

Kann die Schalldämmung einer gemauerten Wand aus dem Schwingungsverhalten eines einzelnen Steins berechnet werden?

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Gösele zum 80. Geburtstag gewidmet

Nachdem in manchen gemauerten Wänden aus Lochsteinen resonanzartige Verschlechterungen der Schalldämmung im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2000 Hz aufgetreten sind, wird versucht, mit Hilfe der Modalanalyse an einem einzelnen Stein die Ursachen dieser schalltechnischen Mängel aufzuklären und das Schalldämm-Maß zu berechnen. Die Randbedingungen für den Stein in der Wand sollen für die Modalanalyse durch einen kleinen Steinverband um den zu untersuchenden Stein simuliert werden, um den Aufbau einer ganzen Wand zu vermeiden. Die modalen Daten werden im Computer-Programm PARAM zur Berechnung von mittleren Körperschallpegeln benutzt, aus denen unter vereinfachenden Annahmen das Schalldämm-Maß abgeleitet wird. Unterhalb der tiefsten Steinresonanz wird eine einfache Näherung von Gösele benutzt; oberhalb 2500 Hz wird mit konstanter Steigung extrapoliert. Erste Ergebnisse mit diesem Verfahren ermutigen zur weiteren Anwendung und Verfeinerung.

Can one calculate the sound transmission loss of a masonry wall on the basis of the vibrational behaviour of an individual masonry block? *In walls constructed from certain hollow masonry blocks occur resonance-like minima of the sound insulation index in the frequency range between 500 Hz and 2000 Hz. By means of modal analysis of an individual block it is attempted to find out the reasons for these acoustic deficiencies and to calculate the sound insulation index. The boundary conditions for the block in the wall are to be simulated by a small arrangement of blocks around the block to be investigated in order to avoid the construction of a whole wall. The modal data are used by the computer program PARAM for calculating average vibrational levels, from which the sound insulation index is deduced with some simplifying assumptions. Below the lowest block resonance a simple approximation by Gösele is used; above 2500 Hz the curve is extrapolated with constant slope. The results obtained by this method encourage further applications and refinements.*

1 Einleitung

Leichte Außenwände aus gelochten Steinen zeichnen sich durch günstige Wärmedämmwerte aus, besitzen aber zum Teil verhältnismäßig schlechte schalltechnische Eigenschaften, insbesondere bei höheren Frequenzen oberhalb 500 Hz. Offensichtlich geht in diesen Fällen die wärmetechnische Optimierung auf Kosten des Schallschutzes. Es stellt sich daher die Frage, wie die akustischen Mängel behoben werden können, ohne dabei die gute Wärmedämmung wesentlich zu verschlechtern.

Nach der Veröffentlichung einiger solcher Beispiele mit ungenügenden Schalldämmwerten durch Lang im Jahre 1986 [1] hat sich seit 1990 eine ganze Reihe von Autoren mit der

Untersuchung des akustischen Verhaltens dieser leichten Außenwände befaßt [2] bis [13]. Durch einfache Körperschallmessungen sowohl von Gösele [2], [3] als auch am Fraunhofer-Institut für Bauphysik [8] bis [10] wurden alsbald die sogenannten „Dickenresonanzen“ als maßgebliche Verursacher der Schalldämmungseinbrüche ausfindig gemacht. Dabei handelt es sich um Schwingungen der Wand, bei denen sich zwei gegenüberliegende Oberflächenpunkte gegenphasig bewegen, während bei den üblichen Biegeschwingungen der Wand eine gleichphasige Bewegung beider Oberflächen vorliegt. In [8] bis [10] wird betont, daß die Dickenresonanz jeweils auf den Stein begrenzt ist (im Bereich der Fugen findet kaum eine Schwingung statt) und somit die Wandfläche nicht gleichmäßig erfaßt. Die Dickenschwingungen homogener Wände, wie sie vor über 60 Jahren von Wintergerst [14] (in [3] zitiert) und auch wieder kürzlich von Ljunggren [15] behandelt wurden, stellen daher keine vollständig zutreffende Beschreibung der entsprechenden Erscheinung in den inhomogenen, räumlich periodisch aufgebauten Wänden dar.

Bei Außenwänden ist die Schallängsleitung in horizontaler wie in vertikaler Richtung von besonderem Interesse. Dies spiegelt sich in den Arbeiten [1] bis [13] wider. Angesichts zunehmender Belästigungen durch Außenlärm kommt jedoch auch der Direktämmung von Außenwänden eine wachsende Bedeutung zu. Die Details der beteiligten Schallübertragungsmechanismen scheinen bei der Längsdämmung noch komplizierter zu sein als bei der Direktämmung. So gibt es durchaus Fälle mit einem kräftigen Einbruch in der Direktämmung, aber ziemlich glattem Verlauf der Längsdämmung [8], [10].

Bei der Entwicklung neuer Steinformen wäre es von großem Vorteil, wenn man die zu erwartenden Schalldämmwerte der verschiedenen wärmetechnisch günstigen Varianten vorhersagen und sich damit die Herstellung von vielen Prototyp-Steinen für eine Prüfand ersparen könnte. Aus diesem Grunde sind inzwischen einige Anstrengungen zur Entwicklung von Methoden zur quantitativen Prognose unternommen worden, die sich allerdings auf die wohl einfachere Direktämmung beschränken; für den schwierigeren Fall der Schallängsleitung gibt es derzeit noch kein Vorhersageverfahren.

Den ersten Versuch einer rechnerischen Ermittlung des Schalldämm-Maßes unternahm Heckl und Lewit [5], einerseits mit der Statistischen Energieanalyse (SEA), andererseits mit einem Modell gekoppelter Biegebalken. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung kann zum Teil als recht gut bezeichnet werden. Allerdings ist es nicht möglich, mit der SEA die Tiefe des Einbruchs zu bestimmen, da die Anzahl der Resonanzen pro Terzband bei der ersten Dickenresonanzfrequenz zu gering ist. Auch die Biegebalkenmethode scheint nicht immer in der Lage zu sein, den Frequenzverlauf des Einbruchs vor allem zu tiefen Frequenzen hin genau zu beschreiben. Bewertete Schalldämm-Maße konnten deshalb nicht angegeben werden.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methode [16], bei der Rechnung und Messung kombiniert werden. Da eine ge-

Dr. rer. nat. Waldemar Maysenhölder, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc. techn. h. c. Dr.-Ing. E. h. Karl A. Ger-tis), Postfach 800469, W-7000 Stuttgart 80.

Waldemar Maysenhölder – Physikstudium an der Universität Stuttgart, Diplom 1978, Promotion 1981. 1981 bis 1986 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische und Angewandte Physik der Universität Stuttgart. Studienaufenthalte in England und USA. Seit 1986 in der Abteilung Bauakustik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

naue Berechnung des Schwingungsverhaltens eines Lochsteins einen erheblichen Aufwand erfordert und die dazu notwendigen Materialdaten oft nur ungenügend bekannt sind, bietet sich als Alternative an, diese Information auf experimentellem Wege, nämlich mit Hilfe der Modalanalyse, zu gewinnen. Erste Modalanalysen eines Lochsteins unter verschiedenen Randbedingungen wurden bereits 1989 [8] am Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführt. Diese Messungen wurden inzwischen fortgesetzt und mit dem eigens entwickelten Computer-Programm PARAM in der Weise ausgewertet, daß eine Abschätzung des Schalldämm-Maßes möglich wird. Dabei stellt sich die Frage, mit der dieser Artikel überschrieben ist: ob nämlich die Schalldämmung einer gemauerten Wand aus dem Schwingungsverhalten eines einzelnen Steins berechnet werden kann. Grundsätzlich läßt sich diese Frage sicherlich bejahen, wenn zusätzlich die Eigenschaften von Mörtel und Putz sowie die Art der Vermauerung berücksichtigt werden; der tatsächlichen Durchführung einer solchen umfassenden Rechnung stellen sich jedoch verschiedene Hindernisse entgegen, die noch nicht überwunden wurden. So kam es bei dem derzeitigen Stand der Forschung darauf an, Rechnung und Messung in der Weise aufeinander abzustimmen, daß mit möglichst geringem Aufwand brauchbare Ergebnisse gewonnen werden können. Eine unter diesem Gesichtspunkt entwickelte Methode wird im folgenden vorgestellt. Erste Erfolge lassen dieses Prognoseverfahren schon für eine akustische Optimierung von Lochsteinen als geeignet erscheinen und ermutigen zur Verfeinerung und Weiterentwicklung.

2 Vorgehensweise

Das Verfahren zur Abschätzung des Schalldämm-Maßes einer gemauerten Wand soll am Beispiel von Kalksand-Hochlochsteinen (Bild 1) erläutert werden. Zwei Varianten dieser Steinart kamen zum Einsatz: beide 373 mm breit und 300 mm dick, die erste Variante 238 mm hoch und 23,5 kg schwer, die zweite 248 mm hoch und 25 kg schwer (mit etwas unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung). Aus jeder Steinsorte wurde eine Prüfwand errichtet mit Kalksand-Dünnbettmörtel in der Lagerfuge und Nut-Feder-Formschluß (also kein Mörtel) in der Stoßfuge. Die „1. Wand“ aus Steinen der Variante 1 war 11 m lang, die „2. Wand“ aus Steinen der Variante 2 war 4,25 m lang. Beide Wände erhielten beidseitig einen 10–12 mm dicken Putz. Oberhalb 1000 Hz weisen beide Wände übereinstimmende Verläufe der Schalldämmkurve (Bild 2) auf. Der starke Einbruch bei 1250 Hz hat zur Folge, daß sich die Unterschiede bei tiefen Frequenzen, die wohl in erster Linie auf die unterschiedlichen Längen der beiden Wände zurückzuführen sind, nicht auf das bewertete Schalldämm-Maß (in beiden Fällen 46 dB) auswirken.

Die flächenbezogene Masse beider Wände betrug ungefähr 325 kg/m^2 . Nach der einfachen Näherung von Gösele [17] sollte das Schalldämm-Maß einer solchen Wand (wenn sie nur homogen wäre!) bei tiefen Frequenzen 40 dB betragen und ab 300 Hz mit 25 dB [18] pro Frequenzdekade ansteigen. Eine gleichschwere homogene Wand besäße demnach ein bewertetes Schalldämm-Maß von 50 dB. Dies entspricht auch dem in DIN 4109, Beiblatt 1, Tabelle 1, angegebenen Wert für eine einschalige, biegesteife Wand derselben flächenbezogenen Masse.

Um zu einer korrekten Abschätzung des Schalldämm-Maßes zu gelangen, werden drei Frequenzbereiche unterschieden, in denen jeweils verschiedene Methoden zur Anwendung kommen: Im unteren Frequenzbereich darf die Wand aus Lochsteinen als homogene (wenn auch anisotrope) Platte angesehen werden, und ihr Schalldämm-Maß ließe sich aus noch zu bestimmenden effektiven Biegesteifen berechnen. Dies kann vorerst noch zurückgestellt werden, da

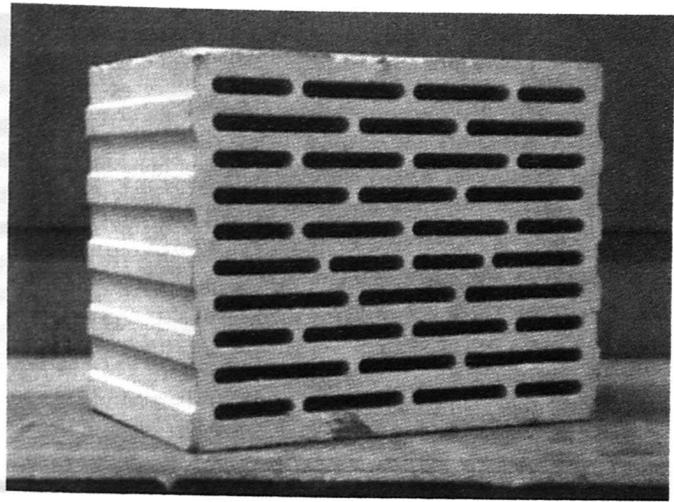


Bild 1. Blick auf die Unterseite eines Kalksand-Hochlochsteins. Die Schlitzlöcher sind nicht durchgehend: die Oberseite des Steins ist wie Vorder- und Rückseite eine geschlossene, glatte Fläche

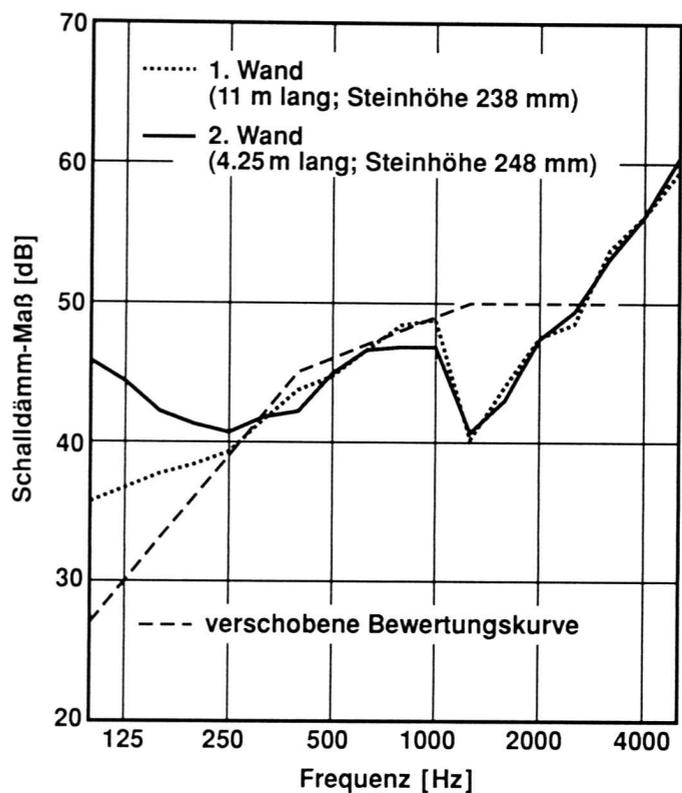


Bild 2. Schalldämm-Maß zweier Wände aus Kalksand-Hochlochsteinen. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w beträgt in beiden Fällen 46 dB

die erwähnte Näherung von Gösele für die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes bei tieferen Frequenzen im vorliegenden Fall genau genug ist.

Im Bereich des Einbruchs bei 1250 Hz beginnt sich die Inhomogenität der Wand (das „Eigenleben“ der Steine) akustisch bemerkbar zu machen. Körperschallmessungen [8] bis [10] haben gezeigt, daß die Wand im Fugenbereich kaum noch schwingt, so daß sich die Wandschwingung gleichsam aus den Schwingungen einzelner Steine zusammensetzen läßt. Das geeignete Werkzeug zur quantitativen Beschreibung des Schwingungsverhaltens eines Steins ist die Modalanalyse. Sind die modalen Daten bekannt, läßt sich die Schwingung des Steins für beliebige anregende Kräfte berechnen („Forced Response Simulation“). Wichtig ist dabei, daß die Modalanalyse am Stein möglichst unter den Randbedingungen durchgeführt wird, die für einen Stein in der fertigen Wand typisch sind. Um

den Aufbau einer ganzen Wand zu vermeiden, wird man versuchen, die angestrebten Randbedingungen in kleineren Versuchsobjekten näherungsweise zu verwirklichen, z. B. durch Einmauern des Steins in einen kleinen Steinverband. Denkbar ist auch eine Messung am elastisch gelagerten Stein mit nachträglicher rechnerischer Simulation der tatsächlichen Randbedingungen. Sind die modalen Daten verfügbar, gilt es die durch das anregende diffuse Schallfeld erzwungenen Schwingungen zu berechnen. Aus der Schnelleverteilung auf der Empfangsseite kann schließlich das Schalldämm-Maß bestimmt werden, wobei hier in einfachster Näherung der Abstrahlgrad gleich eins gesetzt wird.

Mit wachsender Frequenz wird die Modendichte immer größer und die experimentelle Analyse einzelner Moden letztlich undurchführbar, so daß eine statistische Behandlungsweise erforderlich wird. Da eine Theorie der Schalldämmung inhomogener Wände bei hohen Frequenzen jedoch nicht existiert, muß man sich auf andere Weise behelfen. Angesichts des Kurvenverlaufs in Bild 2 ist man geneigt, mit konstanter Steigung zu extrapolieren. Die Steigung betrüge im Fall homogener Wände 3 dB pro Terzband [19]; die Messungen in Bild 2 deuten einen etwas höheren Wert von ungefähr 3,3 dB pro Terz an. Die Rechnungen von Heckl und Lewit [5] im Modell gekoppelter Biegebalken liefern ebenfalls zum Teil eine etwas höhere Steigung als 3 dB pro Terz (ungefähr 3,7 dB pro Terz), während die entsprechenden SEA-Rechnungen wiederum 3 dB pro Terz ergeben. Im folgenden wird der experimentelle Wert 3,3 dB pro Terz benutzt.

3 Modalanalysen

Es wurden vier Modalanalysen an einzelnen Kalksand-Hochlochsteinen durchgeführt [20], [21]: Steinvariante 1 auf einer Schaumstoffunterlage gelagert (Swg = Stein weich gelagert) sowie in einen kleinen, unverputzten Verband aus Kalksand-Vollsteinen eingemauert (VoP = Verband ohne Putz); Steinvariante 2 in der 4,25 m langen Prüfwand („2. Wand“) ohne Putz (WoP = Wand ohne Putz) sowie mit beidseitigem Putz (WmP = Wand mit Putz).

Außerdem wurden zwei Modalanalysen dieser ganzen Wand mit und ohne Putz vorgenommen, um für spätere Untersuchungen im unteren Frequenzbereich detaillierte experimentelle Daten zu besitzen. Das Raster der Meßpunkte auf einer Seite der Wand bzw. eines Steins ist in Bild 3 wiedergegeben. Die Position des Steins in der Wand bei den Messungen WoP und WmP ist ebenfalls ersichtlich. An den mit Nummern markierten Punkten wurden bei Luftschallanregung Körperschallpegel gemessen, um daraus das Schalldämm-Maß zu bestimmen.

Vergleicht man die vier Modalanalysen eines Steins, stellt man fest, daß einige Schwingungsformen bei allen Versuchsanordnungen auftreten. Die Schwingungsformen sind zwar jeweils nicht vollständig identisch, aber doch so ähnlich, daß man von Schwingungstypen sprechen kann, die in Bild 4 schematisch dargestellt sind. In Tabelle 1 sind Frequenzen und Dämpfungen solcher Schwingungen für die vier Fälle aufgelistet. Die größten Frequenzunterschiede bei einem Schwingungstyp stellt man – wie erwartet – beim Übergang vom isolierten Stein (Swg) zum Stein im Steinverband (VoP) fest; die Unterschiede von VoP zu den beiden Messungen des Steins in der Wand sind dagegen meistens viel geringer. Insbesondere fällt auf, daß die niedrigste Resonanz D_0 des Steins in der Wand durch die Messung VoP in ihrer Frequenz schon ziemlich gut wiedergegeben wird; ein Putzauftrag scheint diese Frequenz praktisch nicht zu beeinflussen. (Daß ein Schwingungstyp bei einer Messung mehrmals auftreten kann, hängt damit zusammen, daß die Schwingungen anderer Teile der Anordnung nicht dargestellt worden sind. Bei einer vollständigen Messung und Darstellung würden sich

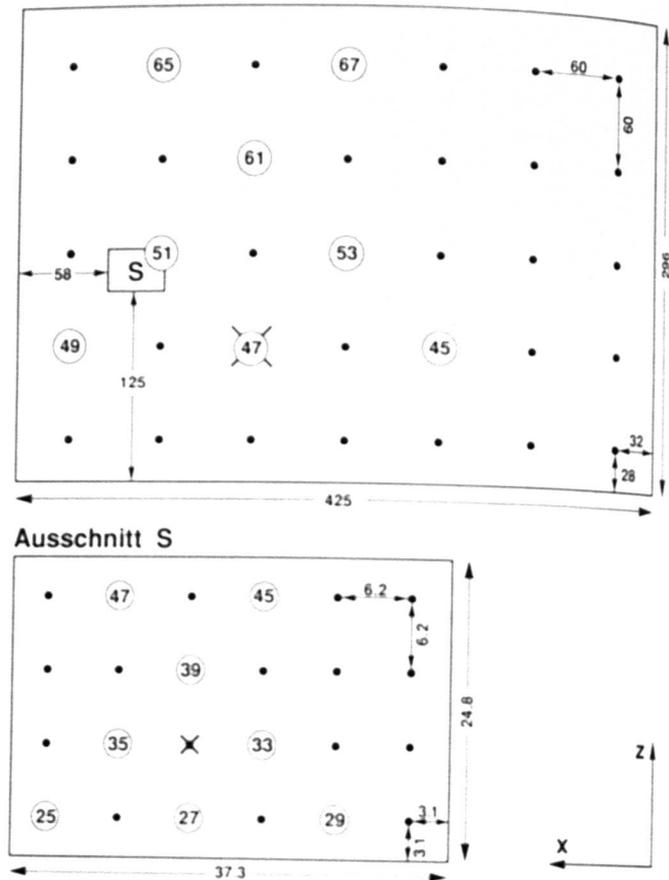


Bild 3. Verteilung der Meßpunkte auf einer Seite der Kalksandsteinwand (2. Wand); in der Ausschnittvergrößerung das feinere Raster auf einem Stein (Maße in cm). Jeweils acht Punkte (eingekreiste Nummern) wurden zur Bestimmung des mittleren Körperschallpegels bei Luftschallanregung herangezogen. Die Referenzpunkte für die Modalanalysen befanden sich auf der anderen Wandseite und sind durch Kreuze angedeutet

alle Schwingungsformen der Anordnung voneinander unterscheiden).

Einen Eindruck vom Einfluß der beiden Putzschichten auf das Schwingungsverhalten des Steins in der Wand kann man sich mit Hilfe von Bild 5 verschaffen. Es zeigt einen mittleren Körperschallpegel, wie er gerne bei der Modalanalyse zur Identifikation der Resonanzspitzen verwendet wird. Der Putz bewirkt fast im gesamten dargestellten Frequenzbereich eine deutliche Reduktion des Körperschallpegels und eine Verschiebung der Spitzen zu höheren Frequenzen hin. Eine Ausnahme bildet die markante Dickenresonanz D_0 bei 1270 Hz, die durch den Putz weder verschoben noch im Pegel wesentlich reduziert wird. Die Dominanz der Dickenresonanzen über die biegeartigen Schwingungen wird durch den Putz ebenfalls kaum verringert.

Aus Bild 5 läßt sich weiterhin ablesen, daß eine genaue Modalanalyse, wie sie für die im nächsten Abschnitt beschriebene Auswertung benötigt wird, oberhalb 2500 Hz recht mühsam und schließlich undurchführbar sein wird. In diesem Bereich wird daher die Schalldämmkurve, wie oben erwähnt, mit konstanter Steigung extrapoliert.

4 Auswertung

Zur Weiterverarbeitung der modalen Daten wurde das Computer-Programm PARAM entwickelt, mit dem verschiedene für die Schalldämmung bedeutsame Parameter berechnet werden können. Es erlaubt unter anderem die Bestimmung von effektiven Moduln, mit denen die Schalldämmung im unteren Frequenzbereich verknüpft ist. Wie unter Ziffer 2

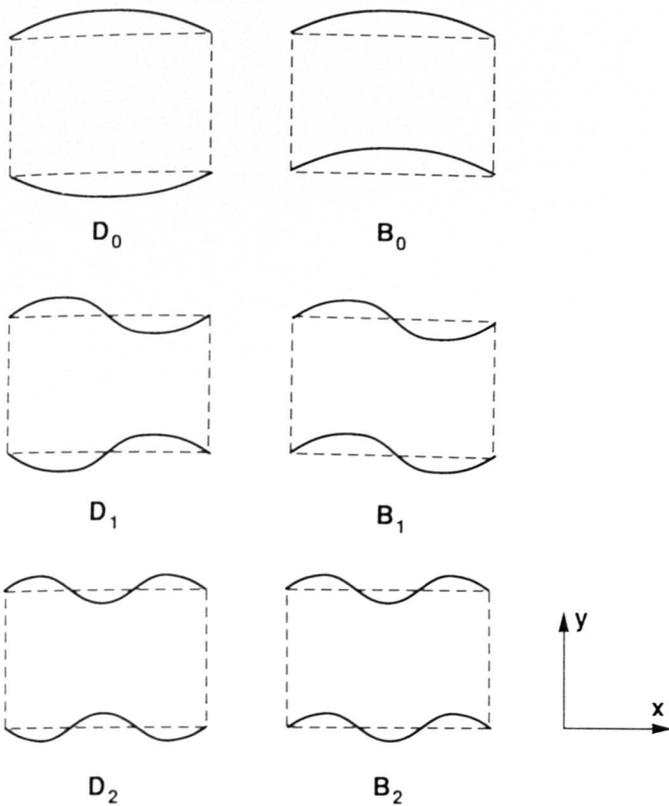


Bild 4. Schematische Darstellung einiger Schwingungsformen eines Steins (horizontaler Schnitt). D: Dickenschwingungen; B: Biegeschwingungen; i: Anzahl vertikaler Knotenlinien auf einer Stirnseite

Tabelle 1. Frequenzen (Hz) und Dämpfungen (%) ausgewählter Eigenschwingungen eines Kalksand-Hochlochsteins (Bild 1) unter verschiedenen Randbedingungen. WmP: in der verputzten Wand; VoP: im Steinverband ohne Putz; Swg: weich gelagert. Die Kennzeichnung der Schwingungstypen bezieht sich auf Bild 4.

Schwingungs- typ	Messung							
	WmP (Hz) (%)		VoP (Hz) (%)		VoP (Hz) (%)		Swg (Hz) (%)	
D ₀	1270	0,8	1270	0,8	1201	1,5	731	1,6
	2054	0,9	2033	0,8				
			2294	0,7				
B ₀	1465	0,4	1392	0,7	1429	0,9	1032	1,0
	1531	0,6	1422	0,7				
	1561	0,2	1443	1,7				
	1605	0,6	1569	2,3				
D ₁	1630	0,7	1598	0,7	1561	0,9	1201	0,7
	1692	1,6	1621	0,2				
	1990	1,1	1958	0,8				
	2016	0,3						
B ₁	1841	0,9	1783	1,8	1659	0,7	1158	0,5
	1865	1,5	1842	1,3				
	1910	0,5						
D ₂	2261	0,9	2166	1,1	2088	0,7	1836	0,4
	2318	0,9	2178	1,0				
			2222	0,6				
B ₂	2477	0,6	2118	0,7			1933	0,4
			2401	0,8				

ausgeführt, wird hier von dieser Möglichkeit kein Gebrauch gemacht. Die wichtigste Funktion von PARAM besteht in der Berechnung des Schwingungsverhaltens eines Steins bei einseitiger Anregung durch eine ebene Luftschallwelle, die unter beliebigem Winkel einfällt.

Die für die Schalldämmung maßgebliche diffuse Luftschallanregung kann durch Überlagerung von einzelnen ebenen Wellen nachgebildet werden. In erster Näherung kann diese Überlagerung durch eine geschickt gewählte einzelne Welle ersetzt werden. Ein Winkel der Einfallsrichtung von 45° sowohl zur Flächennormalen als auch zur Horizontalen hat sich als geeignet erwiesen; jedenfalls lassen sich so mit geringem Aufwand verschiedene modale Datensätze in ihren Auswirkungen auf die Schalldämmung miteinander vergleichen.

Die auf der Gegenseite abgestrahlte Schalleistung soll ebenfalls so einfach wie möglich bestimmt werden, nämlich über den mittleren Schnellepegel der Steinoberfläche und den Abstrahlgrad, der der Einfachheit halber zu eins angenommen wird. Diese Annahme dürfte zumindest nicht unvernünftig sein, da die Wellenlängen der in Bild 4 angedeuteten Schwingungsformen immer größer sind als die Luftschallwellenlängen bei den entsprechenden Resonanzfrequenzen (Tabelle 1).

Zur Berechnung der Schalldämmung bleibt also im wesentlichen noch der mittlere Schnellepegel einer Steinoberfläche zu bestimmen. Der durch die ebene Welle verursachte Schalldruck auf der angeregten Steinseite wird durch Einzelkräfte auf die bei der Modalanalyse benutzten Punkte (Bild 3) ersetzt. Bei der numerischen Rechnung mit PARAM wurde eine Anregungsamplitude von 1 N gewählt. Dies entspricht einem Schallpegel im Senderraum von ungefähr 133 dB.

Bild 6 zeigt die Ergebnisse für den Fall des Steins in der verputzten Wand (WmP). Die Dickenresonanz D₀ bei 1270 Hz scheint die 1250-Hz-Terz ganz alleine zu beherrschen, während die Terzmittelwerte bei den folgenden Terzen

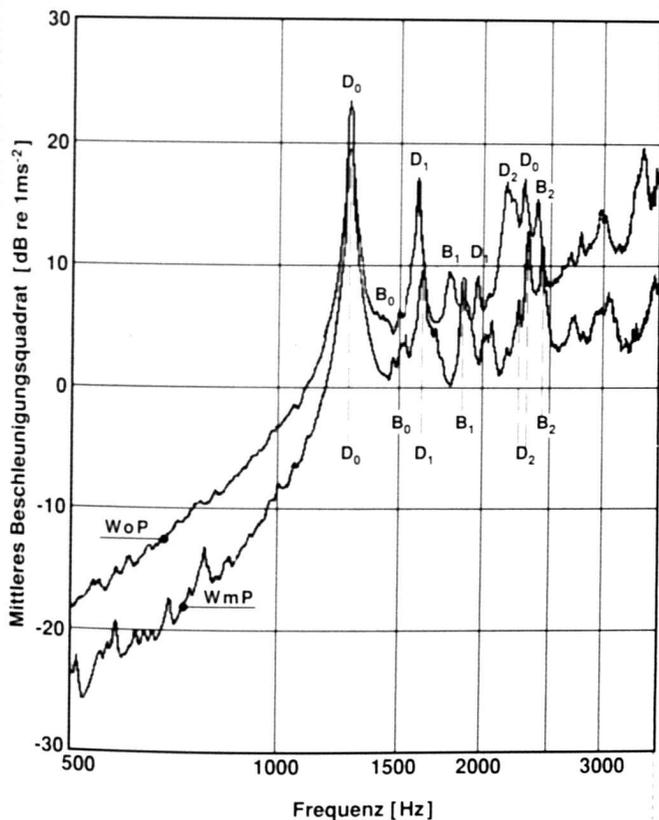


Bild 5. Über Vorder- und Rückseite des in Bild 3 markierten Steins gemittelte Körperschallpegel bei impulsförmiger Anregung des Steins am Referenzpunkt (Messungen WoP und WmP). Die zu verschiedenen Spitzen gehörenden Schwingungsformen sind in Bild 4 angedeutet

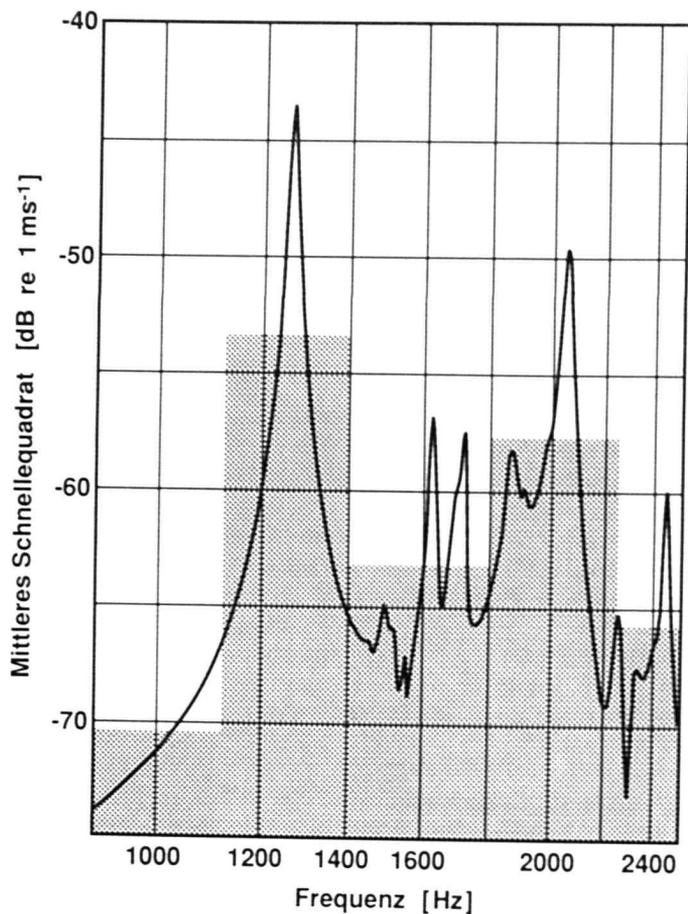


Bild 6. Mittlerer Schnellepegel auf einer Seite des Steins in der verputzten Wand (Modalanalysedaten: WmP) bei Anregung der anderen Seite durch eine ebene Luftschallwelle (Einfallswinkel: 45° zur Seitennormalen, 45° zur Horizontalen); Terzbandmittelwerte sind grau markiert

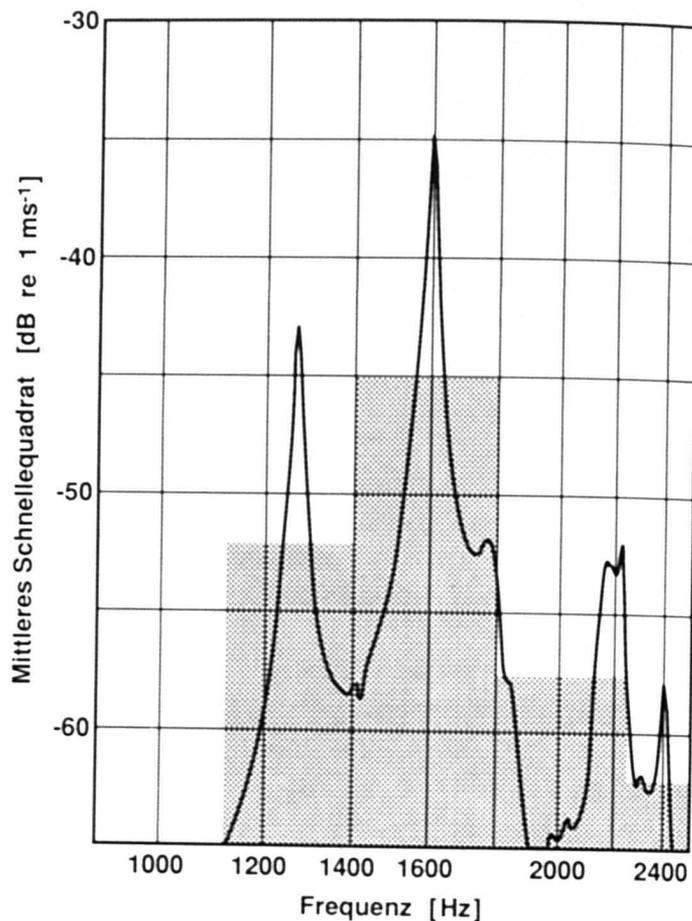


Bild 7. Wie Bild 6, jedoch für den Stein in der noch nicht verputzten Wand (Modalanalysedaten: WoP)

durch mindestens drei Resonanzen bestimmt werden. Verglichen mit Bild 5 ist der Verlauf des Schnellepegels vor der Terzmittelung glatter; die eindeutige Zuordnung einer Spitze zu einer bestimmten Schwingungsform ist jedoch nicht immer ohne zusätzliche Rechnungen möglich.

Betrachtet man den entsprechenden Fall ohne Putz (WoP, Bild 7), fällt sofort die von einer D_1 -Resonanz bestimmte 1600-Hz-Terz auf, während der 1250-Hz-Terzwert demjenigen für den Fall mit Putz ziemlich ähnlich ist. Dies hätte man allein aufgrund von Bild 5 sicherlich nicht erwartet. Der 2000-Hz-Terzwert (WoP) ist wiederum ziemlich ähnlich wie im Fall mit Putz.

Geht man schließlich zum Stein im unverputzten kleinen Verband über (VoP, Bild 8), der wunschgemäß dem vorigen Fall ähnliche Ergebnisse liefern sollte, findet man die Spitze bei 1600 Hz nur mit relativ kleiner Amplitude; der Terzwert bei 1250 Hz liegt allerdings wieder nahe bei den Werten von der ganzen Wand mit oder ohne Putz.

Offensichtlich ist der mittlere Schnellepegel in der 1250-Hz-Terz ziemlich unempfindlich gegenüber Veränderungen der Steinumgebung, sei es durch Putzschichten oder durch andere Nachbarsteine oder durch unterschiedliche Abmessungen der Wand beziehungsweise des Verbands. Für die beiden Terzen bei 1600 Hz und 2000 Hz trifft dies nicht mehr zu. Hier beeinflussen Putz und sonstige Randbedingungen das Resultat stark, und zwar in einer Weise, die nicht ohne weiteres vorhersehbar ist. Dazu ist zu bemerken, daß der Versuchsaufbau des Verbands VoP leider nicht in gewünschtem Maße vergleichbar zum Aufbau der Wand WoP war, zum einen, weil verschiedene Steinvarianten verwendet werden mußten, zum anderen, weil die Kalksand-Vollsteine bei VoP

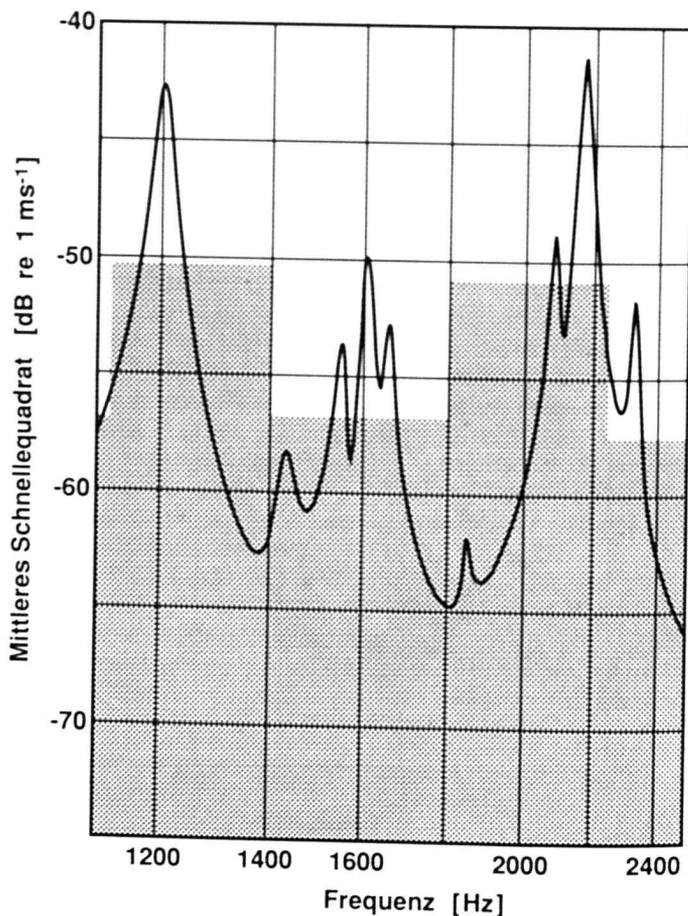


Bild 8. Wie Bild 6, jedoch für einen Stein im Steinverband ohne Putz (Modalanalysedaten: VoP)

dicker waren als der Hochlochstein und auf einer Seite ein wenig überstanden. So ergab sich ein etwas unsymmetrischer Aufbau, der sich in entsprechend unsymmetrischen Schwingungsformen äußerte. Um diesen Mangel auszugleichen, wurde das Schnellequadrat für den Fall VoP sowohl über die nicht angeregte als auch über die angeregte Seite gemittelt.

Aus den Ergebnissen kann daher nicht geschlossen werden, daß ein solcher Steinverband nicht geeignet wäre, um die Situation in einer ganzen Wand für Frequenzen oberhalb von 1250 Hz mit befriedigender Genauigkeit zu simulieren. Die Klärung dieser Frage muß weiteren Untersuchungen an genau kontrollierten Versuchsaufbauten vorbehalten bleiben. Außerdem sollte dann auch geklärt werden, wie genau die Eigenschwingungsformen – bekanntlich der empfindlichste Teil der Modalanalyse – bestimmt werden müssen, um zuverlässige Resultate für den Schnellepegel zu erhalten.

Die Terz bei 2500 Hz wurde durch die Modalanalyse nur etwa zur Hälfte erfaßt; die in Bild 6 bis 8 eingezeichneten Mittelwerte erstrecken sich lediglich bis 2500 Hz. Der in Bild 5 erkennbare Abfall in der oberen Hälfte dieser Terz wurde für die weitere Rechnung dadurch berücksichtigt, daß von den eingezeichneten Schnellepegeln 2 dB abgezogen wurden. Dieses Verfahren liefert den Startpunkt für die Extrapolation des Schalldämm-Maßes zu höheren Frequenzen mit der Steigung 3,3 dB pro Terz.

5 Prognose

Die ursprüngliche Absicht, das Schalldämm-Maß der Wand direkt aus den Messungen VoP am Stein im kleinen Verband abzuschätzen, läßt sich hier nicht verwirklichen, weil der Versuchsaufbau erstens nicht ohne Mängel und zweitens nicht verputzt war. Die Prognose muß daher unter Einbeziehung der Messungen am Stein in der Wand, gleichsam stufenweise, erfolgen.

Die Modalanalyse WmP am Stein in der verputzten Wand wurde durchgeführt, um zu sehen, ob aus dieser Messung, bei der sich der Stein in der „richtigen“ Umgebung befindet, das Schalldämm-Maß mit gewünschter Genauigkeit bestimmt werden kann. Die Frage, welcher Stein dafür als typisch gelten kann, wurde bisher übergangen. Die in Bild 3 ersichtliche Wahl ist plausibel: nicht in der Mitte, nicht ganz am Rand (und in ergonomisch günstiger Höhe). Daß diese Wahl günstig war, wird durch Bild 9 belegt. Es zeigt aus Körperschallpegeln berechnete Schalldämm-Maße, wobei die Wand nicht wie bei der Modalanalyse durch Hammerschläge, sondern wie bei der üblichen Schalldämmungsmessung nach Norm durch Luftschall angeregt wurde. Der Körperschall wurde nach dem gleichen Schema an jeweils acht Punkten auf der Wand und auf dem Stein gemessen (Bild 3); der Abstrahlgrad für die Umrechnung ins Schalldämm-Maß wurde gleich eins gesetzt. Die Ergebnisse vom Stein und von der ganzen Wand stimmen in fast allen Terzbändern außergewöhnlich gut überein und liegen nahe beim direkt gemessenen Ergebnis. Dieser Befund ist sicherlich einer eingehenden Erörterung wert; an dieser Stelle soll es jedoch genügen festzuhalten, daß das Schalldämm-Maß im Bereich zwischen 1000 Hz und 2500 Hz, in dem die Modalanalyse eingesetzt wurde, aus dem mittleren Körperschallpegel des ausgewählten Steins und unter der Annahme eines Abstrahlgrades von eins in guter Näherung bestimmt werden konnte.

Die Modalanalyse WoP am Stein in der noch nicht verputzten Wand dient als Bindeglied zwischen den Messungen VoP und WmP. Im Vergleich zum Steinverband ist die laterale Umgebung des gemessenen Steins verschieden, im Vergleich zur verputzten Wand läßt sich der Einfluß der Putzschichten beurteilen.

Wie unter Ziffer 2 beschrieben, wird nun für die drei Fälle das Schalldämm-Maß abgeschätzt: von 100 Hz bis 1000 Hz

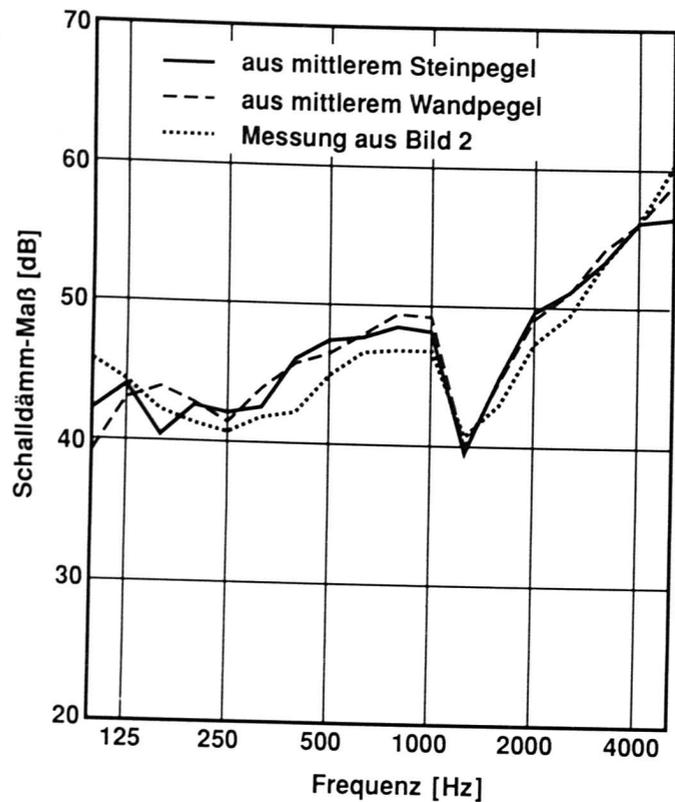


Bild 9. Aus mittleren Körperschallpegeln berechnete Schalldämm-Maße sowie die entsprechende Messung aus Bild 2. Die zur Mittelwertbildung beim einzelnen Stein bzw. bei der ganzen Wand verwendeten Meßpunkte sind in Bild 3 gekennzeichnet; die Anregung erfolgte durch Luftschall. Bei der Rechnung wurde der Abstrahlgrad gleich eins gesetzt. Beide berechneten Kurven führen zu einem bewerteten Schalldämm-Maß R_w von 48 dB

nach Gösele [17] (für alle drei Fälle mit 325 kg/m^2), von 1250 Hz bis 2500 Hz aus den mit PARAM ausgewerteten Modalanalysedaten und oberhalb 2500 Hz durch Extrapolation mit 3,3 dB pro Terz. In Bild 10 sind die Fälle VoP und WoP dargestellt. Bei 1250 Hz findet man eine gute Übereinstimmung, bei 1600 Hz eine Differenz von mehr als 10 dB. Ab 2000 Hz verläuft VoP ungefähr 5 dB tiefer als WoP. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w beträgt jedoch in beiden Fällen 42 dB.

Bild 11 zeigt die Abschätzung des Schalldämm-Maßes für den Fall WmP zusammen mit der gemessenen Kurve. Die Übereinstimmung ist bei den mehrfach auftretenden Differenzen von der Größenordnung 5 dB nicht ganz befriedigend; sie ist jedoch so gut, daß das bewertete Schalldämm-Maß $R_w = 46 \text{ dB}$ exakt vorhergesagt wird.

Abgesehen vom Bereich unterhalb 200 Hz, in dem ohnehin größere Streuungen der Meßwerte zu erwarten sind, scheint die Näherung von Gösele schon bei 800 Hz und 1000 Hz zu hohe Werte zu liefern. Dies weist auf den Einfluß des tieffrequenten Ausläufers der D_0 -Resonanz hin (Bild 5). Eine genauere Abschätzung müßte also sowohl die Plattenschwingungen der ganzen Wand als auch die Steinresonanz D_0 berücksichtigen.

Zur genaueren Wiedergabe der Terzwerte für 1250 Hz bis 2500 Hz muß das hier angewendete Verfahren, das zunächst so einfach wie möglich sein sollte, verfeinert werden. Dabei spielt vermutlich eine sorgfältigere Nachbildung des anregenden diffusen Schallfeldes durch Überlagerung vieler ebener Wellen eine wesentliche Rolle. Weiter wird untersucht werden müssen, welche Anforderungen an die Genauigkeit der Modalanalyse, sowohl bei der Messung als auch bei der Bestimmung der modalen Daten, gestellt werden müssen, um klar

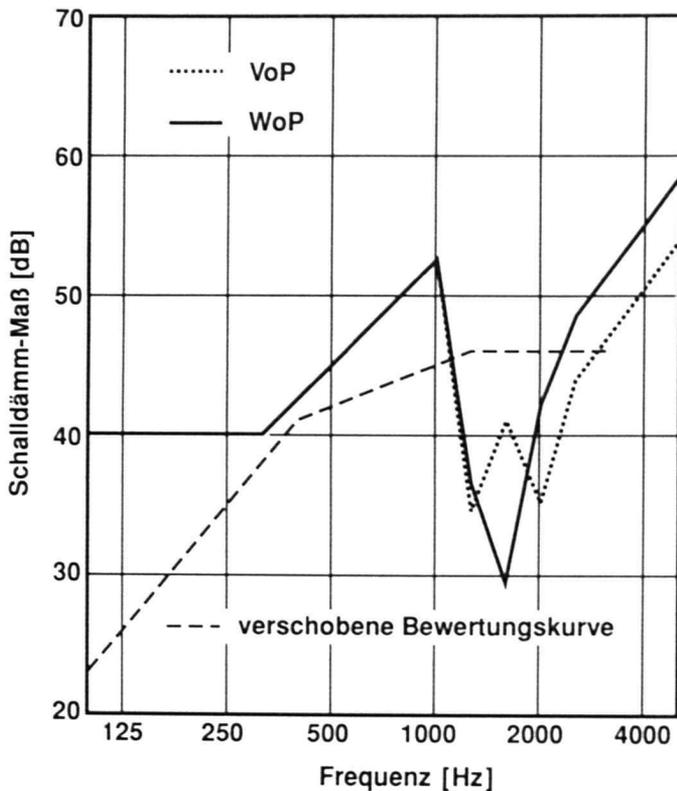


Bild 10. Abschätzung des Schalldämm-Maßes: Von 100 Hz bis 1000 Hz nach Gösele [17]; von 1250 Hz bis 2500 Hz aus den Modalanalysen am einzelnen Stein (VoP: im Steinverband ohne Putz; WoP: in der noch nicht verputzten Wand); oberhalb 2500 Hz Extrapolation mit einem Anstieg von 3,3 dB pro Terz. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w beträgt in beiden Fällen 42 dB

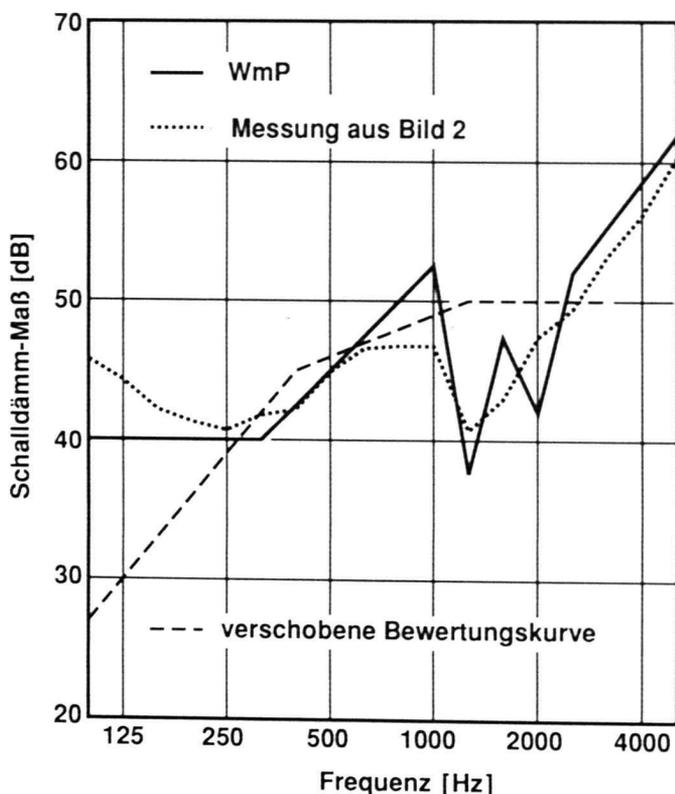


Bild 11. Abschätzung des Schalldämm-Maßes: Wie bei Bild 9, jedoch aus der Modalanalyse WmP am einzelnen Stein in der verputzten Wand. Zum Vergleich die entsprechende Messung aus Bild 2. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w beträgt sowohl für die Messung als auch für die Abschätzung 46 dB

unterscheiden zu können, ob verbleibende Ungenauigkeiten durch das Verfahren an sich oder lediglich durch seine unvollkommene Ausführung bedingt sind. Insbesondere verdienen jene Moden Beachtung, die wie die Grundresonanz D_0 das Schalldämm-Maß stark vermindern. Schließlich muß geprüft werden, inwiefern bei der Anregung durch ein diffuses Luftschallfeld eine indirekte Körperschallanregung durch die Nachbarsteine berücksichtigt werden sollte.

Die Extrapolation der Schalldämmkurve oberhalb 2500 Hz scheint demgegenüber weniger kritisch zu sein; die hier angenommene Steigung von 3,3 dB pro Terz mag durch weitere Messungen bestätigt oder auch für anders geartete Steintypen etwas modifiziert werden.

Offensichtlich bewirkt der Putz bei Wänden aus Lochsteinen mit höherfrequenten resonanzartigen Einbrüchen in der Schalldämmung eine beachtliche Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes. Im vorliegenden Fall belief sie sich auf 4 dB (Differenz zwischen WoP und WmP). In ähnlichen Fällen wurden von Schneider und Lutz [13] ebenfalls Verbesserungen in der Größenordnung von 5 dB beobachtet. Zur Vorhersage aus der Messung VoP am Steinverband ohne Putz muß genau dieser „Putzzuschlag“ von 4 dB addiert werden, um zum gemessenen R_w -Wert von 46 dB zu gelangen. In diesem Sinne, nämlich mit einer separaten Berücksichtigung der Wirkung des Putzes, kann die Prognose des bewerteten Schalldämm-Maßes als erfolgreich angesehen werden.

Nachdem nun die Bedeutung der Putzschichten für eine zuverlässige Prognose im Bereich höherer Frequenzen erkannt wurde, ist es selbstverständlich, daß zukünftige Messungen zu diesem Zweck an Steinverbänden mit Putz (VmP) erfolgen sollten. Die hier beschriebenen Erfahrungen mit einer Vorhersagemethode, die im wesentlichen auf der Modalanalyse eines einzelnen Steins beruht, deuten darauf hin, daß aufgrund einer solchen Messung wenigstens das bewertete Schalldämm-Maß und der Terzwert bei der ersten Dickenresonanz in guter Näherung vorherbestimmt werden können.

6 Schlußfolgerungen

Am Beispiel eines Kalksand-Hochlochsteins wurde gezeigt, daß die Schalldämmung einer aus solchen Steinen gemauerten Wand näherungsweise vorhergesagt werden kann. Im unteren Frequenzbereich bis unterhalb der ersten Steinresonanz ergab die einfache Näherung für homogene Wände nach Gösele [17] bereits eine brauchbare Abschätzung, die jedenfalls für die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes genau genug war.

Im Bereich der für die Modalanalyse zugänglichen Steinresonanzen werden die modalen Daten, die an einem einzelnen Stein in einem geeigneten Versuchsaufbau gewonnen werden, zur Abschätzung herangezogen. Als Versuchsaufbau empfiehlt sich ein beidseitig verputzter kleiner Steinverband mit dem zu untersuchenden Stein in der Mitte. Während bei höheren Frequenzen noch Unsicherheiten in der Größenordnung von 5 dB zu verzeichnen sind, scheint sich das hier vorgestellte Prognoseverfahren in seiner einfachsten Form bezüglich des bewerteten Schalldämm-Maßes und des ersten Resonanzeinbruchs zu bewähren.

Noch werden nicht alle während der Auswertung auftretenden Effekte im einzelnen verstanden. Für eine erhöhte Genauigkeit der Prognose bedarf das Verfahren der Verfeinerung und Durchleuchtung, um präzisere Vorgaben für die Durchführung der einzelnen Schritte zu gewinnen. Außerdem sollte die Anwendbarkeit des Verfahrens durch weitere Beispiele bestätigt werden.

Trotz dieser Vorbehalte in der Beurteilung stellt das Verfahren schon in seiner jetzigen Form ein nützliches Hilfsmittel

tel sowohl bei der Analyse auf dem Markt befindlicher Lochsteine als auch bei der Entwicklung neuer Steinformen dar. Es erübrigt sich, für jede Lochbildvariante eine beträchtliche Anzahl von Prototypsteinen herzustellen, wie sie zum Aufbau einer Wand im Prüfstand benötigt wird. Anhand eines einzigen Exemplars jeder Variante ist mit Hilfe des Prognoseverfahrens eine fundierte Vorauswahl möglich. So können im Verlauf einer Optimierung des Lochbilds bei gleichem Aufwand wesentlich mehr Varianten als bisher geprüft werden. Darüberhinaus bietet das Verfahren Einsicht in die Schallübertragungsmechanismen und liefert somit eine wichtige Voraussetzung für eine gezielte Optimierung.

Erste pauschale Vorschläge zur akustischen Optimierung sind bereits gemacht worden [3] bis [5], [13]: In Richtung der Wandnormalen durchgehende Stege erweisen sich als günstiger als die für die Wärmedämmung bevorzugten versetzten Stege. Die Dicke der Schicht zwischen Wandoberfläche und erstem Lufthohlraum sollte dicker gemacht werden, sei es im Stein selbst oder aber durch besonders dicken Putz. Auch an eine wirksame Dämpfung der Moden sollte gedacht werden. Über quantitative Verbesserungen aufgrund solcher Maßnahmen ist jedoch noch sehr wenig bekannt. Daß sich beispielsweise Frequenz und Dämpfung der tiefsten Steinresonanz (1270 Hz, 0,8%) durch den beidseitigen Auftrag einer 12 mm dicken Putzschicht nicht verändert haben, spricht dafür, sich mit plausiblen Vermutungen zurückzuhalten und sich gründlicherer Methoden zu bedienen. Mit dem vorgestellten Verfahren steht ein solches Werkzeug zur Verfügung, das einerseits vielseitig angewendet, andererseits in verschiedenen Richtungen weiter verfeinert werden kann. Parallel dazu sollten aber auch rein rechnerische Alternativen, wie sie von Heckl und Lewit erstmals in Angriff genommen wurden, weiter vorangetrieben werden, um schließlich die akustisch relevanten Eigenschaften einer Wand allein aus den Geometrie- und Materialdaten bestimmen zu können.

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei gedankt für die Förderung des Projekts [16] „Analyse und Prognose der Schalldämmung von gemauerten Außenwänden unter Berücksichtigung der periodischen Struktur und des Schwingungsverhaltens eines einzelnen Mauersteins“ (Az.: Ge 368/8-1) im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Bauphysik der Außenwände“.

Literatur:

- [1] Lang, J.: Planung und Erfüllung des normgemäßen Schallschutzes im Gebäude. wksb 31 (1986), H. 21, S. 25–32.
- [2] Gösele, K.: Zur Längsleitung über leichte Außenwände. Bauphysik 12 (1990), H. 5, S. 145–150.
- [3] Gösele, K.: Verringerung der Luftschalldämmung von Wänden durch Dickenresonanzen. Bauphysik 12 (1990), H. 6, S. 187–191.
- [4] Gösele, K., und Kurz, R.: Schall-Längsdämmung von leichten, massiven Außenwänden bei übereinanderliegenden Räumen. Bauphysik 14 (1992), H. 2, S. 33–38.
- [5] Heckl, M., und Lewit, M.: Luftschalldämmung von Vielschichtplatten mit zahlreichen Schallbrücken. Fortschritte der Akustik – DAGA '90, Bad Honnef: DPG-GmbH; Wien: IAP-TU; 1990. S. 199–202.
- [6] Schmacher, R.: Zur Längsschalldämmung leichter Außenwände. wksb-Sonderausgabe September 1990, S. 45–58.
- [7] Schumacher, R.: Zur Transmissions- und Längsschalldämmung leichter Außenwände und Fassaden. Veröffentlichungen der Fachhochschule für Technik, Stuttgart, Band 12 (1991), S. 25–57.
- [8] Koch, S., und Maysenhölder, W.: Zur Schalldämmung von Mauerwerk – Einfluß des Steinmaterials und der Steingeometrie. Fortschritte der Akustik – DAGA '90, Bad Honnef: DPG-GmbH; Wien: IAP-TU; 1990, S. 203–206.
- [9] Koch, S., und Maysenhölder, W.: Zur Schalldämmung von Außenwänden aus Lochsteinen. IBP-Mitteilung 18 (1991), Nr. 215.
- [10] Maysenhölder, W.: Erster experimenteller Nachweis eines Sperrbandes für Dickenschwingungen in einer gemauerten Wand. Bericht B-BA 3/1991 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (1991).
- [11] Nicolai, M., Maysenhölder, W., und Koch, S.: Modalanalyse von Mauersteinen. Bericht B-BA 4/1991 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (1991).
- [12] Lott, G. und Lutz, P.: Einfluß der Dickenresonanz leichter Außenwände auf die Schalllängsleitung. Veröffentlichungen der Fachschule für Technik, Stuttgart, Band 12 (1991), S. 87–104.
- [13] Schneider, M., und Lutz, P.: Konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der Schalllängsleitung bei leichten wärmedämmenden Außenwänden. Veröffentlichungen der Fachhochschule für Technik, Stuttgart, Band 16 (1992), S. 78–103.
- [14] Wintergerst, E.: Theorie der Schalldurchlässigkeit von einfachen und zusammengesetzten Wänden. Die Schalltechnik 4 (1931), H. 6, S. 85–91.
- [15] Ljunggren, S.: Airborne sound insulation of thick walls. J. Acoust. Soc. Am. 89 (1991), p. 2338–2345.
- [16] Maysenhölder, W.: Analyse und Prognose der Schalldämmung von gemauerten Außenwänden unter Berücksichtigung der periodischen Struktur und des Schwingungsverhaltens eines einzelnen Mauersteins. Bericht B-BA 14/1992 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (1992).
- [17] Gösele, K.: Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. Acustica 20 (1968), S. 334–342.
- [18] Heckl, M.: Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. Acustica 10 (1960), S. 98–108.
- [19] Cremer, L.: Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akust. Z. 7 (1942), S. 81–104.
- [20] Modal 3.0 (1987). Structural Measurement Systems Inc., San Jose, California.
- [21] The Star-System, Version 3.01 (1991). GenRad/SMS Inc.