt. Die Meßergebnisse weisen keine Besonderheiten auf und entsprechen im wesentlichen den für derartige Bauteile erwarteten Werten. Anders verhält es sich bei der zur Ermittlung der Stoßstellendämmung gemessenen Schnellepegeldifferenz, die in den Bildern 12 und 13 wiedergegeben ist. Hier ist bei hohen Frequenzen ein starker Anstieg der Dämmung zu verzeichnen, der auf die große Ausbreitungsdämpfung der untersuchten Lochsteinwände in diesem Frequenzbereich zurückzuführen ist. Die Ausbreitungsdämpfung bewirkt eine ungleichmäßige Pegelverteilung auf der Wandfläche, durch die eine höhere Stoßstellendämmung vorgetäuscht wird, als in Wirklichkeit vorhanden ist. Ein Beispiel für die Ausbreitungsdämpfung einer typischen Wand aus Hochlochziegeln ist Bild 14 zu entnehmen [26]. Bis zu einer Frequenz von etwa 1000 Hz ist die Dämpfung so gering, daß sie in der Praxis keine Rolle spielt. Oberhalb davon setzt allmählich ein Anstieg ein, der sich

zu hohen Frequenzen hin verstärkt, so daß bei 4000 Hz eine Ausbreitungsdämpfung von etwa 8 dB/m erreicht wird. (Der angegebene Wert bezieht sich auf eine eindimensionale Ausbreitungssituation. Bei der Körperschallausbreitung auf einer punktförmig angeregten Wand erfolgt zusätzlich eine geometrische Pegelabnahme.)

Da die hohe Ausbreitungsdämpfung die Ausbildung eines diffusen Körperschallfeldes verhindert, wird eine grundlegende Anwendungsvoraussetzung von DIN EN 12354-1 verletzt, so daß das in der Norm beschriebene Berechnungsmodell im betreffenden Frequenzbereich nicht oder nur mit verminderter Genauigkeit anwendbar ist. Dieses Problem betrifft nicht nur Lochsteinwände, sondern tritt bei allen Bauteilen mit hoher innerer Dämpfung auf. Beispiele hierfür finden sich insbesondere im Leichtbau, wo das akustische Prinzip der Stoßstellen-dämmung in seiner derzeitigen Form grundsätzlich nicht anwendbar ist [27]. Doch auch bei homogenen Massivwänden macht sich die Ausbreitungsdämpfung im Bereich hoher Frequenzen häufig - wenn auch in geringerem Maß als bei den meisten Lochsteinwänden - bei Berechnungen nach DIN EN 12354-1 störend bemerkbar [13, 14].

#### **4.4.2 Durchgangs- und Längsdämmung**

Die Durchgangsdämmung der drei untersuchten Längswände ist in Bild 15 aufgetragen. Der für Lochsteinwände typische Dämmungseinbruch bei der Resonanzfrequenz der Steine ist in allen Meßkurven deutlich erkennbar. Bei den Aufbauten 2 und 3 liegt er bei ungefähr 1250 Hz, bei Aufbau 1 etwa eine halbe Terz tiefer. Wie aufgrund des Dämmungseinbruchs nicht anders zu erwarten, ist das bewertete Schalldämm-Maß bei allen untersuchten Wänden deutlich geringer als bei einer gleich schweren homogenen Wand. Die Verminderung des bewerteten Schalldämm-Maßes durch die Lochung der Steine beträgt 7,4 dB bei Aufbau 1, 8,0 dB bei Aufbau 2 und 7,3 dB bei Aufbau 3 (die Schalldämmung der homogenen Wand,  $R_{w,u}$ , wurde hierbei nach Anhang 2 berechnet).

In der in Bild 16 dargestellten Flankendämmung der drei Wände ist die Resonanz der Steine nicht oder höchstens ansatzweise zu erkennen. Dies ist auch bei den meisten anderen Lochsteinwänden der Fall [6] und hängt damit zusammen, daß es sich bei den Steinresonanzen um lokale, nicht ausbreitungsfähige



Schwingungen handelt. Die Einfluß der Lochung auf die Längsdämmung ist deshalb vermutlich weniger auf die Eigenschwingungen der Steine, als vielmehr hauptsächlich auf die erhöhte Ausbreitungsdämpfung und die verminderte Steifigkeit des Mauerwerks zurückzuführen.

#### 4.4.3 Vergleich von Messung und Rechnung

Um die Anwendbarkeit von DIN EN 12354-1 bei Lochsteinwänden zu untersuchen, wurde die Flankendämmung der Längswände nach Gl. (3) berechnet, wobei die Messungen der Durchgangsdämmung und der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz als Eingangswerte dienten. In Bild 17 sind die für Aufbau 1 gemessene und berechnete Flankendämmung einander gegenübergestellt. Hierbei ist abgesehen von der Terz bei 125 Hz bis zu einer Frequenz von etwa 1250 Hz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung vorhanden. Bei höheren Frequenzen übersteigen die Rechenwerte die gemessene Schalldämmung, wobei der Unterschied mit zunehmender Frequenz allmählich anwächst, bis er bei 5000 Hz einen Wert von mehr als 20 dB erreicht. Gemäß den Überlegungen in Ziffer 4.4.1 entspricht dieser Kurvenverlauf dem für Lochsteinwände erwarteten Verhalten, da das Berechnungsverfahren nach DIN EN 12354-1 infolge der starken Ausbreitungsdämpfung bei hohen Frequenzen versagt und für die Flankendämmung überhöhte Werte liefert. Da größere Unterschiede zwischen Messung und Rechnung jedoch erst oberhalb von etwa 2000 Hz auftreten, ist der Einfluß auf das bewertete Schalldämm-Maß gering, so daß der Meß- und der Rechenwert von  $R_w$  übereinstimmen.

Ein ähnliches Verhalten wie bei Aufbau 1 zeigen auch die für Aufbau 2 gemessenen Werte, die in Bild 18 wiedergegeben sind. Im Unterschied zu Aufbau 1 treten hier auch bei der Resonanzfrequenz der Steine merkliche Abweichungen zwischen Messung und Rechnung auf, wobei die berechnete Kurve unter die Meßkurve abfällt. Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, daß das für Biegewellen entwickelte Berechnungsmodell die Eigenschwingungen der Steine, die nur in der Durchgangs- nicht aber in der Stoßstellendämmung zutage treten, nicht richtig berücksichtigt.

Die erwähnten Abweichungen bei der Resonanzfrequenz der Steine sind auch bei Aufbau 3 vorhanden. Im Unterschied zu den beiden anderen Aufbauten tre-

ten bei den in Bild 19 dargestellten Ergebnissen jedoch auch bei tiefen Frequenzen unterhalb von 200 Hz starke Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten auf. Ob es sich hierbei um systematische Unterschiede handelt, läßt sich nicht entscheiden, da bei den betreffenden Frequenzen keine diffusen sondern modale Schallfelder vorliegen (dies gilt sowohl für die Wände als auch für die Prüfräume), so daß sich eine verminderte Meß- und Berechnungsgenauigkeit ergibt.

Da bei Aufbau 1 außer für den Flankenweg  $F_f$  auch Messungen für die drei anderen Übertragungswege ( $F_d$ ,  $D_f$  und  $D_d$ ) vorgenommen wurden, konnte hier zusätzlich die Schalldämmung zwischen den Räumen 2 und 3 (Schalldämmung der Querwand mit Nebenwegen) berechnet und mit dem entsprechenden Meßwert verglichen werden. Die ermittelten Ergebnisse sind in Bild 20 dargestellt. Wie schon bei der Flankendämmung ergibt sich auch bei der Schalldämmung der Querwand eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Da der Weg  $D_d$  nur in geringem Maße zur Schallübertragung beiträgt, läßt sich hieraus schließen, daß auch die Flankenwege  $D_f$  und  $F_d$  von dem Berechnungsmodell korrekt erfaßt werden.

#### 4.4.4 Rechnung mit Einzahlangaben

Nachdem die frequenzabhängige Berechnung der Flankendämmung nach DIN EN 12354-1, abgesehen von den Abweichungen bei hohen Frequenzen, zufriedenstellende Ergebnisse erbrachte, wird im folgenden untersucht, ob dies auch für Berechnungen mit Einzahlangaben zutrifft. Hierzu wurden drei verschiedene Berechnungsvarianten erprobt und die ermittelten Ergebnisse miteinander verglichen. Alle Berechnungen erfolgten nach Gl.(3) mit der Durchgangsdämmung und der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz als Eingabewerte. Das Berechnungsergebnis bestand im bewerteten Flankendämm-Maß der Längswand. Bei den Berechnungen wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Variante 1: Frequenzabhängige Berechnung der Flankendämmung auf der Grundlage gemessener Werte.
- Variante 2: Berechnung mit Einzahlangaben, die aus Meßwerten ermittelt wurden. Als Einzahlangabe für  $\overline{D_{v,ij}}$  wurde der arithmetische Mittelwert im Frequenzbereich von 200 bis 2500 Hz verwendet [13].

Variante 3: Berechnung mit Einzahlangaben, die aus Bauteildaten errechnet wurden. Hierbei wurde die Durchgangsdämmung mit dem in Ziffer 2 beschriebenen Berechnungsverfahren (erste Genauigkeitsstufe) ermittelt. Die Berechnung von  $\overline{D_{v,ij}}$  erfolgte nach DIN EN 12354-1, Anhang E.

Die mit den verschiedenen Berechnungsvarianten für die drei untersuchten Aufbauten ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt (die Ergebnisse wurden soweit erforderlich auf ganzzahlige Werte gerundet). Hierbei ergibt sich für Variante 1 (frequenzabhängige Berechnung) mit einer quadratisch gemittelten Abweichung von 0,6 dB die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Doch auch mit den Berechnungsvarianten 2 und 3 werden mit einer Abweichung von 2,1 dB und 1,3 dB zufriedenstellende Ergebnisse erreicht. Dies bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen, die erste Hinweise für die Anwendbarkeit von DIN EN 12354-1 bei Lochsteinwänden erbrachten [16].

## 5 Zusammenfassung

In dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurde das im ersten Projektabschnitt entwickelte Verfahren zur rechnerischen Vorhersage der Schalldämmung von Lochsteinwänden (erste Genauigkeitsstufe) an weiteren Wänden erprobt. Des Weiteren wurden der Anwendungsbereich des Verfahrens eingegrenzt, Anwendungsregeln für eine einheitliche Durchführung der Berechnungen erarbeitet und eine Anpassung an materialspezifische Massekurven vorgenommen. Damit ist das Verfahren im Rahmen des derzeitigen Kenntnisstandes weitgehend ausgereift und kann in die bauaufsichtliche Zulassung übernommen werden. Die erreichte Vorhersagegenauigkeit beträgt 2,4 dB (Standardabweichung zwischen gemessenen und berechneten Werten). Da sich die erreichte Genauigkeit in Anbetracht der Streubreite bauakustischer Meßergebnisse nicht mehr wesentlich verbessern läßt, ist eine erneute Anpassung des Verfahrens erst bei der Einführung neuer Steintypen erforderlich.

Die Weiterentwicklung der zweiten Genauigkeitsstufe (Ermittlung der Schall-dämmung von Lochsteinwänden aus Schwingungsmessungen an Steinverbänden) wurde auf Wunsch des Auftraggebers zunächst zurückgestellt. Es wurden jedoch Messungen an zwei weiteren Steinverbänden durchgeführt, die den akustischen Ansatz des verwendeten Verfahrens bestätigen.

Der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen lag bei der Schall-Längsdämmung von Lochsteinwänden. Um zu überprüfen, ob das Berechnungsverfahren nach DIN EN 12354-1 auch bei Wänden aus gelochten Steinen anwendbar ist, wurden im Diagonalprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik Messungen an drei verschiedenen Lochsteinwänden vorgenommen, wobei einseitig jeweils eine schwere Trennwand angeschlossen war (T-Stoß). Es zeigte sich, daß eine Vorherberechnung der Schall-Längsdämmung nach DIN EN 12354-1 auch bei Lochsteinwänden grundsätzlich möglich ist. Dies gilt sowohl für terzweise Berechnungen als auch für Berechnungen mit Einzahlangaben. Allerdings sind die Anwendungsvoraussetzungen des Berechnungsmodells bei hohen Frequenzen nicht mehr erfüllt, da die starke Ausbreitungsdämpfung der Wände in diesem Frequenzbereich die Ausbildung diffuser Körperschallfelder verhindert. Dies hat zur Folge, daß sich bei der Berechnung der Flankendämmung systematisch zu hohe Werte ergeben. Bei den drei untersuchten Lochsteinwänden liegt die Anwendungsgrenze des Berechnungsmodells bei etwa 2000 Hz. Da die Frequenzen über 2000 Hz im allgemeinen nur wenig zur Schallübertragung beitragen und auch bei der Bildung des bewerteten Schall-dämm-Maßes kaum ins Gewicht fallen, bedeutet dies in der Praxis keine wesentliche Einschränkung der Anwendungsmöglichkeiten.

Bei dem Berechnungsverfahren nach DIN EN 12354-1 wird die Längsdämmung der Wände aus der Durchgangs- und Stoßstellendämmung ermittelt. Hierdurch ergibt sich für Lochsteinwände, die eine geringe Durchgangsdämmung aufweisen, zugleich auch eine niedrige Längsdämmung. Umgekehrt kommt bei einer schalltechnische Optimierung der Steine in Durchgangsrichtung die erzielte Verbesserung in etwa gleicher Höhe auch der Längsdämmung zugute.

Außer bei hohen Frequenzen können auch bei der Resonanzfrequenz der Steine Abweichungen zwischen Messung und Rechnung auftreten, da das Be-

rechnungsmodell nach DIN EN 12354-1 die Eigenschwingungen der Steine nicht richtig berücksichtigt. Da die Abweichungen jedoch verhältnismäßig gering sind und nur einen schmalen Frequenzbereich umfassen, sind sie - zumindest bei den hier untersuchten Wänden - für das bewertete Schalldämm-Maß von untergeordneter Bedeutung. Bei der Stoßstellendämmung der untersuchten Lochsteinwände wurden - abgesehen von den bereits erwähnten Problemen bei hohen Frequenzen - keine Besonderheiten festgestellt.

Unklar ist derzeit noch, wie die Ausbreitungsdämpfung von Lochsteinwänden mit den Eigenschwingungen der Steine und der verringerten Steifigkeit des Mauerwerks zusammenhängt. Neben den üblichen Biege-Wellen sind bei Lochsteinwänden noch weitere Wellenformen, wie z. B. Dehnwellen, vorhanden, über deren akustische Eigenschaften bislang noch wenig bekannt ist. Daß die Eigenschwingungen der Steine die Längsdämmung beeinflussen, ist aus dem Frequenzverlauf der Stoßstellendämmung ersichtlich, der bei der Resonanzfrequenz der Steine noch oben hin abbiegt. An der gleichen Stelle setzen auch die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung ein, so daß nicht auszuschließen ist, daß sich die Anwendungsgrenze des Berechnungsmodells bei Steinen mit niedriger Resonanzfrequenz noch weiter nach unten verschiebt. Um dies zu klären sind weitere Untersuchungen erforderlich, die hier nicht mehr durchgeführt werden konnten.

**6 Literaturverzeichnis**

- [1] Weber, L.: Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung von Wänden aus gelochten Mauersteinen, 1. Projektabschnitt. Bericht B-BA 3/2002 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (2002).
- [2] Fischer, H. M.: Ermittlung der Massekurven. Tischvorlage zur Sitzung des NA-Bau Arbeitsausschusses "Anpassung Beiblatt 1 zu DIN 4109 aufgrund der europäischen Normung" am 29.04.2002 in Stuttgart.
- [3] Schmitz, A, Meier, A., Raabe, G: Inter-laboratory test of sound insulation measurements on heavy walls, part I - preliminary tests. Building Acoustics 6 (3/4) 1999, S. 159 - 169.
- [4] Meier, A., Schmitz, A., Raabe, G.: Inter-laboratory test of sound insulation measurements on heavy walls, part II - results of main test. Building Acoustics 6 (3/4) 1999, S. 171 - 186.
- [5] Ringversuch '98 - Schalldämmungsmessung in Prüfständen: Vorläufige Ergebnisse des PTB-Ringversuchs - Schalldämmungsmessung einer schweren Massivwand in Prüfständen. Bericht der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB), Labor 1.42 Angewandte Akustik, 1999.
- [6] Weber, L., Scholl, W.: Literaturstudie über den Einfluß der Lochung auf die Schalldämmung und Schall-Längsdämmung von Mauersteinen. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik B-BA 6/1996 (1996).
- [7] Schneider, M., Fischer, H. M.: Schalldämmung von Mauerwerk aus Lochsteinen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001 (Hamburg, 2001), S. 204 - 205.
- [8] Scheider, M., Fischer, H. M.: Schalldämmung von Lochsteinen - Ergebnisse des am IBP durchgeführten DIBt-Forschungsvorhabens zur Berechnung der Schalldämmung von Lochsteinen. Forschungsbericht der Fachhochschule Stuttgart im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, Tischvorlage zur Projektbesprechung am 4. Dezember 2002 in Stuttgart.
- [9] Weber, L., Bückle, A.: Schalldämmung von Lochsteinen - neue Erkenntnisse. Bauphysik 20 (1998), H. 6, S. 239 - 245.
- [10] DIN EN 12354-1: 2000, Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen. Beuth-Verlag, Berlin.

- [11] Blessing, S., Fischer, H.-M., Schneider, M., Späh, M., Zobec, B.: In-situ Korrektur für Bauteile im Massivbau. Fortschritte der Akustik - DAGA 2000 (Oldenburg, 2000), S. 610 - 611.
- [12] Zobec, B., Fischer, H.-M., Blessing, S., Schneider, M., Späh, M.: Luftschalldämmung im Massivbau - Vergleich zwischen Berechnungen nach EN 12354 und Meßergebnissen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2000 (Oldenburg, 2000), S. 626 - 627.
- [13] Späh, M., Fischer, H.-M., Blessing, S., Schneider, M., Zobec, B.: Bestimmung des Stoßstellendämm-Maßes  $K_{ij}$  in Gebäuden in Massivbauweise als Eingangsgröße für EN 12354. Fortschritte der Akustik - DAGA 2000 (Oldenburg, 2000), S. 630 - 631.
- [14] Schneider, M., Fischer, H.-M.: Messung des Stoßstellendämm-Maßes  $K_{ij}$  an Wänden aus Mauerwerk im Labor. Fortschritte der Akustik - DAGA 2000 (Oldenburg, 2000), S. 632 - 633.
- [15] Fischer, H.-M., Schneider, M., Blessing, S.: Einheitliches Konzept zur Berücksichtigung des Verlustfaktors bei Messung und Berechnung der Schalldämmung massiver Wände. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001 (Hamburg, 2001), S. 180 - 181.
- [16] Meier, A., Niermann, A., Hiltz, G.: Luftschalldämmung mit Leichtlochziegeln: Prognose unter Anwendung der DIN EN 12354. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001 (Hamburg, 2001), S. 194 - 195.
- [17] Späh, M., Blessing, S., Fischer, H.-M.: Verifizierung des Rechenverfahrens für die Luftschalldämmung nach EN 12354-1 für den Massivbau; Teil 1: Einfluß von Eingangsgrößen. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001 (Hamburg, 2001), S. 212 - 213.
- [18] Blessing, S., Fischer, H.-M., Schneider, M., Späh, M.: Verifizierung des Rechenverfahrens für die Luftschalldämmung nach EN 12354-1 für den Massivbau; Teil 2: erreichbare Genauigkeit. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001 (Hamburg, 2001), S. 214 - 215.
- [19] Blessing, S., Späh, M., Fischer, H.-M., Schneider, M.: Besonderheiten bei der Berücksichtigung von Stoßstellen im Massivbau. Fortschritte der Akustik - DAGA 2002 (Bochum, 2002), S. 527 - 528.
- [20] Schneider, M., Fischer, H.-M.: Probleme bei der in-situ-Korrektur nach EN 12354. Fortschritte der Akustik - DAGA 2002 (Bochum, 2002), S. 561 - 562.

- [21] Späh, M., Blessing, S., Schneider, M., Fischer, H.-M.: Prognose der Flankendämm-Maße bei der Berechnung der Schalldämmung nach DIN EN 12354-1 und Vergleich mit Meßwerten. Fortschritte der Akustik - DAGA 2002 (Bochum, 2002), S. 571 - 572.
- [22] DIN EN 20140-3: 1995, Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. Beuth-Verlag, Berlin.
- [23] DIN EN ISO 10848-1: 2000 (Entwurf), Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen - Teil 1: Rahmendokument. Beuth-Verlag, Berlin.
- [24] Nordtest NT ACOU 090: 1994, Building structures, junctions: transmission of vibrations - field measurements. Nordtest, Espoo (Finnland).
- [25] PTB-Richtlinie PTB-1.42: Instructions for the determination of the total loss factor of building elements. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig 1999.
- [26] Ljajic, E.: Schall-Längsleitung von Lochsteinen. Diplomarbeit an der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2000).
- [27] Weber, L., Burckas, K.: Meßverfahren für die Stoßstellendämm-Maße  $K_{ij}$  bei leichten Bauelementen, wenn die Verbindung einen wesentlichen Einfluß hat. Bericht B-BA 7/2002 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (2003), Entwurf.



**Eingabewerte und Ergebnisse der Berechnungen nach DIN EN 12354-1**

Eingabewerte für die Berechnung

Meßaufbau	$10 \lg (S_s / \sqrt{S_i S_j})$ [dB]	$\overline{D_{v,ij}}$ [dB]		$R_w$ [dB]	
		Rechn. Var. 2 <sup>a)</sup>	Rechn. Var. 3 <sup>b)</sup>	Rechn. Var. 2 <sup>c)</sup>	Rechn. Var. 3 <sup>d)</sup>
Aufbau 1	-2,0	11,3	10,8	43	40,0
Aufbau 2	-2,0	10,4	9,8	47	45,4
Aufbau 3	-2,1	9,0	8,9	49	47,9

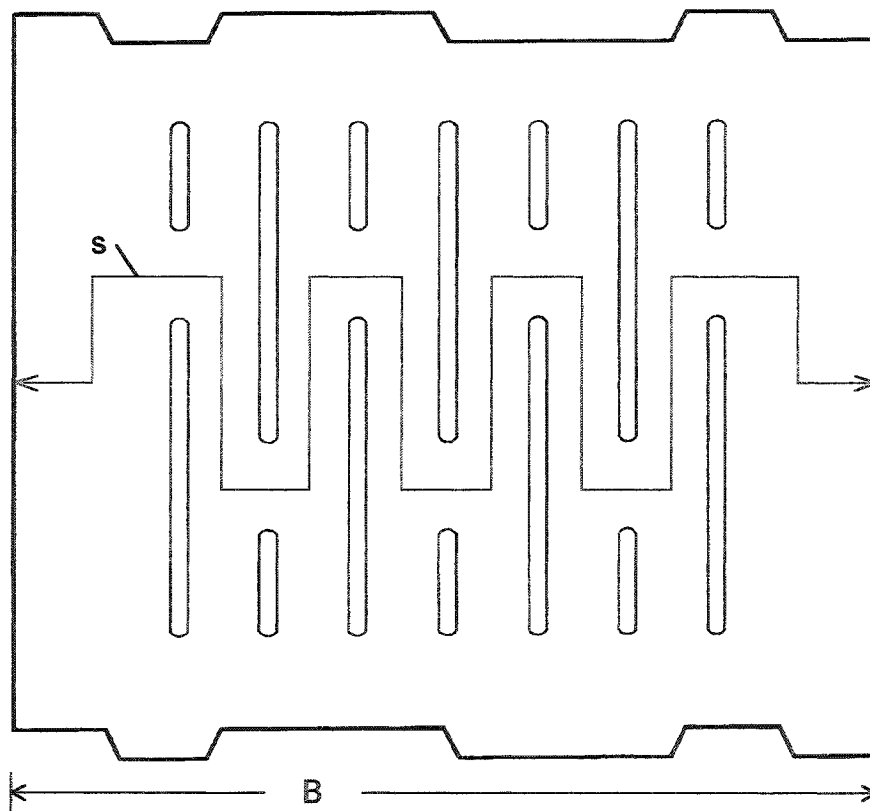
Berechnungsergebnisse

Meßaufbau	$R_{Ff,w}$ [dB]			
	Rechn. Var. 1	Rechn. Var. 2	Rechn. Var. 3	Mes- sung
Aufbau 1	49	52	49	49
Aufbau 2	54	55	53	55
Aufbau 3	54	56	55	54

- a) Meßwert, arithmetische Mittelung von 200 bis 2500 Hz
- b) nach DIN EN 12354-1, Anhang E berechnet
- c) Meßwert
- d) nach Anhang 2 (erste Genauigkeitsstufe) berechnet

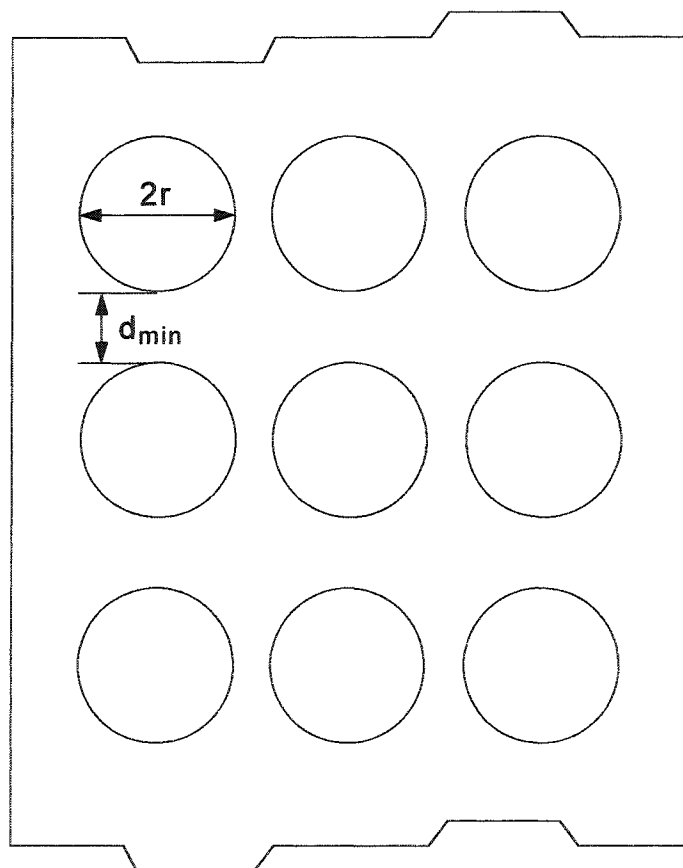
**Tabelle 1** Eingabewerte (oben) und Ergebnisse (unten) der nach DIN EN 12354-1 für das bewertete Flankendämm-Maß  $R_{Ff,w}$  durchgeführten Berechnungen. Die untersuchten Berechnungsvarianten sind in Ziffer 4.4.4 beschrieben. Neben den Berechnungsergebnissen sind auch die gemessenen Werte angegeben.

Bestimmung des Steifigkeitsmaßes S



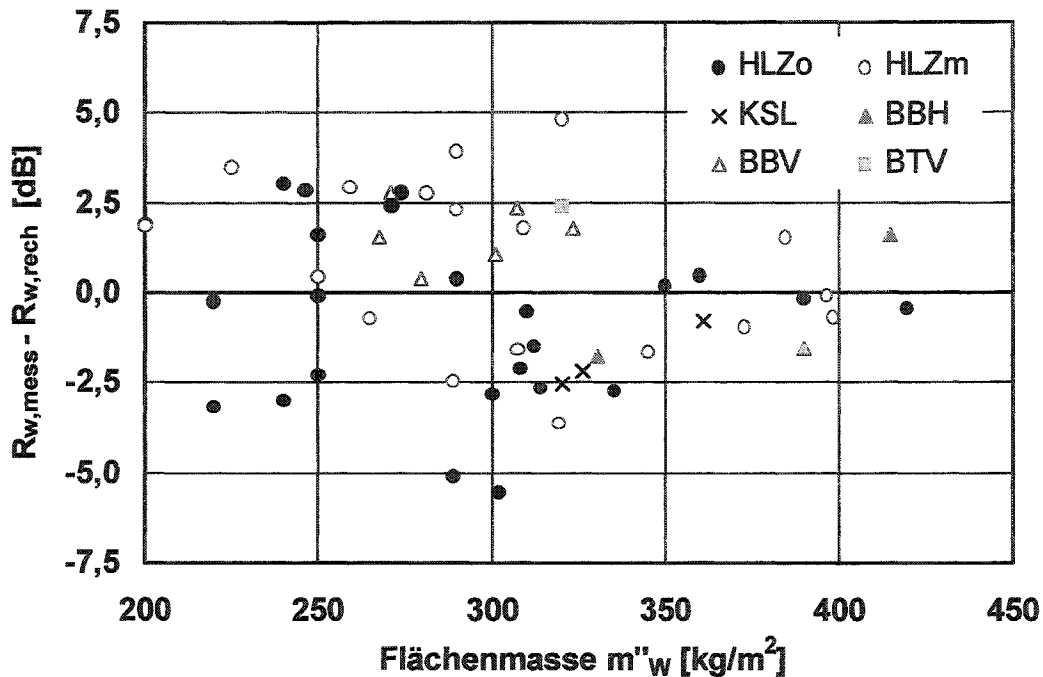
**Bild 1** Ermittlung des Steifigkeitsmaßes  $S = B/s$  ( $B$  = Steinbreite,  $s$  = kürzester Weg von der Vorder- zur Rückseite des Steins entlang der Stege). Der Weg  $s$  verläuft in Stegmitte unter Vermeidung des seitlichen Rahmens und durchgehender Querstege. Anfangs- und Endpunkt befinden sich in der Mitte der Außenflächen.

Bestimmung der mittleren Stegdicke  $d_Q$



**Bild 2** Bestimmung der mittleren Dicke der durchgehenden Querstege  $d_Q$  bei Steinen mit ungleichförmiger Stegdicke. Für das dargestellte Beispiel mit kreisförmigen Löchern ergibt sich  $d_Q = d_{\min} + 2r(1 - \pi/4)$ .

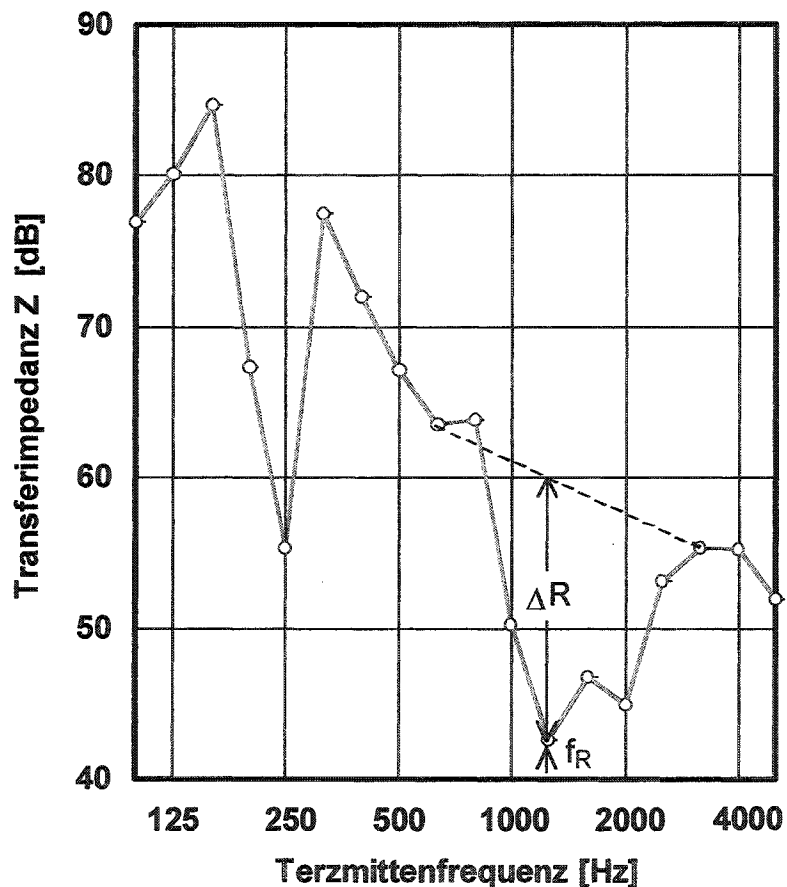
Genauigkeit des Berechnungsmodells



**Bild 3** Differenz zwischen Meß- und Rechenwerten des bewerteten Schalldämm-Maßes,  $R_{w,mess} - R_{w,rech}$ , in Abhängigkeit von der Flächenmasse der Wände bei Anwendung des entwickelten Berechnungsmodells (erste Genauigkeitsstufe). Der dargestellte Datensatz umfaßt insgesamt 56 Wände (die Wand TR1 wurde nicht berücksichtigt, da sie die Anwendungsvoraussetzungen des Berechnungsmodells nicht erfüllt). Die statistische Auswertung der dargestellten Werte liefert folgende Ergebnisse:

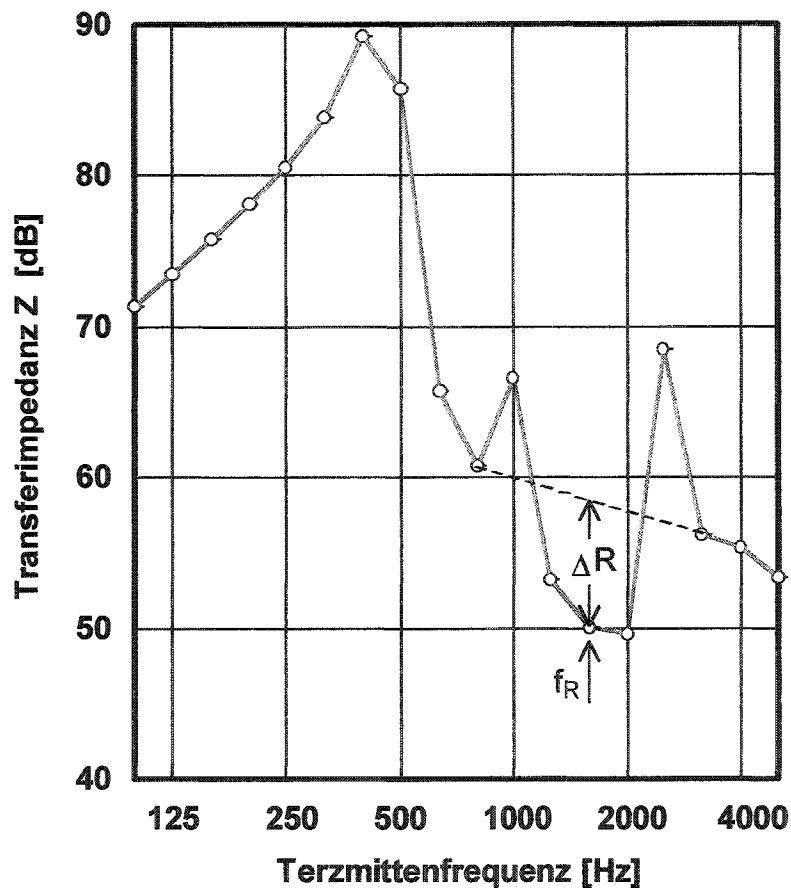
größter Fehler:	$\Delta R_{w,max}$	=	4,8 dB
kleinster Fehler:	$\Delta R_{w,min}$	=	-5,6 dB
mittlerer Fehler:	$\overline{\Delta R_w}$	=	0,0 dB
Standardabweichung:	$\sigma$	=	2,4 dB
quadratisch gemittelter Fehler:	$\overline{\Delta R_w^q}$	=	2,3 dB

Transferimpedanz des Steins VL9



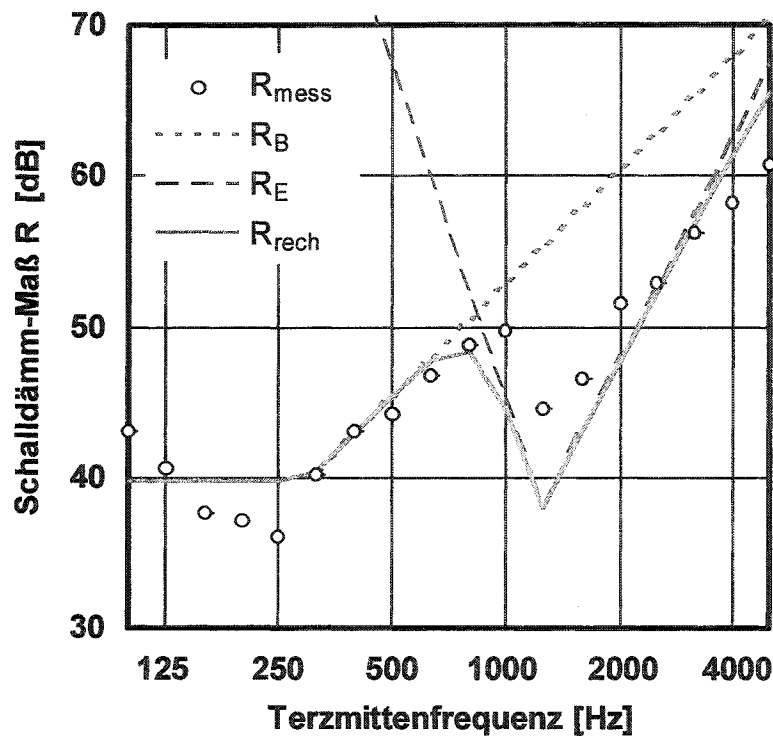
**Bild 4** Transferimpedanz des Steins VL9 in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Messung der Transferimpedanz erfolgt an einem Verband aus sieben Steinen nach dem im Bericht B-BA 3/2002 beschriebenen Verfahren. Aus den dargestellten Meßwerten ergibt sich für die Resonanzfrequenz des Steins ein Wert von  $f_R \cong 1250$  Hz. Der Dämmungseinbruch im Bereich der Resonanz hat eine Tiefe von  $\Delta R \cong 17,3$  dB.

Transferimpedanz des Steins VL10



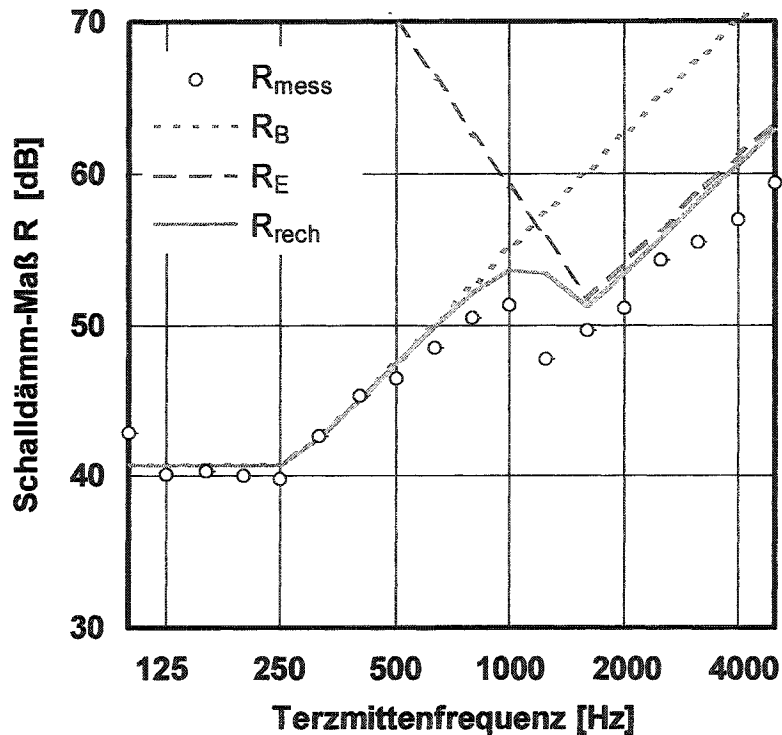
**Bild 5** Transferimpedanz des Steins VL10 in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Messung der Transferimpedanz erfolgt an einem Verband aus sieben Steinen nach dem im Bericht B-BA 3/2002 beschriebenen Verfahren. Aus den dargestellten Meßwerten ergibt sich für die Resonanzfrequenz des Steins ein Wert von  $f_R \cong 1600$  Hz. Der Dämmungseinbruch im Bereich der Resonanz hat eine Tiefe von  $\Delta R \cong 8,4$  dB.

Schalldämm-Maß der Wand VL9



**Bild 6** Schalldämm-Maß der Wand VL9 in Abhängigkeit von der Frequenz. Die mit  $R_{\text{mess}}$  bezeichneten Werte wurden durch Schalldämm-Messungen in einem bauakustischen Prüfstand ermittelt. Die durchgezogene Kurve mit der Bezeichnung  $R_{\text{rech}}$  wurde aus der in Bild 4 dargestellten Transferimpedanz der Steine berechnet, wobei  $R_B$  und  $R_E$  Zwischenwerte der Berechnung darstellen (Dämmungsanteil durch Biege- und durch Eigenschwingungen der Steine). Die resultierenden Werte des bewerteten Schalldämm-Maßes betragen  $R_{w,\text{mess}} = 47 \text{ dB}$  und  $R_{w,\text{rech}} = 46 \text{ dB}$ .

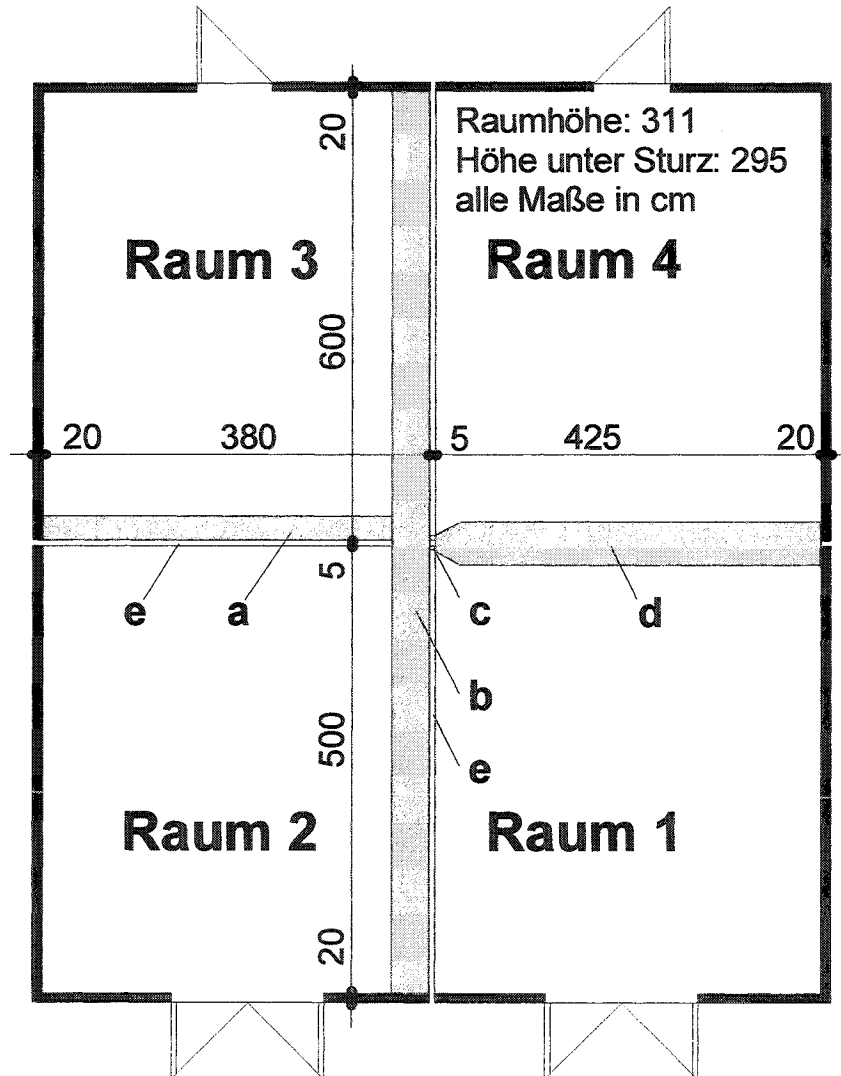
Schalldämm-Maß der Wand VL10



**Bild 7** Schalldämm-Maß der Wand VL10 in Abhängigkeit von der Frequenz. Die mit  $R_{\text{mess}}$  bezeichneten Werte wurden durch Schalldämm-Messungen in einem bauakustischen Prüfstand ermittelt. Die durchgezogene Kurve mit der Bezeichnung  $R_{\text{rech}}$  wurde aus der in Bild 5 dargestellten Transferimpedanz der Steine berechnet, wobei  $R_B$  und  $R_E$  Zwischenwerte der Berechnung darstellen (Dämmungsanteil durch Biegewellen und durch Eigenschwingungen der Steine). Die resultierenden Werte des bewerteten Schalldämm-Maßes betragen  $R_{w,\text{mess}} = 49 \text{ dB}$  und  $R_{w,\text{rech}} = 51 \text{ dB}$ .



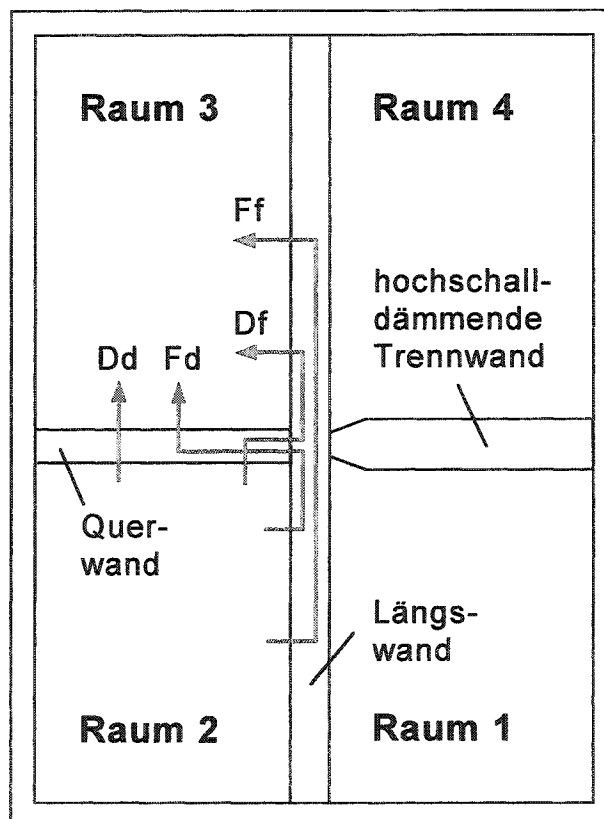
Schematische Darstellung des Meßaufbaus



- a Querwand (große Flächenmasse, ungelochte Steine)
- b Längswand aus Lochsteinen
- c schalldichte elastische Verbindung
- d hochschalldämmende Trennwand in Leichtbauweise
- e elastische Trennfuge (in Boden, Decke und Seitenwänden)

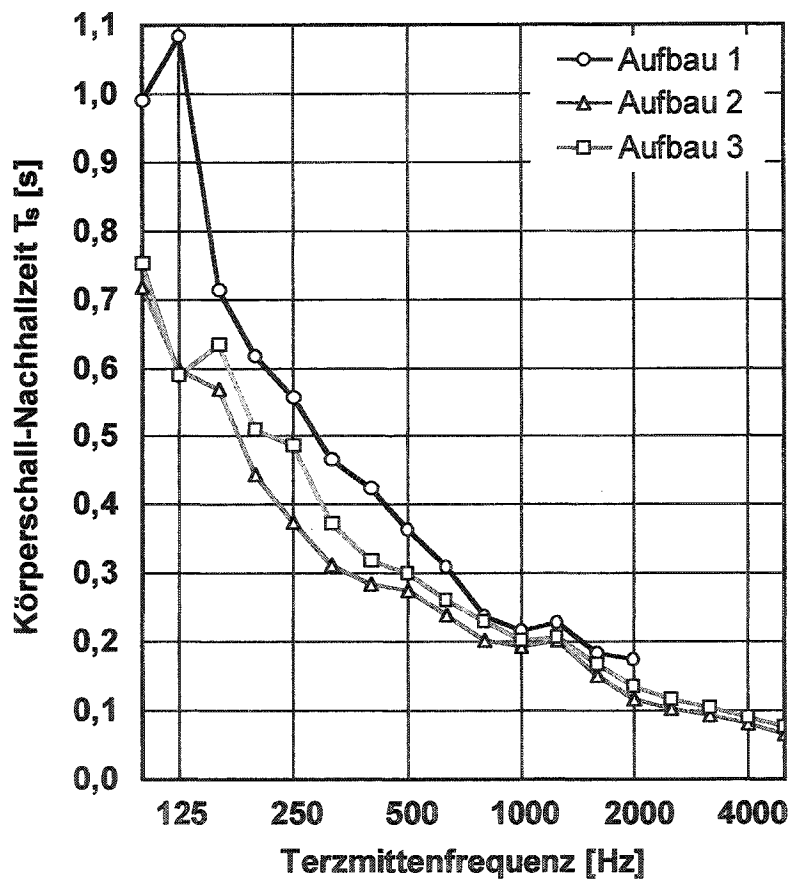
**Bild 8** Skizze des Meßaufbaus zur Untersuchung der Schall-Längsdämmung. Die Messungen wurden im Diagonalprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik durchgeführt. Die Prüfstands-Maße sind in der Skizze angegeben.

Maßgebliche Schallübertragungswege



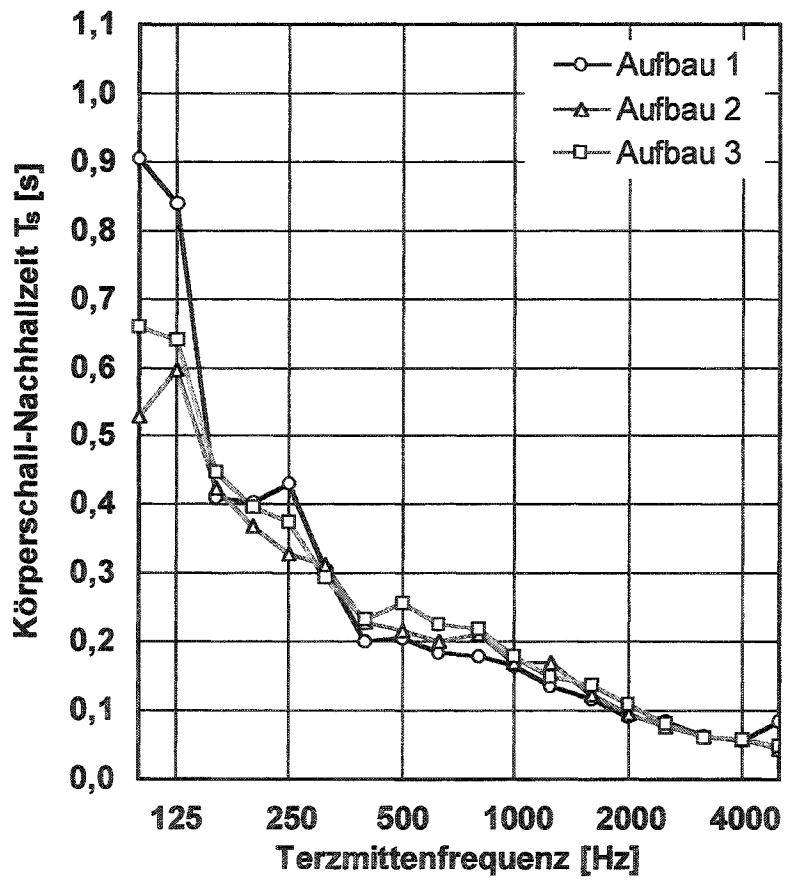
**Bild 9** Schematische Darstellung der für den untersuchten Prüfaufbau maßgeblichen Schallübertragungswege zwischen den Räumen 2 und 3 mit den dafür verwendeten Bezeichnungen.

Körperschall-Nachhallzeit der Längswände



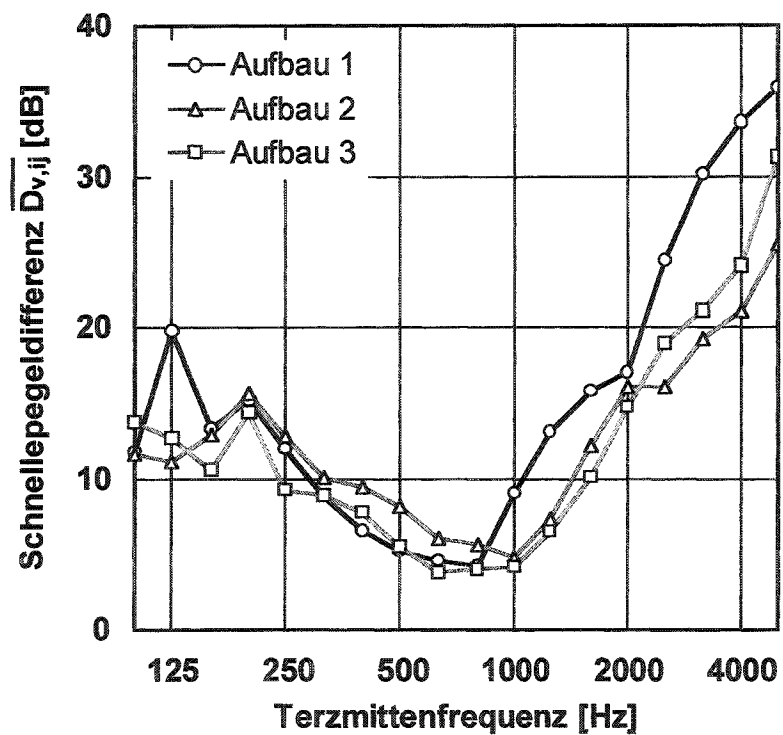
**Bild 10** Körperschall-Nachhallzeit der Längswände der drei untersuchten Meßaufbauten in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Messungen an Aufbau 1 waren wegen eines erst nachträglich erkannten meßtechnischen Problems (mangelhafte Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers) nur bis 2000 Hz verwendbar.

Körperschall-Nachhallzeit der Querwände



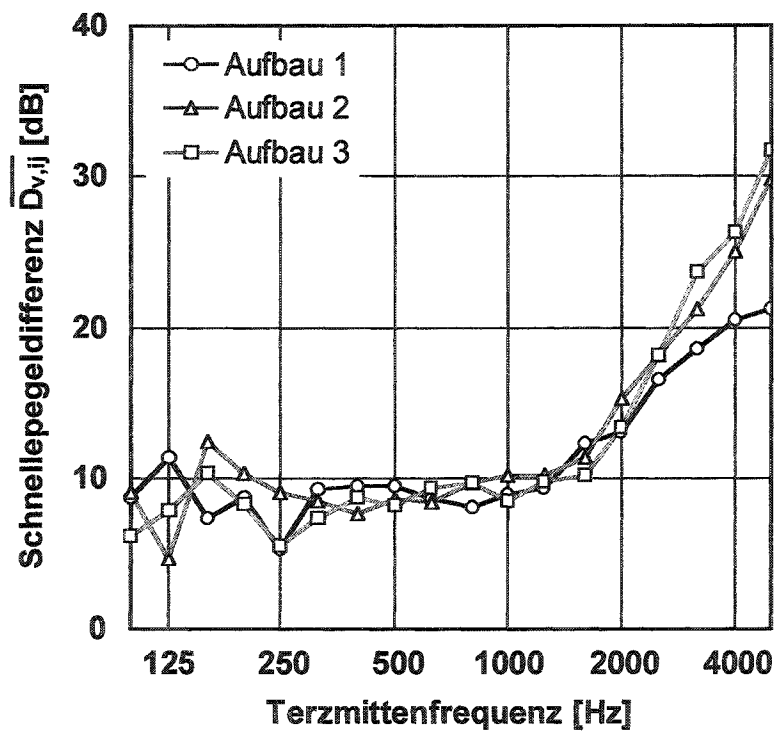
**Bild 11** Körperschall-Nachhallzeit der Querwände der drei untersuchten Meßaufbauten in Abhängigkeit von der Frequenz.

Schnellepegeldifferenz für den Übertragungsweg Ff



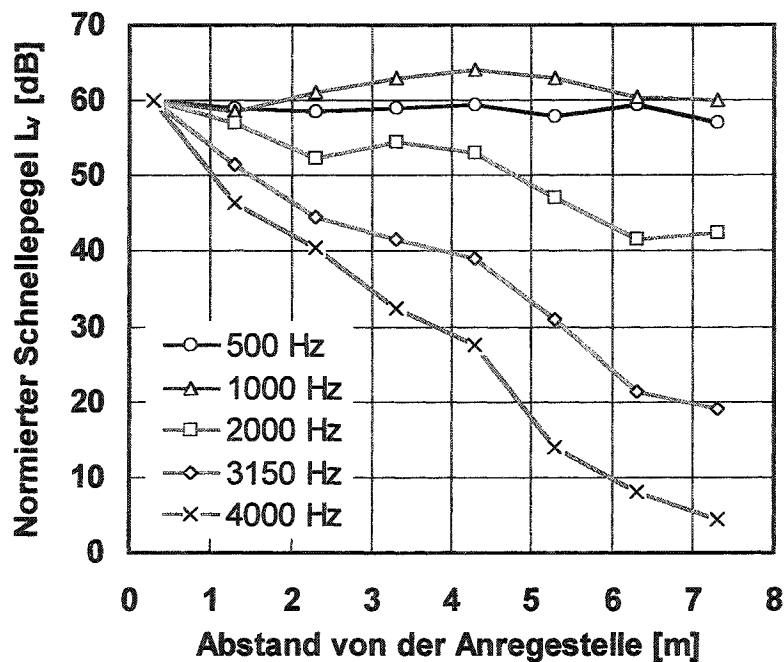
**Bild 12** Richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz für die Stoßstelle zwischen der linken und rechten Seite der Längswand (Übertragungsweg Ff).

Schnellepegeldifferenz für den Übertragungsweg Df



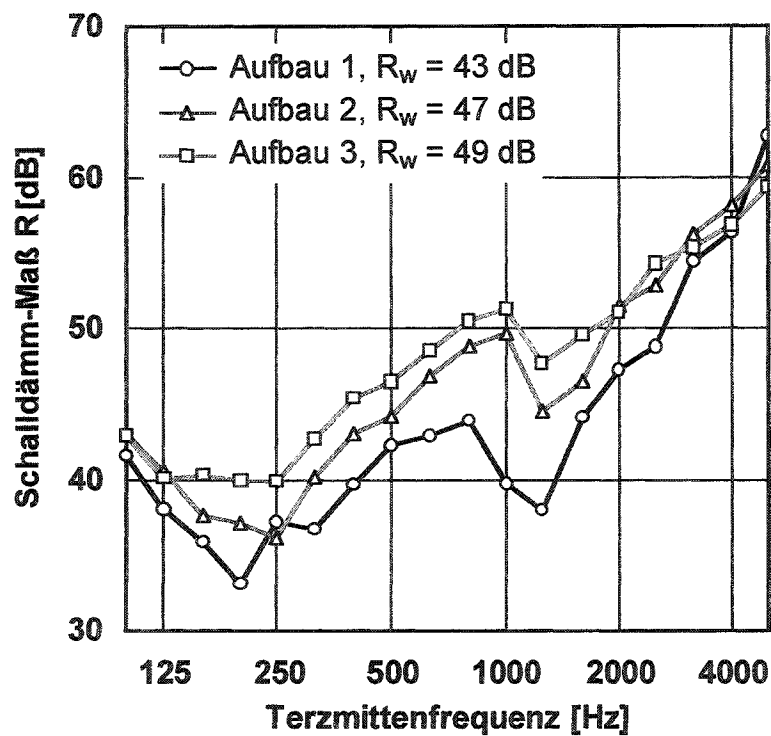
**Bild 13** Richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz für die Stoßstelle zwischen Querwand und Längswand (Übertragungsweg Df).

Ausbreitungsdämpfung von HLZ-Mauerwerk



**Bild 14** Schnellepegel auf einem aus Hochlochziegeln errichteten Wandstreifen in unterschiedlichem Abstand von der Anreigestelle. Der Wandstreifen bestand aus drei Steinlagen, war elastisch gelagert und hatte eine Länge von 8,9 m. Steine, Putz und Mörtel entsprachen der Wand VE5 in Anhang 8 (die Steine wiesen ein elliptisches Lochbild mit versetzten Querstege auf und hatten in vermauertem Zustand eine Resonanzfrequenz von  $f_R \cong 1400$  Hz). Der Wandstreifen wurde auf der einen Seite mit einem Shaker angeregt. Die gegenüberliegende Seite war durch eine Sandschüttung bedämpft, so daß sich ein reflexionsfreier Abschluß ergab und eine freie Schallausbreitung entlang des Streifens gewährleistet war.

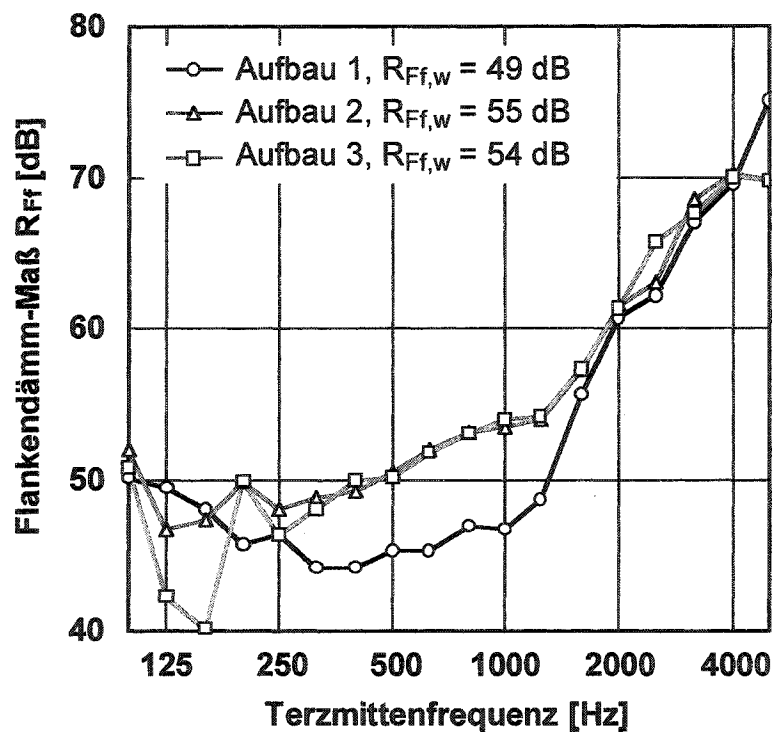
Durchgangsdämmung der Längswand



**Bild 15** Schalldämmung der drei untersuchten Längswände in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Schalldämm-Messungen erfolgten in Durchgangsrichtung der Wände zwischen den Räumen 1 und 2.

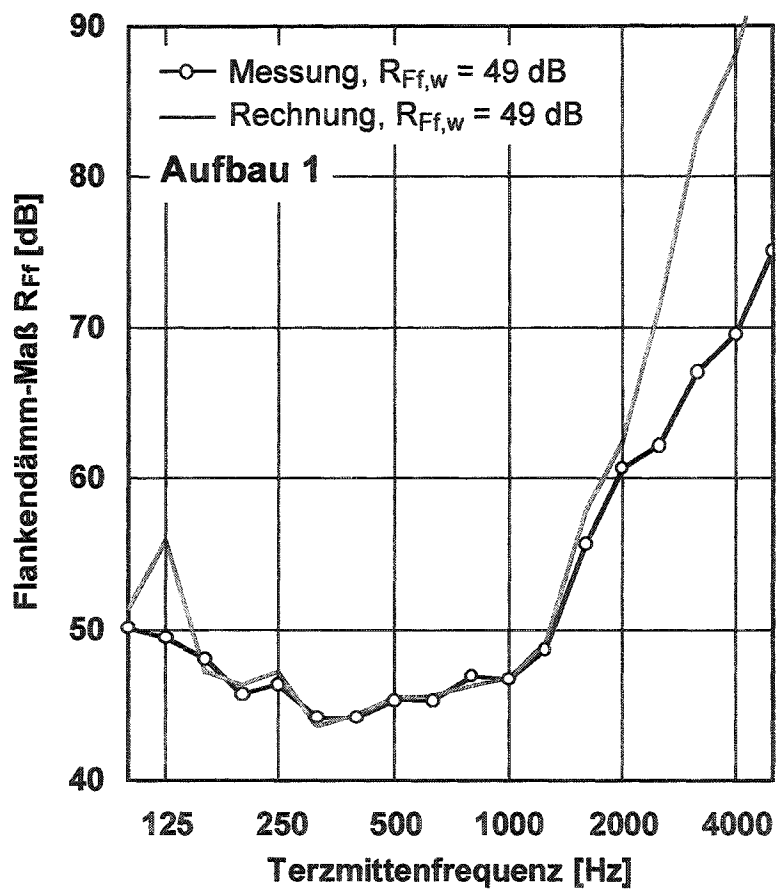


Flankendämmung der Längswand



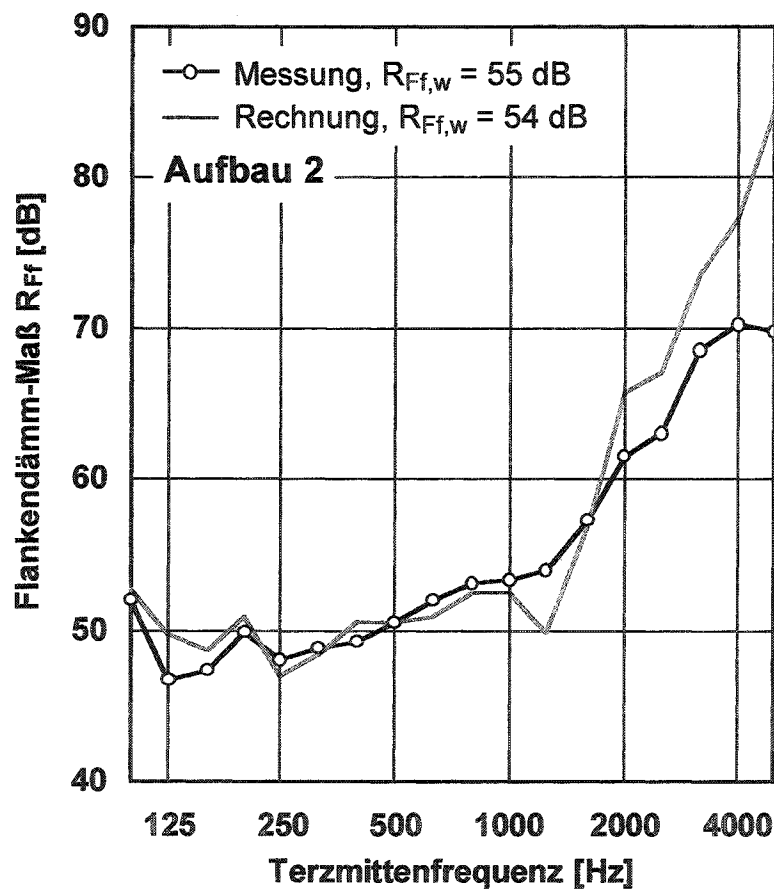
**Bild 16** Flankendämmung der drei untersuchten Längswände in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Schalldämm-Messungen erfolgten in Längsrichtung der Wände zwischen den Räumen 1 und 4.

**Flankendämmung der Längswand für Aufbau 1,  
Vergleich von Messung und Rechnung**



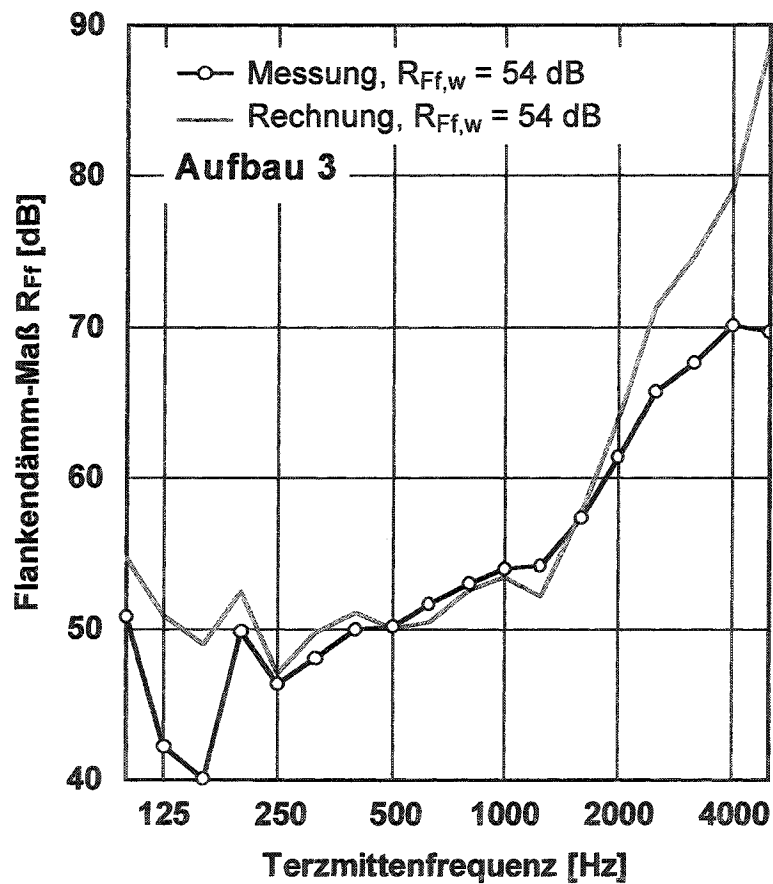
**Bild 17** Flankendämm-Maß der Längswand in Abhängigkeit von der Frequenz. Messung und Rechnung erfolgten für Aufbau 1. Die Berechnung wurde nach DIN EN 12354-1 durchgeführt, indem die für die Durchgangsdämmung und die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz ermittelten Meßwerte in Gl. (3) eingesetzt wurden.

**Flankendämmung der Längswand für Aufbau 2,  
Vergleich von Messung und Rechnung**



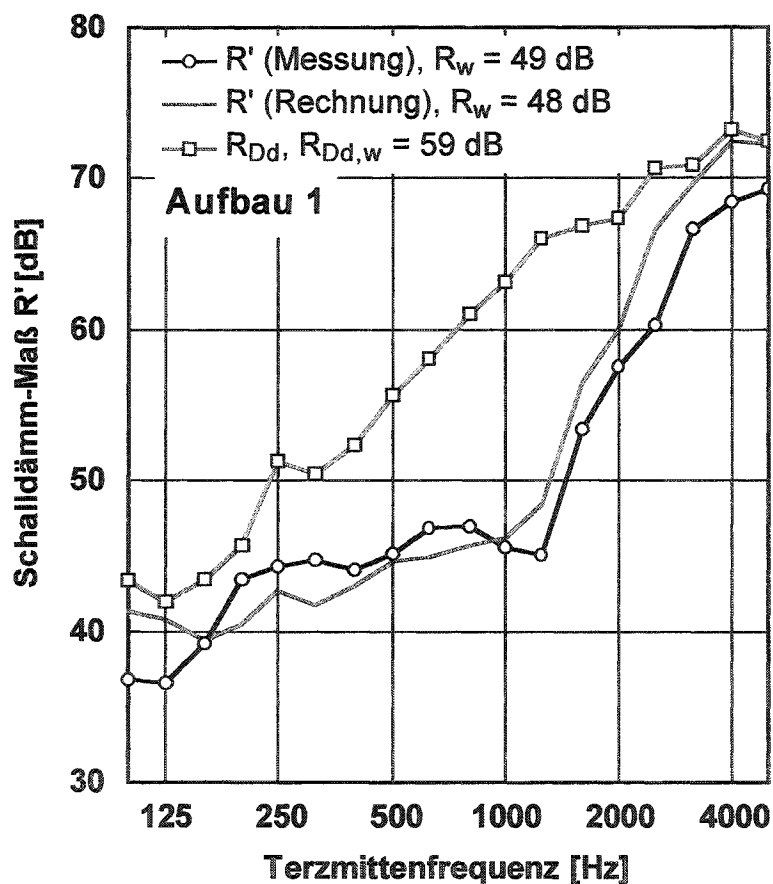
**Bild 18** Flankendämm-Maß der Längswand in Abhängigkeit von der Frequenz. Messung und Rechnung erfolgten für Aufbau 2. Die Berechnung wurde nach DIN EN 12354-1 durchgeführt, indem die für die Durchgangsdämmung und die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz ermittelten Meßwerte in Gl. (3) eingesetzt wurden.

**Flankendämmung der Längswand für Aufbau 3,  
Vergleich von Messung und Rechnung**



**Bild 19** Flankendämm-Maß der Längswand in Abhängigkeit von der Frequenz. Messung und Rechnung erfolgten für Aufbau 3. Die Berechnung wurde nach DIN EN 12354-1 durchgeführt, indem die für die Durchgangsdämmung und die richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz ermittelten Meßwerte in Gl. (3) eingesetzt wurden.

**Schalldämmung der Querwand mit Nebenwegen für Aufbau 1,  
Vergleich von Messung und Rechnung**



**Bild 20** Schalldämm-Maß der Querwand mit Nebenwegen,  $R'$ , in Abhängigkeit von der Frequenz. Messung und Rechnung erfolgten für Aufbau 1. Die Berechnung wurde nach DIN EN 12354-1 auf der Grundlage der für die Übertragungswege Ff, Fd, Df und Dd gemessenen Werte durchgeführt. Neben  $R'$  ist auch der für den Weg Dd ermittelte Meßwert (Schalldämmung der Querwand ohne Nebenwege) eingezeichnet.

**Anhang 1** Erläuterung der verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen.

Formelzeichen (alphabetisch geordnet)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a_i$	m	äquivalente Absorptionslänge des Bauteils i
$a_j$	m	äquivalente Absorptionslänge des Bauteils j
$A_S$	dB	Sicherheitsabschlag für die bauaufsichtliche Zulassung
$B$	mm	Steinbreite (Abmessung senkrecht zur Wandfläche)
$c_L$	m/s	Schallgeschwindigkeit in Luft ( $c_L = 340$ m/s)
$d_Q$	mm	mittlere Dicke der durchgehenden Querstege
$D_{v,ij}$	dB	Schnellepegeldifferenz der Bauteile i und j bei Anregung von i
$D_{v,ji}$	dB	Schnellepegeldifferenz der Bauteile i und j bei Anregung von j
$\overline{D_{v,ij}}$	dB	richtungsgemittelte Schnellepegeldifferenz der Bauteile i und j
$f$	Hz	Frequenz
$f_R$	Hz	Resonanzfrequenz der Steine (Grundschiwingung)
$f_{ref}$	Hz	Bezugsfrequenz für äquivalente Absorptionslänge ( $f_{ref} = 1000$ Hz)
$K_B$	dB	Korrektur für die Steinbreite
$K_{ij}$	dB	Stoßstellendämm-Maß
$K_L$	dB	Korrektur für die Anzahl der Lochebenen
$K_S$	dB	Korrektur für die Steifigkeit der Steine
$K_{Stein}$	dB	Korrektur zur Berücksichtigung der Beschaffenheit der Steine
$K_{Wand}$	–	Korrektur zur Berücksichtigung des Wandaufbaus
$L$	mm	Steinlänge
$l_{ij}$	m	gemeinsame Kantenlänge der Bauteile i und j
$m''_W$	kg/m <sup>2</sup>	Flächenmasse der Wand
$M_L$	–	Lagerfugen mit Normal- oder Dünnbettmörtel ( $M_L = 1$ oder $0$ )
$M_S$	–	Stoßfugen vermörtelt oder knirsch gestoßen ( $M_S = 1$ oder $0$ )
$N_L$	–	Anzahl der Lochebenen parallel zur Wandfläche
$N_Q$	–	Anzahl der durchgehenden Querstege
$R'$	dB	Schalldämm-Maß mit Nebenwegen
$R_B$	dB	Dämmungsanteil infolge von Biegewellen

Fortsetzung Anhang 1

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$R_{Dd}$	dB	Schalldämm-Maß für den Weg Dd (zwischen Raum 2 und 3)
$R_E$	dB	Dämmungsanteil infolge von Eigenschwingungen der Steine
$R_{Ff}$	dB	Flankendämm-Maß für den Übertragungsweg Ff
$R_i$	dB	Schalldämm-Maß des Bauteils i
$R_j$	dB	Schalldämm-Maß des Bauteils j
$R_{ij}$	dB	Flankendämm-Maß bei Schallübertragung über die Bauteile i und j
$R_w$	dB	bewertetes Schalldämm-Maß der Lochsteinwand
$R_{w,mess}$	dB	Meßwert des bewerteten Schalldämm-Maßes
$R_{w,rech}$	dB	Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes
$R_{w,u}$	dB	Schalldämmung einer gleich schweren homogenen Wand
s	mm	kürzeste Verbindung zwischen Vorder- und Rückseite der Steine
S	–	Steifigkeitsmaß der Steine
$S_i$	m <sup>2</sup>	Fläche des Bauteils i
$S_j$	m <sup>2</sup>	Fläche des Bauteils j
$S_s$	m <sup>2</sup>	Fläche des trennenden Bauteils
$T_s$	s	Körperschall-Nachhallzeit
$T_{s,i}$	s	Körperschall-Nachhallzeit des Bauteils i
$\Delta R$	dB	Tiefe des Dämmungseinbruchs im Bereich der Steinresonanz
$\Delta R_w$	dB	$R_{w,mess} - R_{w,rech}$
$\overline{\Delta R_w}$	dB	Mittelwert von $\Delta R_w$
$\overline{\Delta R_w}^q$	dB	quadratisch gemittelte Abweichung von $\Delta R_w$
$\Delta R_{w,L}$	dB	Verminderung der Schalldämmung durch die Lochung der Steine
$\Delta R_{w,max}$	dB	größter Wert von $\Delta R_w$
$\Delta R_{w,min}$	dB	betragsmäßig größter $\Delta R_w$ -Wert mit negativem Vorzeichen
$\sigma$	dB	Standardabweichung von $\Delta R_w$

Durch Anhängen der Indizes "lab" oder "situ" an ein Formelzeichen wird zum Ausdruck gebracht, daß sich die entsprechende Größe auf die Bausituation im Prüfstand oder am Bau bezieht.

Fortsetzung Anhang 1

Wand-Nummer

Die Wände sind nach dem Lochbild der zugehörigen Steine benannt, wobei eine Bezeichnung aus drei Buchstaben verwendet wird. Die Buchstaben haben folgende Bedeutung:

- |               |         |   |  |
|---------------|---------|---|--|
| 1. Buchstabe: | D       | – | durchgehende Querstege                           |
|               | T       | – | teils durchgehende und teils versetzte Querstege |
|               | V       | – | versetzte Querstege                              |
| 2. Buchstabe: | E       | – | elliptische oder rhombische Lochung              |
|               | G       | – | Gitterlochung                                    |
|               | L       | – | Langlöcher                                       |
|               | P       | – | Parallelogramm                                   |
|               | R       | – | Rechtecklochung                                  |
|               | U       | – | unterschiedliche Löcher im gleichen Stein        |
| 3. Buchstabe: | a, b, c | – | Unterscheidung von Wänden aus gleichen Steinen   |

Steintyp und -material

Die verwendeten Abkürzungen bezeichnen folgende Arten von Steinen:

- |      |   |   |
|------|---|---|
| BBH  | – | Bimsbetonhohlblock                          |
| BBV  | – | Bimsbetonvollblock                          |
| BTV  | – | Blähtonvollblock                            |
| HLZ  | – | Hochlochziegel                              |
| HLZm | – | Hochlochziegel mit durchgehenden Querstegen |
| HLZo | – | Hochlochziegel ohne durchgehende Querstege  |
| KSL  | – | Kalksandlochstein                           |



**Anhang 2** Zusammenfassung aller zur Berechnung der Schalldämmung von Lochsteinwänden benötigten Formeln (Erläuterung der verwendeten Formelzeichen auf Seite 2).

$$R_w = R_{w,u} - \Delta R_{w,L} \quad (2.1)$$

$$R_{w,u} = \begin{cases} \left[ 30,9 \lg \left( \frac{m''_w}{m''_0} \right) - 22,2 \right] \text{ dB} & \text{für Kalksandstein} \\ \left[ 26,1 \lg \left( \frac{m''_w}{m''_0} \right) - 8,4 \right] \text{ dB} & \text{für Poren- und Bimsbeton} \\ \left[ 27,1 + 0,1243 \left( \frac{m''_w}{m''_0} \right) - 0,000113 \left( \frac{m''_w}{m''_0} \right)^2 \right] \text{ dB} & \text{für Ziegel} \end{cases} \quad (2.2)$$

mit  $m''_0 = 1 \text{ kg/m}^2$

$$\Delta R_{w,L} = K_{\text{Stein}} / K_{\text{Wand}} + 0,2 \text{ dB} \geq 0 \quad (2.3)$$

$$K_{\text{Stein}} = K_S + K_L + K_B \quad (2.4)$$

$$K_{\text{Wand}} = 1 + 0,24 M_L + 0,18 M_S \quad (2.5)$$

$$K_S = \begin{cases} [16,9 - 30,4 S] \text{ dB} & \text{mit } S = B/s \quad \text{für Steine ohne} \\ & \text{durchgehende Querstege} \\ [12,6 - 49,8 d_Q (N_Q + 1)/L] \text{ dB} & \text{für Steine mit} \\ & \text{durchgehenden Querstegen}^* \end{cases} \quad (2.6)$$

$$K_L = 2,6 \lg(N_L/3) \text{ dB} \quad (2.7)$$

$$K_B = \left[ 26,9 \frac{B - 240 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} \right] \text{ dB} \quad (2.8)$$

$$M_L = \begin{cases} 1 & \text{für Lagerfugen mit Normalmörtel} \\ 0 & \text{für Lagerfugen mit Dünnbettmörtel} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$M_S = \begin{cases} 1 & \text{für vermörtelte Stoßfugen} \\ 0 & \text{für unvermörtelte Stoßfugen} \end{cases} \quad (2.10)$$

\* Sind nur ein oder zwei durchgehende Stege vorhanden, so gelten besondere Rechenregeln.

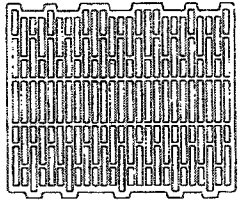
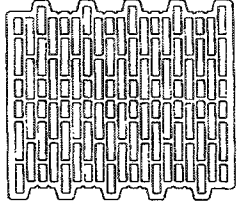
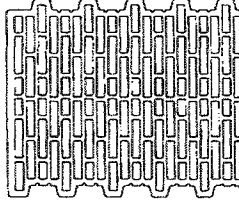
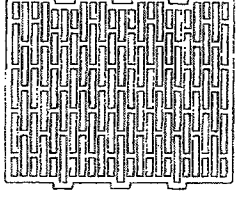
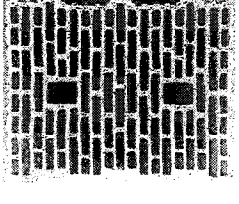
Fortsetzung Anhang 2

Erläuterung der im Berechnungsmodell verwendeten Formelzeichen (in alphabetischer Reihenfolge):

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
B	mm	Steinbreite (Abmessung senkrecht zur Wandfläche)
$d_Q$	mm	mittlere Dicke der durchgehenden Querstege
$K_B$	dB	Korrektur für die Steinbreite
$K_L$	dB	Korrektur für die Anzahl der Lochebenen
$K_S$	dB	Korrektur für die Steifigkeit der Steine
$K_{\text{Stein}}$	dB	Korrektur zur Berücksichtigung der Beschaffenheit der Steine
$K_{\text{Wand}}$	–	Korrektur zur Berücksichtigung des Wandaufbaus
L	mm	Steinlänge
$m''_W$	kg/m <sup>2</sup>	Flächenmasse der Wand
$M_L$	–	Lagerfugen mit Normal- oder Dünnbettmörtel ( $M_L = 1$ oder $0$ )
$M_S$	–	Stoßfugen vermörtelt oder knirsch gestoßen ( $M_S = 1$ oder $0$ )
$N_L$	–	Anzahl der Lochebenen parallel zur Wandfläche
$N_Q$	–	Anzahl der durchgehenden Querstege
$R_w$	dB	bewertetes Schalldämm-Maß der Lochsteinwand
$R_{w,u}$	dB	Schalldämmung einer gleich schweren homogenen Wand
s	mm	kürzeste Verbindung zwischen Vorder- und Rückseite der Steine
S	–	Steifigkeitsmaß der Steine
$\Delta R_{w,L}$	dB	Verminderung der Schalldämmung durch die Lochung der Steine

Wand-Nr. (alphabetisch nach Lochbild geordnet)		TR1	TR2	TR3	VR10	VU8	
Steine	Typ, Material	HLZ	HLZ	HLZ	HLZ	HLZ	
	Abmessungen [mm]	Länge L	248	248	248	247	239
		Breite B	300	300	365	300	297
		Höhe H	249	249	249	247	249
	Lochflächenanteil A [-]		0,50	0,54	0,54	0,55	0,48
	Steifigkeitsmaß S [-]		0,33	0,36	0,35	0,33	0,50
	Anzahl Lochebenen N <sub>L</sub> [-]		21	19	23	19	19
	durchgehende	Anzahl N <sub>Q</sub> [-]	2	1	1	0	0
	Querstege	mittlere Dicke d <sub>Q</sub> [mm]	5,0	2,5	2,5	0,0	0,0
	Lochlänge / Dicke Längsstege l/d <sub>L</sub> [-]		11,7	9,8	9,8	9,8	9,3
	Steinrohdichte ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]		0,70	0,70	0,70	0,70	0,71
	Wand	Dicke (inkl. Putz) [mm]		330	330	380	330
Flächen- masse [kg/m <sup>2</sup> ]		gesamte Wand m'' <sub>w</sub>	225	225	289	250	289
		Innenputz	10	20	20	10	10
		Außenputz	20	20	0	20	30
Lagerfugen mit Dünnbettmörtel: J / N		J	J	J	N	N	
Stoßfugen vermörtelt: J / N		N	N	N	N	N	
bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB] (Messung)		45	43	39	44	44	
bewertetes Schalldämm-Maß R <sub>w</sub> [dB] (Rechnung)		38,5	39,5	41,5	42,4	49,1	
ΔR <sub>w</sub> [dB] (Messung minus Rechnung)		6,5	3,5	-2,5	1,6	-5,1	

**Anhang 3** Schalltechnisch maßgebliche Daten der nach Abschluß des ersten Projektabschnitts neu in die Untersuchung einbezogenen Wände. Im unteren Teil der Tabelle sind die gemessene und die mit dem entwickelten Modell berechnete Schalldämmung aufgeführt. Die zugehörigen Lochbilder sind in Anhang 4 dargestellt.

Nr.	Lochbild
TR1	
TR2	
TR3	
VR10	
VU8	

**Anhang 4** Lochbilder der in Anhang 3 beschriebenen Steine im Maßstab 1:10 (Schalldurchgang in horizontaler Richtung).

Wand-Nr.	DP1	DP2	DR1a	DR1b	DR1c	DR2a	DR2b	DR4	DR5	DR6a	DR6b	DR7
R <sub>w</sub> [dB] Messung	53	47	42	45	48	46	51	53	51	47	45	43
R <sub>w</sub> [dB] Rechnung	49,0	45,1	43,6	45,6	48,1	46,9	49,4	54,6	50,6	44,7	42,2	43,7
ΔR <sub>w</sub> [dB]	4,0	1,9	-1,6	-0,6	-0,1	-0,9	1,6	-1,6	0,4	2,3	2,8	-0,7

Wand-Nr.	DU1a	DU1b	TR1	TR2	TR3	TU1	TU2	VE1	VE2	VE3	VE4	VE5
R <sub>w</sub> [dB] Messung	54	56	45	43	39	53	41	45	44	44	47	41
R <sub>w</sub> [dB] Rechnung	51,1	54,2	38,5	39,5	41,5	48,2	44,7	47,1	46,8	42,1	44,2	44,0
ΔR <sub>w</sub> [dB]	2,9	1,8	6,5	3,5	-2,5	4,8	-3,7	-2,1	-2,8	1,9	2,8	-3,0

Wand-Nr.	VE6a	VE6b	VG1a	VG1b	VG2	VG3a	VG3b	VL1a	VL1b	VL2	VL6	VL7a
R <sub>w</sub> [dB] Messung	58	52	45	42	43	35	38	48	50	46	53	51
R <sub>w</sub> [dB] Rechnung	56,4	53,8	42,2	39,6	40,0	38,2	40,3	50,2	50,8	48,5	50,6	50,6
ΔR <sub>w</sub> [dB]	1,6	-1,8	2,8	2,4	3,0	-3,2	-2,3	-2,2	-0,8	-2,5	2,4	0,4

Wand-Nr.	VL7b	VL7c	VL8	VL9	VL10	VR1	VR2	VR3	VR8a	VR8b	VR9	VR10
R <sub>w</sub> [dB] Messung	54	54	55	47	49	50	48	43	51	53	59	44
R <sub>w</sub> [dB] Rechnung	51,6	52,2	52,2	45,4	47,9	49,6	50,6	48,6	50,8	53,4	60,7	42,4
ΔR <sub>w</sub> [dB]	2,4	1,8	2,8	1,6	1,1	0,4	-2,6	-5,6	0,2	-0,4	-1,7	1,6

Wand-Nr.	VU2a	VU2b	VU3	VU4a	VU4b	VU5	VU6	VU7	VU8
R <sub>w</sub> [dB] Messung	36	38	43	44	48	46	46	51	44
R <sub>w</sub> [dB] Rechnung	36,2	38,1	45,8	44,5	48,2	45,5	47,5	52,5	49,1
ΔR <sub>w</sub> [dB]	-0,2	-0,1	-2,8	-0,5	-0,2	0,5	-1,5	-1,5	-5,1

**Anhang 5** Übersicht über die Meß- und Berechnungsergebnisse für alle betrachteten Wände (insgesamt 57 Wände). Die Wände sind alphabetisch nach dem Lochbild der Steine geordnet. Die Wand TR1 erfüllt nicht die Anwendungsvoraussetzungen des Berechnungsmodells.

Statistische Kenngröße	Steintyp					
	HLZm (18 St.)	HLZo (24 St.)	alle HLZ (42 St.)	BBH + BBV + BTV (11 St.)	KSL (3 St.)	alle Steine (56 St.)
$\Delta R_{w,max}$ [dB]	4,8	3,0	4,8	2,8	-0,8	4,8
$\Delta R_{w,min}$ [dB]	-3,7	-5,6	-5,6	-1,8	-2,5	-5,6
$\overline{\Delta R_w}$ [dB]	0,8	-0,7	-0,1	0,8	-1,8	0,0
$\sigma$ [dB]	2,4	2,4	2,5	1,7	0,9	2,4
$\overline{\Delta R_w^q}$ [dB]	2,5	2,5	2,5	1,8	2,0	2,3

- $\Delta R_{w,max}$     größter Fehler
- $\Delta R_{w,min}$     kleinster Fehler (= betragsmäßig größter negativer Fehler)
- $\overline{\Delta R_w}$         mittlerer Fehler
- $\sigma$                 Standardabweichung
- $\overline{\Delta R_w^q}$       quadratisch gemittelter Fehler

Der angegebene Fehler bezeichnet die Differenz zwischen dem gemessenen und dem berechneten Wert des bewerteten Schalldämm-Maßes:

$$\Delta R_w = R_{w,mess} - R_{w,rech} \quad \text{mit } R_{w,mess} = \text{Meßwert}$$

$$R_{w,rech} = \text{Rechenwert}$$

**Anhang 6** Übersicht über die Genauigkeit des entwickelten Berechnungsverfahrens (erste Genauigkeitsstufe) mit Unterscheidung der verschiedenen Steintypen. Die für die Steintypen verwendeten Abkürzungen sind in Anhang 1 erläutert. Unter dem Steintyp ist in Klammern die Anzahl der jeweils vorhandenen Wände angegeben. Die Wand TR1 wurde nicht berücksichtigt, da sie die Anwendungsvoraussetzungen des Berechnungsmodells nicht erfüllt.

Steintyp	Mittelwert von $\Delta R_{w,L}$ [dB]
HLZm (18. Steine)	7,4
HLZo (24 Steine)	8,5
alle HLZ (42 Steine)	8,0
BBH + BBV + BTV (11 Steine)	5,2
KSL (3 Steine)	6,0
alle Steine (56 Steine)	7,4

**Anhang 7** Verminderung der Schalldämmung der Wand durch die Lochung der Steine  $\Delta R_{w,L}$  (Mittelwerte für die verschiedenen Steintypen). Die für die Steintypen verwendeten Abkürzungen sind in Anhang 1 erläutert. Hinter dem Steintyp ist in Klammern die Anzahl der jeweils vorhandenen Wände angegeben. Die Wand TR1 wurde nicht berücksichtigt, da sie die Anwendungsvoraussetzungen des Berechnungsmodells nicht erfüllt.

Wand-Nr. (alphabetisch nach Lochbild geordnet)		VE5	VG2	VL9	VL10	
Steine	Typ, Material	HLZ	HLZ	BBV	BBV	
	Abmessungen [mm]	Länge L	248	245	497	247
		Breite B	300	300	300	365
		Höhe H	245	240	238	238
	Lochflächenanteil A [-]		0,48	0,47	0,10	0,08
	Steifigkeitsmaß S [-]		0,42	0,28	0,26	0,37
	Anzahl Lochebenen $N_L$ [-]		17	33	7	8
	durchgehende	Anzahl $N_Q$ [-]	0	0	0	0
	Querstege	mittlere Dicke $d_Q$ [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0
	Lochlänge / Dicke Längsstege $l/d_L$ [-]		8,3	13,0	5,6	3,7
	Steinrohddichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]		0,62	0,62	0,70	0,64
	Wand	Dicke (inkl. Putz) [mm]		335	325	330
Flächen- masse [kg/m <sup>2</sup> ]		gesamte Wand $m''_w$	240	240	268	301
		Innenputz	18	12	12	12
		Außenputz	14	27	36	36
Lagerfugen mit Dünnbettmörtel: J / N		N	N	N	N	
Stoßfugen vermörtelt: J / N		N	N	N	N	
bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB] (Messung)		41	43	47	49	
bewertetes Schalldämm-Maß $R_w$ [dB] (Rechnung)		44,0	40,0	45,4	47,9	
$\Delta R_w$ [dB] (Messung minus Rechnung)		-3,0	3,0	1,6	1,1	

**Anhang 8** Schalltechnisch maßgebliche Daten der für die Schwingungsmessungen an Steinverbänden (Steine VL9 und VL10), die Messung der Ausbreitungsdämpfung an einem Wandstreifen (Stein VE5) und die Untersuchung der Schall-Längsdämmung (Steine VG2, VL9 und VL10 für die Meßaufbauten 1 bis 3) verwendeten Steine. Im unteren Teil der Tabelle sind die gemessene und die mit dem entwickelten Modell (erste Genauigkeitsstufe) berechnete Durchgangsdämmung aufgeführt. Die zugehörigen Lochbilder sind nicht freigegeben.



**Anhang 9** Beschreibung der zur Untersuchung der Schall-Längsdämmung verwendeten Versuchsaufbauten.

**Aufbau 1**

- Längswand:** 300 mm Hochlochziegel,  $\rho = 620 \text{ kg/m}^3$  (Stein VG2 in Anhang 8),  
Abmessungen B x H x T = 11,05 m x 2,95 m x 0,325 m,  
außen 15 mm Kalkzementputz, innen 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 240 \text{ kg/m}^2$ ,  
zwischen Boden und Wand befand sich eine Lage Bitumenpappe.
- Querwand:** 240 mm Verfüllziegel (L x B x H = 370 mm x 240 mm x 253 mm),  
Abmessungen B x H x T = 3,475 m x 2,95 m x 0,26 m,  
beiseitig 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 500 \text{ kg/m}^2$ .
- Stoßstelle:** Stumpfstoß mit Mauerankern in jeder Lagerfuge.

**Aufbau 2**

- Längswand:** 300 mm Bimsbetonvollblock,  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$  (Stein VL9 in Anhang 8),  
Abmessungen B x H x T = 11,05 m x 2,95 m x 0,33 m,  
außen 20 mm Kalkzementputz, innen 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 268 \text{ kg/m}^2$ .
- Querwand:** 240 mm Bimsbetonvollblock,  $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$  (L x B x H = 247 mm x 240 mm x 238 mm),  
Abmessungen B x H x T = 3,47 m x 2,95 m x 0,26 m,  
beiseitig 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 489 \text{ kg/m}^2$ .
- Stoßstelle:** Stumpfstoß mit Mauerankern in jeder Lagerfuge.

**Aufbau 3**

- Längswand:** 365 mm Bimsbetonvollblock,  $\rho = 640 \text{ kg/m}^3$  (Stein VL10 in Anhang 8),  
Abmessungen B x H x T = 11,05 m x 2,95 m x 0,395 m,  
außen 20 mm Kalkzementputz, innen 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 301 \text{ kg/m}^2$ .
- Querwand:** 240 mm Bimsbetonvollblock,  $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$  (L x B x H = 247 mm x 240 mm x 238 mm),  
Abmessungen B x H x T = 3,405 m x 2,95 m x 0,26 m,  
beiseitig 10 mm Gipsputz,  
 $m''_W = 489 \text{ kg/m}^2$ .
- Stoßstelle:** Stumpfstoß mit Mauerankern in jeder Lagerfuge.