

Erhöhung des E-Moduls und damit der Schalldämmung von KS-Mauerwerk durch Optimierung von Zuschlagsstoffen und des Herstellungsprozess

Martin Schneider¹, Berndt Zeitler¹, Martin Schäfers², Wolfgang Eden³, Wiebke Grethe³

¹ Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart E-Mail: martin.schneider@hft-stuttgart.de

² Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.

³ Forschungsvereinigung Kalks-Sand e. V.

Einleitung

Die Schalldämmung von Mauerwerk wird in aller Regel aus der flächenbezogenen Masse des Bauteils berechnet. Allerdings zeigen sich aufgrund des Steinmaterials auch Unterschiede in der Schalldämmung bei gleicher flächenbezogener Masse. So sind in DIN 4109-32 [1] für unterschiedliche Materialien (Kalksandstein, Leichtbeton, Porenbeton) unterschiedliche Massekurven festgelegt.

Hintergrund hierfür ist die Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes von der Biegesteifigkeit des Bauteils, die wiederum auch von der Materialeigenschaft E-Modul beeinflusst wird. In einem von der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V. initiierten Forschungsvorhaben wird versucht durch die Wahl entsprechender Zuschlagsstoffe und deren Korngrößenverteilung sowie Optimierung der Herstellparameter bei gleichbleibender Rohdichte eine möglichst hohen E-Modul des Steinmaterials zu erzielen.

Im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurde im Labor Proben hergestellt, an denen der E-Modul mittels akustischer Prüfung ermittelt wurde. Mit den daraus gewonnene Erkenntnissen wurden dann in einem zweiten Schritt in verschiedenen Kalksandsteinwerken optimierte Steine hergestellt, deren Schalldämm-Maß im Wandprüfstand ermittelt wurde.

Über die Durchführung und die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird berichtet.

Berechnung der Schalldämmung von KS-Mauerwerk

Wohnungstrennwände werden häufig als Mauerwerkswände aus Kalksandstein in einer Dicke von $h = 240$ mm mit einer Rohdichteklasse 2.0 ($\rho = 1900$ kg/m³) erstellt. Aus der flächenbezogenen Masse $m' = \rho h = 475$ kg/m² (mit beidseitig Putz) der Wand ergibt sich nach DIN 4109-32 mit nachfolgender Gleichung (1) ein bewertetes Schalldämm-Maß der Wand von $R_w = 60.5$ dB.

$$R_w = 30,9 \lg(m') - 22,2 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Für eine frequenzabhängige Berechnung der Schalldämmung des Mauerwerks werden neben der flächenbezogenen Masse auch der Elastizitätsmodul E und die Rohdichte als Materialparameter benötigt. Typische Werte für den E-Modul von Kalksandsteinen finden sich z.B. in Craik [2] mit $E = 10 - 18$ GN/m² bzw. können für Mauerwerkswände aus der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_K wie folgt abgeschätzt werden:

$$E = 950 * 10^6 * f_K \quad [N/m^2] \quad (2)$$

Für Wände ergibt sich gegenüber dem Kalksandsteinmaterial dabei aufgrund der Vermörtelung ein deutlich geringerer Wert.

Anstelle des E-Moduls wird häufig die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L als charakteristische Größe angegeben. Mit einem E-Modul von $E = 12 - 14$ GN/m² und einer für Baustoffe typischen Poissionzahl von $\mu = 0.2$ ergibt sich eine Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L nach Gleichung (3) von ca. 2600 m/s.

$$c_L = \left[\frac{E}{\rho(1 - \mu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

Die Grenzfrequenz f_c bei welcher Biegewellenlänge und Luftschallwellenlänge übereinstimmen ergibt sich aus:

$$f_c = \frac{\sqrt{3}c_0^2}{\pi h c_L} = \frac{\sqrt{3}c_0^2 \sqrt{\rho(1 - \mu^2)}}{\pi h \sqrt{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

Mit den oben genannten Parametern ergibt sich bei einer Wanddicke von $h = 240$ mm eine Grenzfrequenz von ca. $f_c = 100$ Hz.

Die frequenzabhängige Berechnung des Schalldämm-Maßes R kann oberhalb der Grenzfrequenz vereinfacht z.B. nach DIN EN ISO 12354-1 [3] mit nachfolgender Formel erfolgen:

$$R = 20 \log \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} + 10 \log \frac{2 f \eta_{tot}}{f_c \pi} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

Dabei ergibt sich neben der Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes R von der flächenbezogenen Masse m' eine Abhängigkeit von der Grenzfrequenz f_c die wiederum entsprechend der Gleichungen (3) und (4) aus den Materialparametern Rohdichte ρ , E-Modul E und der Poissionzahl μ bestimmt werden kann. Bei gleicher Poissionzahl ($\mu = 0.2$) und einem Gesamtverlustfaktor η_{tot} der für übliche Bauteile im Wesentlichen von der Energieableitung des Bauteils in die benachbarten Strukturen und nur bedingt vom internen Verlustfaktor des Materials abhängt, ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Schalldämm-Maß R und den Materialparameter Rohdichte und -Modul:

$$R = 10 \lg \left[f^3 m'^3 \eta_{tot} \sqrt{\frac{E}{\rho^3 (\rho_0 c_0)^2 \sqrt{3} c_0^2}} \right] \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

$$R \approx 30 \lg(fm') + 10 \lg(\eta_{tot}) + 5 \log\left(\frac{E}{\rho^3}\right) - 92 \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

Bei gleicher flächenbezogener Masse ergibt sich oberhalb der Grenzfrequenz f_c entsprechend Gleichung (7) eine Abhängigkeit der Schalldämm-Maßes von einem Materialparameter, der aus dem Verhältnis von E-Modul zur dritten Potenz der Rohdichte berechnet werden kann.

Für viele Baustoffe ist dieser Materialparameter in der gleichen Größenordnung, so dass die Schalldämmung auch ohne Kenntnisse zum Material direkt aus der flächenbezogenen Masse bestimmt werden kann.

Variiert allerdings dieser Parameter für bestimmte Baustoffe so ergeben sich auch Unterschiede wie Sie beispielsweise in den verschiedenen Massekurven in DIN 4109-32 für Kalksandstein-, Porenbeton- und Leichtbetonmauerwerk zu finden sind. Für Kalksandstein streut die Druckfestigkeit und damit auch der E-Modul aufgrund von Unterschieden im Ausgangsmaterial, in der Korngrößenverteilung, der Packungsdichte sowie diverser Herstellparameter [4].

Für Kalksandsteine streut die Druckfestigkeit und damit der E-Modul bei gleicher Rohdichte um einen Faktor 2. Dieser Faktor 2 kann das bewertete Schalldämm-Maß einer gleichschweren Wand um ca. 2 dB verbessern.

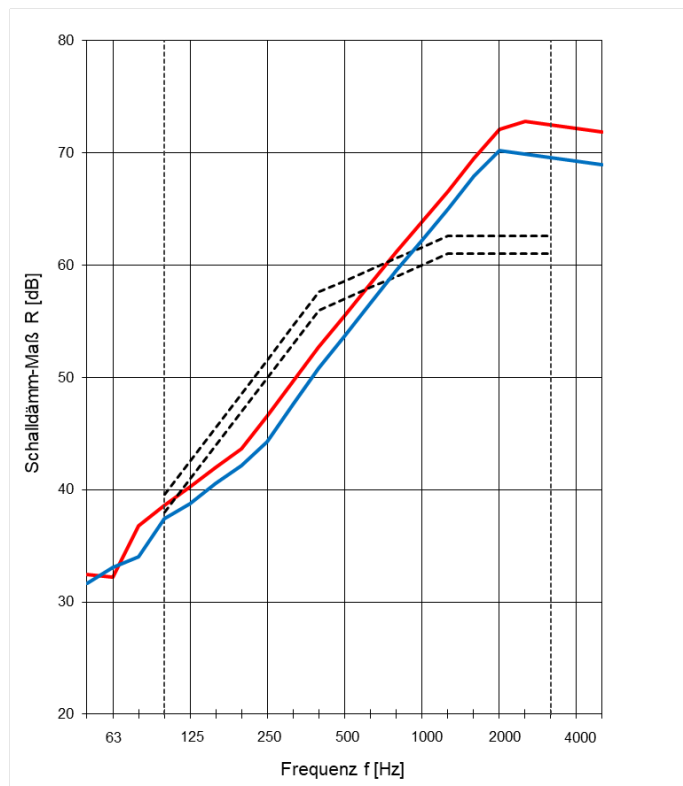


Abbildung 1: Nach DIN EN 12354-1 berechnetes Schalldämm-Maß einer 240 mm starken KS-Wand ($\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$; blau: $c_L = 2500 \text{ m/s}$, rot: $c_L = 3500 \text{ m/s}$)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde nun versucht den E-Modul und damit das Schalldämm-Maß von Mauerwerk aus Kalksandsteinen zu erhöhen.

Messtechnische Ermittlung des E-Moduls

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls E erfolgt indirekt durch die Bestimmung der Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L durch Umstellung von Gleichung (3). Die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L wurde an kompletten Wänden (Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen und Lagerfugen mit Dünnbettmörtel), an stabförmigen Proben und an Einzelsteinen ermittelt. An den stabförmigen Proben erfolgte die Bestimmung der Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L durch Messung von Resonanzfrequenzen bei den anderen Proben aus der Messung der Laufzeit. Die verschiedenen Methoden werden nachfolgend beschrieben

Messungen an Wänden

An KS-Mauerwerkswänden wurde die Longitudinalwellengeschwindigkeit aus der Messung der Laufzeit eines Impulses über einer Strecke von ca. 2 m ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass die Geschwindigkeit in unterschiedliche Ausbreitungsrichtungen (horizontal, vertikal oder diagonal) ermittelt werden kann.

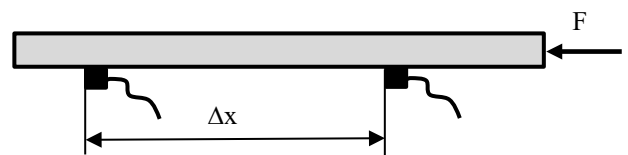


Abbildung 2: Skizze zur Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit an einer Wand mittels zweier Körperschallaufnehmer im Abstand Δx . Die Anregung erfolgt dabei an der Stirnseite der Wand mit einem Kraftimpuls F

Der Kraftimpuls wurde dabei an der Stirnseite der Wand eingeleitet, das Beschleunigungssignal der in Wandrichtung angebrachten Körperschallaufnehmer (siehe nachfolgende Abbildung 2) wird gespeichert.

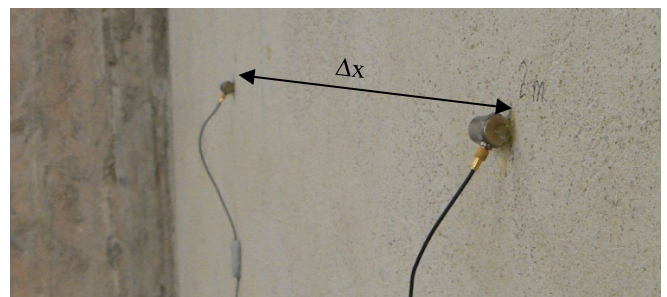


Abbildung 3: Bild zur Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit an einer Wand mittels zweier Körperschallaufnehmer (in Wandrichtung angebracht) im Abstand von 2m. Die Anregung erfolgt dabei an der Stirnseite der Wand mit einem Kraftimpuls F auf den Prüfstandrahmen.

Da sich sowohl Longitudinalwellen als auch BiegeWellen (diese allerdings dispersiv) ausbreiten, kann die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen einfach aus dem zeitlichen versatz des Startes der beiden Signale entsprechend nachfolgender Abbildung 3 ermittelt werden.

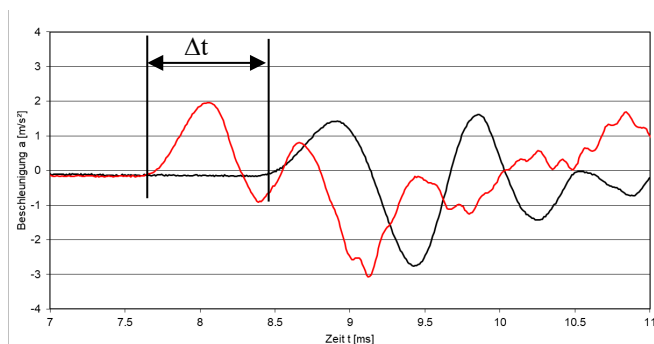


Abbildung 4: Messtechnisch ermittelte Beschleunigungssignale der beiden Körperschallaufnehmer zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz Δt . Hierzu wird der Zeitpunkt an dem der Impuls im Signal zu erkennen ist für beide Körperschallaufnehmer ermittelt.

Aus der Laufzeitdifferenz Δt und dem Abstand der beiden Aufnehmer Δx kann die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L mit nachfolgender Gleichung ermittelt werden.

$$c_L = \Delta x / \Delta t \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

Die Messung an den Wänden hat den Vorteil, dass der Einfluss der Vermörtelung der Lagerfuge in horizontaler Richtung, bzw. der fehlenden Vermörtelung der Stoßfuge in vertikaler Schallausbreitungsrichtung erfasst werden kann. Dabei ergeben sich für die horizontale Ausbreitung aufgrund des fehlenden Mörtels bis zu 50 % geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf der Wand. In vertikaler Richtung entsprechen die auf der Wand gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei einer Vermörtelung mit Dünnbettmörtel in etwa dem Wert der auch am Material bestimmt wurde.

Messungen an stabförmigen Proben

Die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L und damit auch der E-Modul können aus der Resonanzfrequenz f_R von stabförmigen Proben bestimmt werden [5]. Die Stäbe werden dabei mit einem kurzen Kraftimpuls F breitbandig zu Longitudinalschwingungen entsprechend Abbildung 4 angeregt. Die Resonanzen werden aus dem, mit üblicher bauakustischer Messtechnik ermitteltem Spektrum des Beschleunigungssignals auf der der Anregung gegenüberliegenden Stirnseite bestimmt. Aus Resonanzfrequenz, Rohdichte und der Stabgeometrie kann die Wellengeschwindigkeit c_L bzw. der E-Modul bestimmt werden. Die Proben hatte dabei eine Länge von 25 cm – 50 cm, und eine Höhe und Breite von 4 cm – 5 cm.

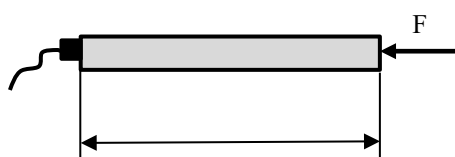


Abbildung 5: Skizze zur Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit an einer Wand mittels zweier Körperschallaufnehmer im Abstand Δx . Die Anregung erfolgt dabei an der Stirnseite der Wand mit einem Kraftimpuls F

Bei der Abbildung 4 dargestellten longitudinalen Anregung ergibt sich die Longitudinalwellengeschwindigkeit c_L aus der n -te Resonanzfrequenz f_n in Abhängigkeit der Länge l des Stabes aus nachfolgender Gleichung:

$$c_L = f_n \frac{2l}{n} \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

Für einen üblichen Kalksandsteinstab mit einer Länge von $l = 0.5 \text{ m}$ liegt die erste Resonanzfrequenz üblicherweise $f_1 = 2500 \text{ Hz}$. Bei entsprechender Anregung können zusätzlich die ersten 3 bis 6 Harmonischen im Spektrum ermittelt werden.

Zur Ermittlung des E-Moduls von Baustoffen werden von Herstellern zur Produktionsüberwachung und zur Qualitätssicherung kommerziell erhältliche Prüfgeräte wie z.B. das Resonanzanalysesystem Typ RA50, Fabr. Lang Sensorik, Stuttgart verwendet.

Messungen an Einzelsteinen

Um das aufwändige Schneiden von Stäben aus Vollsteinen zu umgehen, kann die Longitudinalwellengeschwindigkeit an Einzelsteinen durch das Messen der Laufzeit ermittelt werden. Aufgrund der gegenüber Wänden deutlich geringen Abstände zwischen den Körperschallaufnehmern auf dem Einzelstein und der damit deutlich verkürzten Zeitdifferenz muss die Abtastrate deutlich erhöht werden, so dass die in der Bauakustik üblichen Abtastrate von 44 kHz nicht mehr ausreichend ist.

Mit einem handelsüblichen Oszilloskop lassen sich die Laufzeiten allerdings wiederum genauso einfach wie die bei einer Wand bestimmen.

Ergebnisse der durchgeführten Messungen

E-Moduli der Probekörper

Die aus den Resonanzfrequenzen ermittelten Elastizitätsmoduli E für eine erste Reihe von im Forschungslabor der Forschungsvereinigung Kalksand e.V. und hergestellten Probekörpern sind in nachfolgender Abbildung 6 dargestellt.

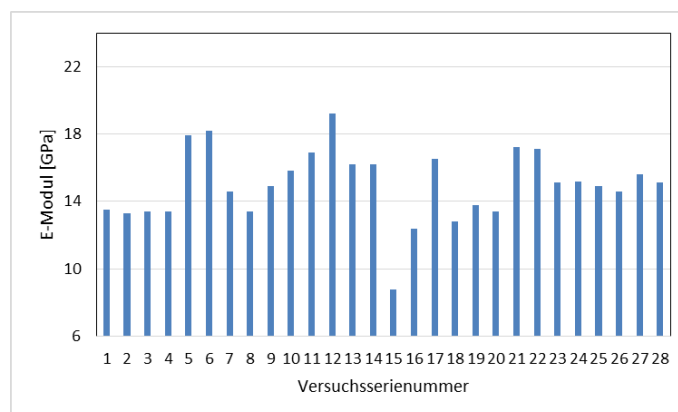


Abbildung 6: Ergebnisse zum E-Modul von Stabproben aus Vorversuchen mit unterschiedlichen Zuschlagsstoffen

Das Gros der Ergebnisse lag sowohl in den Vor- als auch in den Werksversuchen bei ca. 14 GPa, wobei einige der Proben

nahezu 20 GPa erreichten. Die maximal erreichten E-Moduli lagen damit um den Faktor 2 über den Minimalwerten. Damit kann eine signifikante Änderung im Schalldämm-Maß von KS-Wänden durch entsprechende Wahl von Ausgangsstoffen und Herstellparameter erwartet werden. Auf Basis der in den Vorserien ermittelten Herstellparameter die zu einer besonders hohen Steifigkeit führen, wurden dann in Werksversuchen Kalksandsteine in verschiedenen Serien produziert. Mit diesen im Rahmen der Werksversuche hergestellten Steinen wurden dann im Wandprüfstand der HFT Stuttgart Wände aufgemauert.

Messungen im Wandprüfstand

Im Wandprüfstand der HFT Stuttgart wurden im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens bislang 3 Wände aus Kalksandstein-Mauerwerk untersucht. Bei allen Wänden wurden Kalksandsteine mit gleichem Format (248 mm x 249 mm x 249 mm) in der Rohdichteklasse 2.0 verwendet, mit Dünnbettmörtel vermauert und beidseitig mit 10 mm Gipsputz versehen.

In nachfolgender Abbildung 7 sind die Frequenzverläufe der Schalldämm-Maße der KS-Wände mit ausgewählten veränderten Herstellparametern denen einer Wand aus handelsüblichen KS-Mauerstein (Null-Serie) gegenübergestellt.

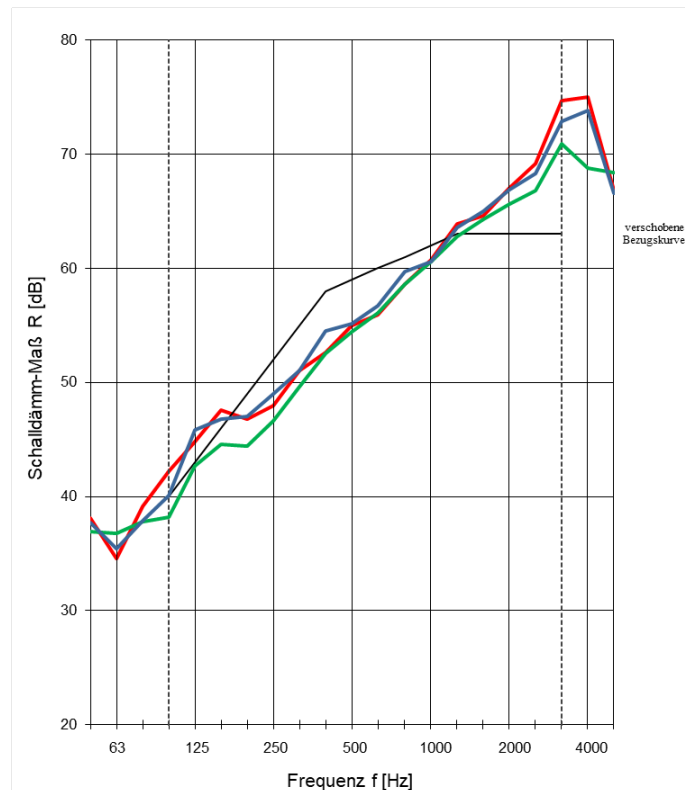


Abbildung 7: Schalldämm-Maß von 240 mm KS-Wänden im Wandprüfstand mit unterschiedlichen Herstellparametern: blau: Null-Serie (Standard); rot: Serie 1 und grün: Serie 2 mit verbesserten Herstellparametern

Bislang konnte bei den untersuchten Wänden noch keine Verbesserung in dem Schalldämm-Maß festgestellt werden. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messgenauigkeit, wobei bei der Serie 2 durch den beauftragten Handwerker beim Einbau der Wand bei der Serie 2 die Vermörtelung der

Lagerfugen nicht vollständig ausgeführt wurde und deshalb keine Verbesserung erzielt werden konnte. Weitere Messungen hierzu sind geplant um schalltechnisch verbesserte Kalksandsteinwände herzustellen.

Zusammenfassung

Die Schalldämmung von Mauerwerk ist nicht nur von der flächenbezogenen Masse sondern auch von der Materialsteifigkeit bzw. dem E-Modul des verwendeten Mauersteins abhängig. In dem noch laufenden Forschungsvorhaben zur Erhöhung der Schalldämmung von KS-Mauerwerk durch geeignete Wahl der Ausgangsmaterialien und Herstellparameter wurde der E-Modul an in Kleinversuchen produzierten Stabproben untersucht. Die gewonnen Erkenntnisse zur Erhöhung des E-Moduls wurden in Werksversuchen umgesetzt und der E-Modul der produzierten Steine wurde ermittelt. Die erhoffte Steigerung des E-Moduls um den Faktor 2 konnte in den Werksversuchen bislang nicht erreicht werden. 2 Wände mit erfolgversprechenden E-Moduli der Steine wurden bisher zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes im Prüfstand aufgemauert. Bei der Wand 1 konnte keine signifikante Verbesserung des Schalldämm-Maßes festgestellt werden. Bei Wand 2 ergab sich vermutlich durch einen mangelhaften Auftrag des verwendeten Dünnbettmörtels in der Lagerfuge ebenfalls keine Verbesserung. Weitere Messungen im Wandprüfstand mit verbesserten Steinen sind jedoch noch geplant.

Literatur

- [1] DIN 4109-32: Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau, 2016
- [2] Craik, R.J.M.: Sound transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis. Gower Publishing Ltd, Hampshire, Vermont, 1996
- [3] DIN EN ISO 12354-1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, 2017
- [4] EDEN, W.; MEYER, G.; MÖRTEL, H.; SCHUBERT: Einflussgrößen des Verformungsverhaltens von Kalksandsteinen, Forschungsbericht Nr. 96, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2002, AiF-Nr. 10759-N und AiF-Nr. 12170-N
- [5] DIN EN 14146: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls (durch Messung der Resonanzfrequenz der Grundschiwingung), 2004