

Mit Feuchtigkeit gegen die Schalltransmission

Marcus Hermes

Einschalige Bauteile finden sich häufig in Gebäuden aller Nutzungsarten. Gegenüber mehrschaligen Konstruktionen weisen sie einen einfacheren Aufbau mit weniger Materialschichten auf. Dadurch erscheinen sie häufig kosteneffizient und Baustoffressourcen-optimiert. Zahlreiche Einflussgrößen prägen die akustischen Eigenschaften einschaliger, plattenförmiger und trockener Bauteile. Hierzu gehören die Masse, die Biegesteifigkeit, die Lage der Koinzidenzgrenzfrequenz und der Gesamtverlustfaktor genauso wie die anregende Frequenz des Luftschalls, der Schalleinfallswinkel oder die Kennimpedanz der Luft. Jeder mineralische Wandbildner besitzt eine eigene produktspezifische Porenstruktur. Gerade in diesen Baustoffporen erfolgt eine hygrothermisch bedingte, stetige Anpassung des Feuchtegehalts. Das eingelagerte Porenwasser verändert die Masse des Bauteils und damit die Luftschalldämmung. Neben diesem bekannten Masseeffekt erhöht ein weiterer Mechanismus die Luftschalldämmung: Je kleiner die Porengrößen, desto größer sind die mechanischen Wirkkräfte, die durch eingelagertes Porenwasser entstehen. Die bestehenden Gleichungen berücksichtigen dies nicht. Beim neuen Rechenansatz wird der Wandbaustoff als poröses Medium mit festen und flüssigen Anteilen betrachtet. Er ermöglicht die Berechnung des Luftschalldämm-Maßes für einschalige Trennwände unter hygrischer Belastung für gesättigte und teilgesättigte Feuchtezustände mit hoher Genauigkeit. Die Berechnungsergebnisse liefern wertvolle Informationen für die Planung und die Produktentwicklung von neuen Baustoffen.

Einführung

Der gesunde Mensch hört mit seinen Ohren vierundzwanzig Stunden täglich. Das Hören selbst findet nahezu ohne Zeitverzögerung statt. Dem einmal Gehörten kann der menschliche Körper nicht mehr entfliehen. Gleichzeitig sieht er sich einem zunehmend (hör-)reizüberfluteten beruflichen und privaten Umfeld ausgesetzt. Als Gegenreaktion wächst unweigerlich das Bedürfnis regelmäßig „abzuschalten“, denn Wohlbefinden und Gesundheit sind ohne Ruhepausen stark gefährdet. Doch das gelingt insbesondere in einer dicht besiedelten urbanen Umwelt immer weniger. Dadurch steigen nicht zuletzt auch die sozialen Spannungen, was sich in der wachsen-

With moisture against sound transmission

Single-leaf partitions are recommended in buildings of all types of use, not least for reasons of cost efficiency and possible resource optimisation. Numerous factors influence the acoustic properties of single-leaf, plate-shaped and dry partitions. These include the mass, the bending stiffness, the position of the critical frequency and the total loss factor as well as the stimulating frequency of the airborne sound, the sound incidence angle or the characteristic impedance of the air. Each mineral wall-building material has its own product-specific pore structure. It is precisely in these building material pores that a hygrothermal, continuous adjustment of the moisture content takes place. The stored pore water changes the mass of the building component and thus the airborne sound insulation. In addition to this well-known mass effect, a further mechanism increases the airborne sound insulation: the smaller the pore sizes, the greater the mechanical forces caused by stored pore water. The existing equations do not take this into account. In the new calculation approach, the wall building material is considered as a porous medium with solid and fluid components. It allows the calculation of the airborne sound reduction index for single-leaf partitions under hygric load for saturated and partially saturated moisture conditions. The calculation results provide valuable information for the product development of new building materials.

den Zahl von Fällen widerspiegelt, in denen sich Gerichte mit Lärmfragen auseinandersetzen. Es scheint, als entwickle sich „Ruhe“ unaufhaltsam zu einem Luxusgut. Folglich werden Wohn- und Arbeitsräume, aber auch mobile Räume in Verkehrsmitteln, zunehmend als Rückzugsraum verstanden. Der dort erhoffte „Ruhe-Insel“-Effekt greift allerdings nur, wenn die den Raum umgebenden Trennbauteile geeignet hohe Schalldämmwerte aufweisen. Diese wiederum stehen in Abhängigkeit zu anderen bauphysikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel den thermischen oder den hygrischen.

Der vorliegende Aufsatz vertieft folgende altbekannte Frage: „Wie beeinflusst der Feuchtegehalt eines

Bauteils aus einem mineralischen Baustoff tendenziell dessen Schalldämmung?“ Die ebenso bekannte Antwort lautet: „Ein zunehmender Feuchtegehalt führt zu einer Zunahme der Bauteilmasse. Dadurch erhöht sich auch die Schalldämmung des betreffenden Bauteils.“ Und tatsächlich: Systematische Untersuchungen an einschaligen Wänden im Labor bestätigen eine Zunahme der Luftschalldämmung im nassen Baustoffzustand. So erzielt zum Beispiel der für die Wärmedämmung optimierte Baustoff Porenbeton nahezu eine Verdopplung seiner Trockenmasse, wenn der überwiegende Anteil der vorhandenen Luftporen nach freier Sättigung wassergefüllt ist. Bei der Verdopplung der Masse eines einschaligen plattenförmigen Bauteils steigert sich dessen Luftschalldämmung um sechs Dezibel. Berger hat diese bereits von Lord Rayleigh gefundene Masseabhängigkeit vor genau 110 Jahren messtechnisch überprüft und 1911 veröffentlicht. Aktuelle Laborergebnisse zur Luftschalldämmung feuchtebelasteter Bauteile bestätigen das bekannte Bergersche Massegesetz bei einschaligen Wänden aus Porenbeton. Sollte dieses Gesetz auch auf feuchte Wände aus anderen Wandbaustoffen zu übertragen sein? Zum Beispiel auf eine einschalige Trennwand aus Kalksandstein? Da dieser Werkstoff traditionell für statische und schallschutztechnische Aufgaben konzipiert und nicht für die Wärmedämmung optimiert ist, besitzt er deutlich kleinere Porenräume und daher eine höhere Rohdichte. Dies zeigt sich im gegenüber Porenbeton deutlich reduzierten Wasseraufnahmevermögen. Der wasserbedingte Massezuwachs nach freier Wassersättigung beträgt bei Kalksandstein gerade einmal um die 15 Prozent. Nach Berger erfährt eine entsprechend nasse Kalksandsteinwand einen massebedingten Zuwachs der Luftschalldämmung von etwas mehr als einem Dezibel. Entsprechende Laborergebnisse sollten diese geringe Verbesserung der Luftschalldämmung an einer einschaligen Kalksandsteinwand auch bestätigen.

Aber genau das tun sie nicht! Vielmehr steigert sich die Luftschalldämmung bei der untersuchten Kalksandsteinwand nach Abschluss der freien Wassersättigung ebenfalls um bis zu sechs Dezibel je nach Frequenz. Über den geringen Massezuwachs ist die Erhöhung der Schalldämmwerte nicht mehr zu erklären! Offensichtlich übernehmen beim nassen Kalksandstein zusätzliche Mechanismen bei der Beeinflussung der Luftschalldämmung eine tragende Rolle. Es geht somit um die grundlegende Frage, welcher andere Effekt überwiegend dafür verantwortlich ist, dass trotz geringem Massezuwachs durch Wassersättigung kleiner Porenräume Luftschalldämmwerte erreicht werden, die in ihrer Höhe nicht durch das Bergersche Massegesetz erfasst werden.

Im vorliegenden Aufsatz wird ein solcher zusätzlicher Effekt und die Feuchteabhängigkeit der Luftschalldämmung nasser Trennwände in einer Gleichung mathematisch formuliert. Es werden die Effekte und Parameter genannt, die die Luftschalldämmung von nassen einschaligen Wänden im Wesentlichen beeinflussen und in welchem Maße sie diese verändern. Hierzu werden zunächst einige Grundlagen zur Luftschalldämmung einschaliger plattenförmiger Trennbauteile ebenso gesichtet, wie einige Eckdaten der Porenstruktur der verwendeten Baustoffe. Gerade die Porenstruktur mit ihren verschiedenen Porengrößenanteilen und Porenformen beeinflussen die Einlagerung von Wasser in der Baustoffmatrix wesentlich. Nach den Grundlagen der porösen Medien erfolgt die Betrachtung des zunächst wassergesättigten Baustoffs in zwei Komponenten: in einen Feststoff- und einen Fluid-Anteil. Beide Bestandteile sind durch mechanische Kopplungseffekte eng miteinander verbunden. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung einer um die hygrischen Effekte erweiterten Biegewellengleichung liefert einen Ansatz aus der Literatur, der ursprünglich die tieffrequente Schwingungsanregung einer im Erdreich liegenden Bodenplatte beschreibt. Ein dortiges Gleichungssystem, bestehend aus zwei Bewegungsgleichungen, bildet den Schlüssel für die Herleitung einer auch für hygrische Belange geeigneten Biegewellengleichung. Daraus entwickelt sich eine neue Gleichung zur Bestimmung des Luftschalldämmmaßes einschaliger, feuchter Trennbauteile. Dabei erfährt eine bekannte, typische Formelbeziehung für einschalige Trennbauteile eine Erweiterung in Form eines neuen hygrischen Einflusstems, in dem sich alle relevanten feuchtetechnischen und mechanischen Einflüsse bündeln. Dabei berücksichtigt die neue „Porenfluidzahl“ sowohl Effekte aus dem Feststoffgerüst, wie auch aus dem Wasser im Porenraum. Mit Hilfe des gewonnenen neuen Rechenansatzes für hygrisch belastete Trennbauteile werden die theoretisch erzielbaren Luftschalldämm-Maße ermittelt.

Zur Gewinnung von Messwerten werden zuvor akustische und hygrische Messungen und solche zur Ermittlung der Porengrößenverteilung und Porenform durchgeführt. Dabei bilden transportable, knapp zwei Quadratmeter große einschalige Mauerwerksverbände aus mineralischen Baustoffen den Kern der messtechnischen Untersuchungen. Beginnend vom wassergesättigten Baustoffzustand erfolgt eine schrittweise Trocknung der Trennbauteile, die gravimetrisch ermittelt wird. Bei jeder Feuchtegehaltstufe erfolgt nacheinander die Messung der Luftschalldämmung, der Körperschallnachhallzeit und der Impuls-Laufzeit. Zur Absicherung der gewonnenen Verlustfaktorwerte finden ergänzend Untersuchungen an Baustoffstäben aus der jeweils gleichen Produktions-

charge mittels des Resonanzverfahrens statt. Dabei stehen die Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton im Mittelpunkt. Untersuchungen an diesen beiden Materialien mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops, der Computertomografie und dem Heliumpyknometer eröffnen wesentliche Einblicke in die jeweilige Porenstruktur. Alle gewonnenen Messergebnisse bilden die Grundlage für den abschließenden Vergleich mit den ermittelten Rechenergebnissen. Obwohl dauerhaft nasse Wände nach heutigem Wissensstand thermisch und hygrisch nicht erwünscht sind, lohnt sich dennoch die Analyse, um die Mechanismen kennenzulernen und quasi „vom Wasser zu lernen“.

Grundlagen

Im Mittelpunkt aller Überlegungen im Rahmen des vorliegenden Aufsatzes steht eine einschalige gemauerte Trennwand, die zwei Räume voneinander trennt. Im ersten Raum wird Luftschall erzeugt, der ebenfalls auf diese Wand trifft. Dadurch wird die Trennwand zu Biegeschwingungen angeregt. Je nachdem wie gut die Wand die Schallenergie dämmt, zeigen sich die Biegeschwingungen auf der rückseitigen Wandoberfläche im zweiten Raum mehr oder weniger stark ausgeprägt. Die senkrecht auf der Wandoberfläche stehenden Schwingungskomponenten sorgen für eine Anregung des an der Trennwand anliegenden Luftpolsters. Dies führt im zweiten Raum zu mehr oder weniger stark hörbarem Schall aus dem Nachbarraum. Umgangssprachlich wird so „Schall durch die Wand hindurch gelassen“.

Schalldämmkurven

Der typische Verlauf von Schalldämmkurven einschaliger plattenförmiger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt sich in der durchgezogenen Linie in Abbildung 1. Dieser lässt sich in drei Frequenzbereiche A, B und C unterteilen [1–2]:

- A: Im unteren Frequenzabschnitt folgt der Kurvenverlauf dem Bergerschen Massegesetz nach Gleichung (1) mit einem Anstieg von 6 dB pro Oktave.
 B: Im Koinzidenzfrequenzbereich erfährt die Schalldämmung einen Einbruch, die in der Koinzidenzfrequenz sein Minimum findet (rechter Rand des Bereichs B in Abb. 1).
 C: Oberhalb der Koinzidenzfrequenz steigt die Schalldämmkurve nach Gleichung (2) mit 7,5 dB pro Oktave wieder deutlich an. In diesem Frequenzbereich hängen die schalldämmenden Eigenschaften zusätzlich vom Verlustfaktor ab.

Die gestrichelte Linie in den beiden Frequenzbereichen B und C in Abbildung 1 gibt vergleichend den theoretischen Schalldämmkurvenverlauf an, wenn das Bergersche Massegesetz auch hier gelten würde.

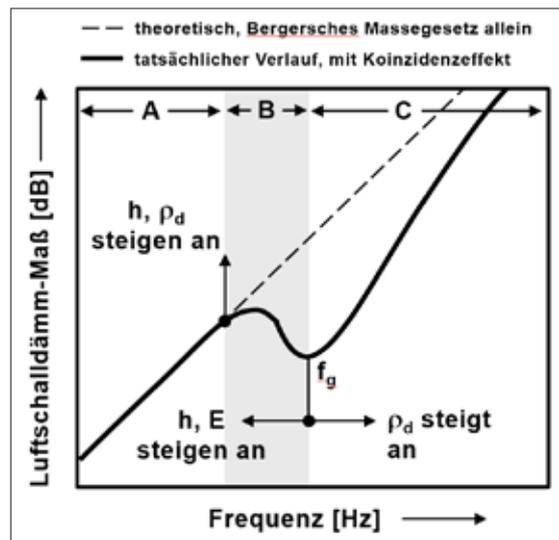


Abb. 1: Prinzipieller Verlauf des Luftschalldämmmaßes von einschaligen homogenen Trennbauteilen in Abhängigkeit von der Frequenz. Darstellung in Anlehnung an [1; 2]

- A, B, C Frequenzbereiche unterhalb, in der Nähe, oberhalb von f_g
 E Elastizitätsmodul [N/m^2]
 h Trennbauteildicke [m]
 f_g Koinzidenzgrenzfrequenz [Hz]
 ρ_d Rohdichte der trockenen Wand [kg/m^3]

Die Höhe des Schalldämm-Maß-Niveaus wird nach Abbildung 1 maßgebend von den Einflussfaktoren Plattendicke h und Rohdichte ρ und damit der flächenbezogenen Masse des einschaligen Trennbauteils bestimmt. Bei gleichbleibender Dicke wächst die Koinzidenzgrenzfrequenz bei zunehmender Baustoffrohichte. Ein ansteigendes Elastizitätsmodul wirkt diesem Effekt entgegen.

Luftschalldämmung unterhalb der Grenzfrequenz

Für die Höhe der Luftschalldämmung R im Bereich A (siehe Abb. 1) gilt das bekannte Bergersche Massegesetz [3, 4]:

$$R = 20 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2 Z_L} \right) - 3 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

R = Luft-Schalldämmmaß [dB]

Z_L = Wellenwiderstand der Luft mit $Z_L = \rho_L c_L$ [Ns/m^3]

\lg = dekadischer Logarithmus

m'' = flächenbezogene Masse [kg/m^2]

ω = Kreisfrequenz [$1/\text{s}$]

Es besagt, dass der Anstieg der Luftschalldämmung bei einer Verdopplung der Masse 6 dB beträgt. Auch bei einer Verdopplung der das Einfachbauteil anregenden Frequenz, und damit bei jedem Oktavsprung, wird im Bereich unterhalb der Grenzfrequenz eine Erhöhung der Luftschalldämmung um 6 dB erzielt.

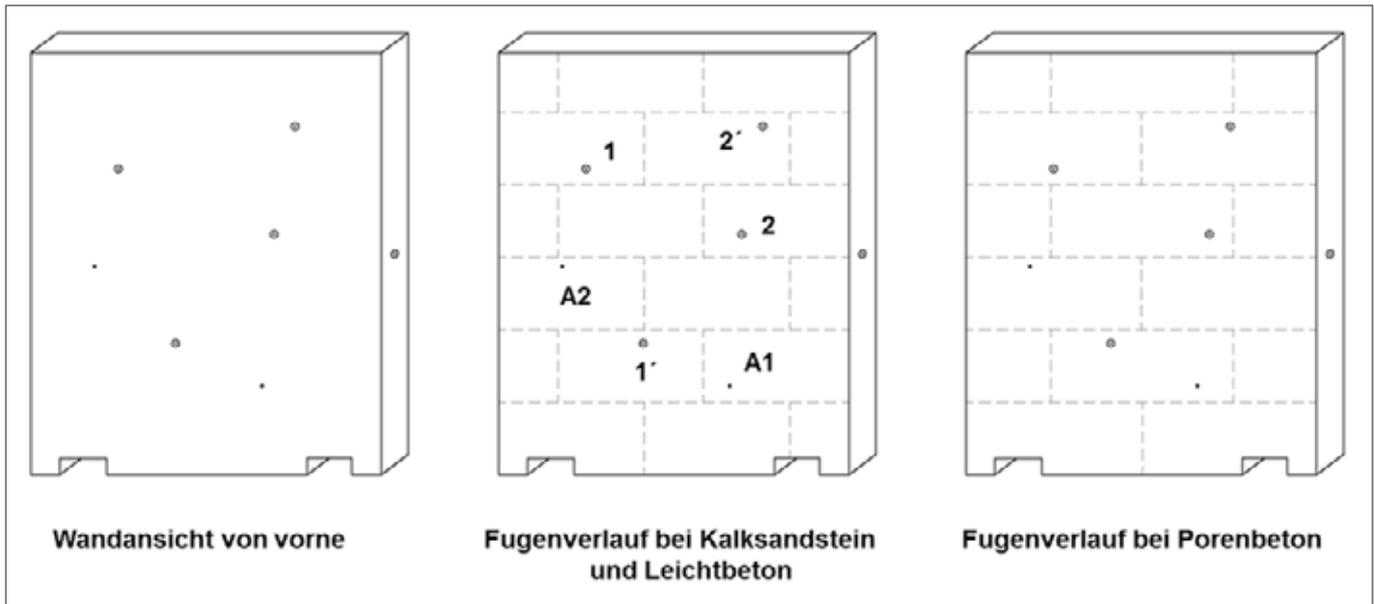


Abb. 2: Transportable Prüfwände mit Transportaussparungen an der Unterseite, maßstabsgetreue Darstellung der 120 cm breiten, 145 cm hohen und 11,5 cm dicken Prüfwände [2].

Luftschalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz

Für den Bereich C (siehe Abb. 1) oberhalb der Grenzfrequenz gilt die folgende Beziehung für das Luftschalldämm-Maß R [5–7]

$$R = 10 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2Z_L} \right)^2 + 5 \lg \left(\frac{f}{f_g} \right) + 10 \lg(2\eta) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

f = Frequenz der das Trennbauteil anregenden

Schallwelle [Hz]

η = Verlustfaktor [-]

Diese häufig kurz auch als „Heckl-Gleichung“ bezeichnete Gleichung (2) besagt, dass der Anstieg der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen bei Frequenzen oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz neben der flächenbezogenen Masse, wie in Gleichung (1) und (2) eingeführt, nun auch vom

Verlustfaktor η abhängt. Der Anstieg oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz erfolgt dabei mit 7,5 Dezibel pro Oktave steiler als unterhalb davon.

Poroelastische Platten

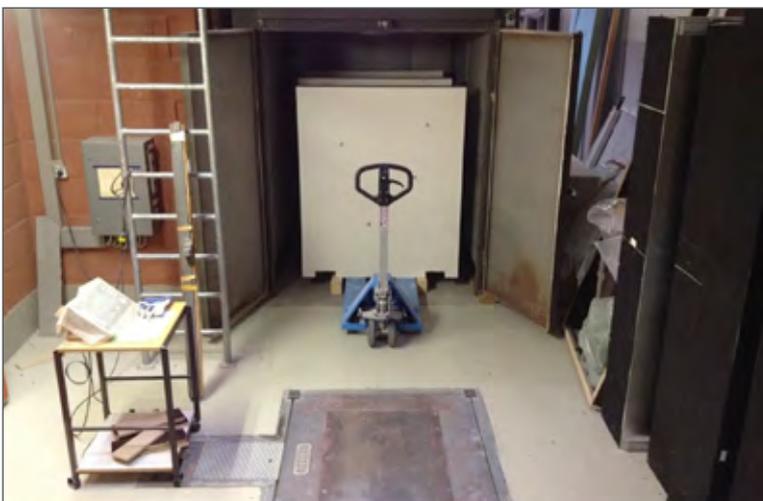
Poroelastische Platten im Rahmen dieses Aufsatzes sind in Anlehnung an [8] Kirchhoff-Platten aus mineralischen Baustoffen mit einer baustoffspezifischen Porenstruktur. Die betreffenden Porenräume sind im trockenen Baustoffzustand gasgefüllt. Bei zunehmender Baustofffeuchte befindet sich darin Gas und Wasser in den dem Feuchtegehalt entsprechenden Anteilen. Bei gesättigten Baustoffen sind die Porenräume schließlich wassergefüllt. Durch das eingelagerte Wasser erhöht sich die Masse des einschaligen Trennbauteils, wodurch eine Erhöhung der Luftschalldämmung gegenüber dem trockenen Bauteil zu erwarten ist.

Allerdings fällt eine massebedingte Steigerung der Luftschalldämmung, verursacht durch einen erhöhten Feuchtegehalt, geradezu moderat aus. Beispielsweise liegt die erreichbare Erhöhung bei einer wasserbedingten Masseerhöhung um 10 % bis 60 % gemäß den Gleichungen (1) und (2) zwischen 0,4 dB und 2,0 dB. Diese Ergebnisse stehen allerdings im Widerspruch zu den durchgeführten messtechnischen Untersuchungen bei Porenbeton und Kalksandstein-Wänden im trockenen, feuchten und wassergesättigten Zustand.

Messtechnische Untersuchungen

Zur Gewinnung von Messwerten werden akustische und hygrische Messungen und solche zur Ermittlung der Porengrößenverteilung und Porenform durchgeführt. Dabei bilden transportable, knapp zwei

Abb. 3: Wägeeinrichtung und Trockenplatz für die einzelnen Trennwände.



Quadratmeter große und 115 mm dicke einschalige Mauerwerksverbände aus mineralischen Baustoffen den Kern der messtechnischen Untersuchungen. Die plattenförmigen Prüfkörper (siehe Abb. 2) bestehen aus Kalksandstein (Trockenrohichte 1.890 kg/m^3) und Porenbeton (571 kg/m^3). Vor dem Bau der Wände lagerten die Einzelsteine bis zur freien Sättigung unter Wasser. Die Wände wurden anschließend gemäß den produktspezifischen Verarbeitungsvorgaben mit Dünnbettmörtel aufgebaut. Ein auf der vorderen und rückseitigen Wandoberfläche verspachtelter jeweils 2 mm dünner Gipsputz bildete das Oberflächenfinish der Sichtflächen. Stirnseitig erfolgte ein Versiegelungsanstrich mit einer Dichtschlämme, um ein vorzeitiges Austrocknen der Wände über die Stirnseiten deutlich zu minimieren. Neben dem jeweiligen unter Putz liegenden Fugenverlauf der Kalksandstein- und Porenbetonwand zeigt Abbildung 2 noch die Positionen für die bei der Messung der Körperschallnachhallzeit verwendeten Beschleunigungsaufnehmer mit den Nummern 1, 1', 2 und 2' sowie die Shaker-Positionen A1 und A2. Ebenso finden sich an den jeweiligen seitlichen Wandflächen die Impuls-Anrege-Stellen, bei denen an einer Seite der Impuls mit einem Impulshammer ausgelöst und an der jeweils gegenüber liegenden Wandseite von einem auf gleicher Höhe positionierten Beschleunigungsaufnehmer empfangen wird.

Beginnend vom wassergesättigten Baustoffzustand erfolgt eine schrittweise Trocknung der Trennbauerteile (siehe Abb. 3). Bei jeder Feuchtegehaltstufe erfolgt nacheinander die Messung der Luftschalldämmung, der Körperschallnachhallzeit und der Impuls-Laufzeit. Dabei stehen die Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton im Mittelpunkt, deren Verlustfaktoren vergleichend auch an stabförmigen Prüflingen mittels des Resonanzverfahrens bestimmt werden. Zusätzliche Untersuchungen, wie beispielsweise mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (siehe Abb. 4), eröffnen wesentliche Einblicke in die jeweilige Porenstruktur der beiden Baustoffe.

Porengrößenverteilung

Eine Aussage über das Vorkommen bestimmter Porengrößen liefert Abbildung 5 für die beiden Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton als Ergebnis von Quecksilberdruckporosimetrie-Messungen [2].

Abbildung 5 verdeutlicht den hohen Anteil an Nanoporen unterhalb einer Porenradiusgröße von 100 nm bei Kalksandstein. Die niedrigste gemessene Porengröße lag bei 6 nm. Wie Abbildung 6 (siehe folgende Seite) verdeutlicht, liegen bei Kalksandstein 55 % des Porenvolumens im Mikroporen-Bereich bis zu 100 nm. Bei Porenbeton hingegen zählen nur 27 % des Porenvolumens zu den Mikroporen.

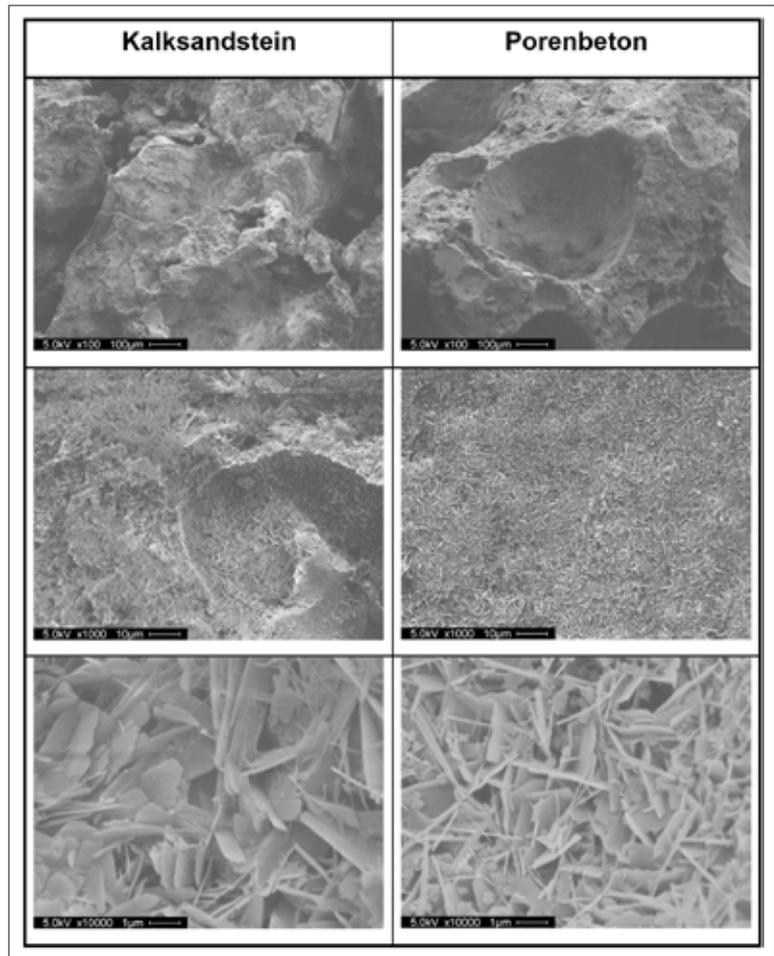
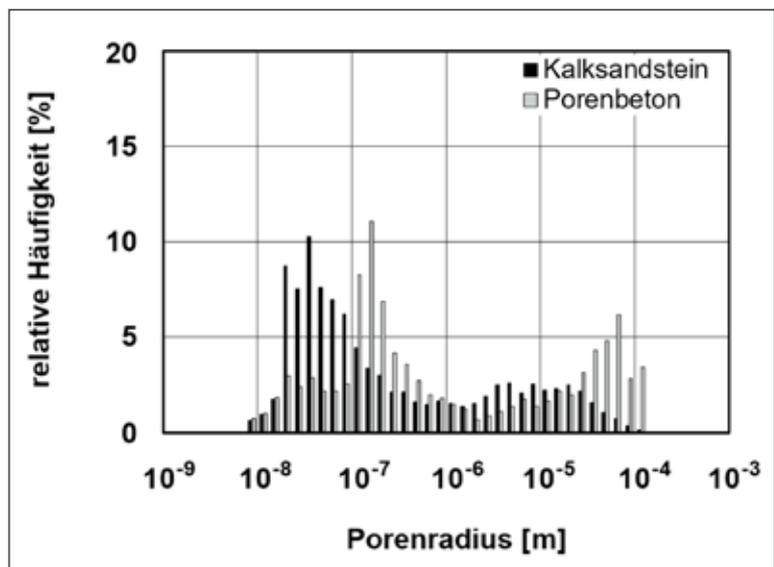


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des verwendeten Kalksandsteins und des Porenbetons in 100-facher (oben), 1.000-facher (mittig) und 10.000-facher Vergrößerung (unten) [2].

Abb. 5: Relative Häufigkeit der Porengrößen der untersuchten Kalksandstein- und Porenbeton-Proben [2].



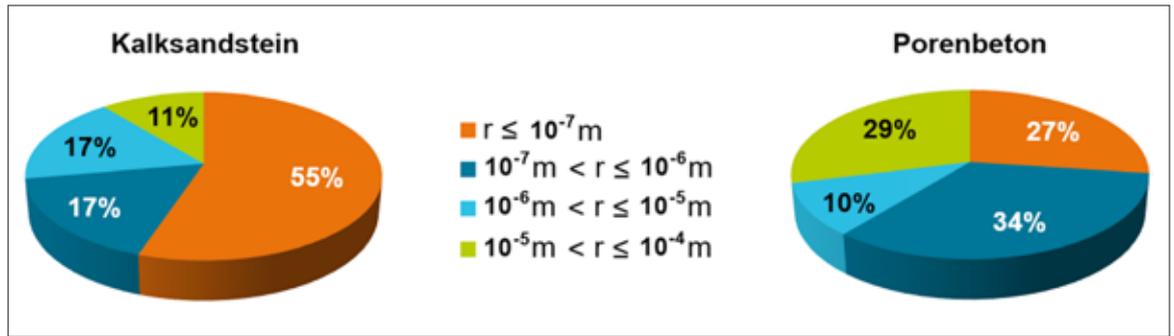


Abb. 6: Vergleichende Darstellung der kumulierten Porenhäufigkeit in vier Größenbereichen von Kalksandstein und Porenbeton; r = Porenradius [m].

Luftschalldämm-Maße

Kalksandstein

Eine Auswahl an Messergebnissen der Luftschalldämmung für die Kalksandsteinwand sind terzweise in Abbildung 7 dargestellt. Dort zeigen sich zwei Kurvenverläufe, die im unteren Frequenzbereich bis zu etwa 500 Hz eng beieinanderliegen und sich im Mittel nur bis zu 2 dB und maximal bis zu 4 dB in den entsprechenden Terzen unterscheiden. Oberhalb dieser Frequenz findet eine deutliche Auffächerung der Kurvenverläufe statt. Dabei staffelt sich die Höhe der Schalldämmwerte nach dem Feuchtegehalt der Wand. Der trockene Wandzustand besitzt die niedrigsten Schalldämmwerte, die nasse Wand erreicht oberhalb von 500 Hz im Mittel 5 dB und in einigen Terzen zwischen 6 dB und 7 dB höhere Luftschalldämm-Maße.

Porenbeton

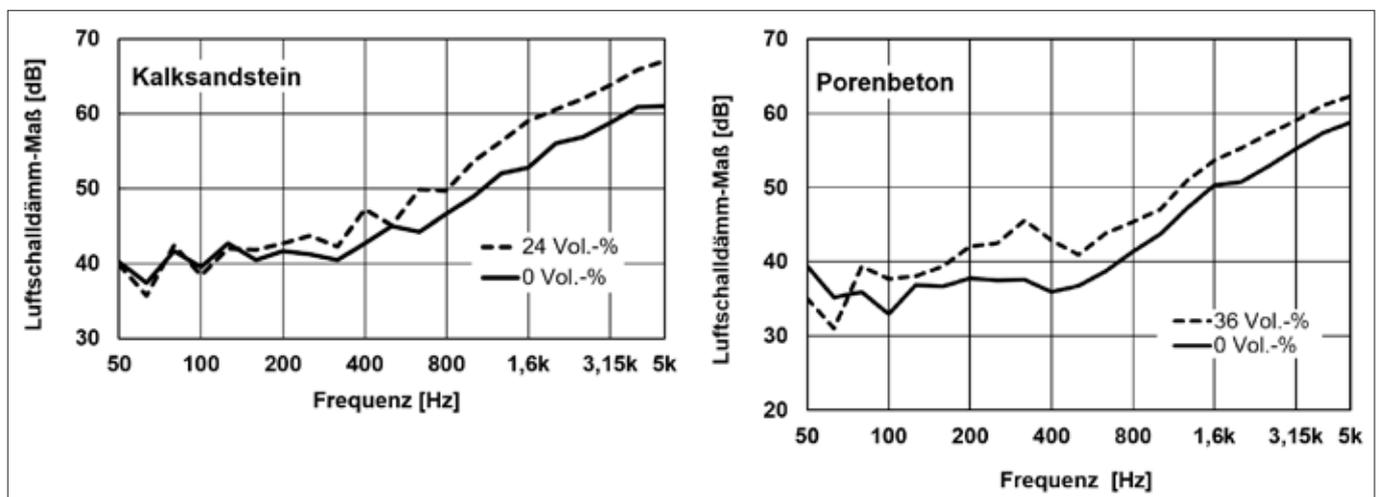
Für die Porenbetonwand zeigen sich die Ergebnisse der Messung der Luftschalldämmung terzweise in Abbildung 8. Die Höhe der Schalldämmwerte hängt auch hier deutlich vom Feuchtegehalt der Wand ab. Der trockene Wandzustand besitzt die niedrigsten

Schalldämmwerte, die gesättigte Wand erreicht oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz um die 315 Hz im Mittel 4,2 dB höhere Luftschalldämmmaße. Im Unterschied zu den Kalksandstein-Messergebnissen aus Abbildung 7 erzeugt der anregende Luftschall im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz um die 315 Hz die höchsten Differenzen zwischen dem trockenen und dem nassen Baustoffzustand.

Bewertung der Messergebnisse

Die Messergebnisse dokumentieren eine deutliche Zunahme des Luftschalldämm-Maßes bei zunehmendem Wassergehalt in den Poren. Insbesondere beim Trennbauteil aus Kalksandstein lässt sich durch die bloße Massezunahme aufgrund der Wassereinklagerung in den Porenräumen der Anstieg der Schalldämmwerte nicht vollständig mit den bisherigen Formeln erklären. Je nach Frequenzbereich, der das Bauteil anregenden Luftschallwelle, beträgt die Erhöhung des Luftschalldämmmaßes bis zu sieben Dezibel. In der in [2] gesichteten Literatur findet sich weder eine Erklärung zu diesem Phänomen, noch eine Rechenmethode zur Vorhersage der Luftschalldämm-Maße solch hygriisch belasteter einschaliger

Abb. 7 (links) und 8 (rechts): Luftschalldämm-Maß der Kalksandsteinwand und der Porenbetonwand für den trockenen und den nassen Zustand in Abhängigkeit von der Frequenz



Wände, insbesondere im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz.

Erweiterter Rechenansatz

Ausgangspunkt

Zur Herleitung eines erweiterten Rechenverfahrens zur Berechnung des Luftschalldämm-Maßes wird als Ausgangspunkt der mineralische feuchte Wandbaustoff als poröses Medium nach [9; 10] angesehen.

Durch diesen Modellansatz teilt sich die nasse Wand in zwei Komponenten auf: in einen Feststoff- und einen Fluid-Anteil. Hinter dem Feststoff verbirgt sich das elastische Strukturgerüst des Festkörpers, hinter dem Fluidanteil die hauptsächlich mit Wasser gefüllten Porenräume. Durch die Anhaftung des eingelagerten Porenwassers an den Porenwandungen entsteht eine mechanische Kopplung der beiden Bestandteile (siehe Abb. 9).

Dadurch übertragen sich die bei einer Schallanregung erzeugten Schwingungen des Feststoffgerüsts direkt auf das in den Porenräumen eingelagerte Wasser. Das in Schwingung versetzte Porenwasser wiederum wirkt umgekehrt auf das schwingende Feststoffgerüst ein. Bei diesem Wechselspiel bewirken viskose Reibungseffekte und bei ansteigenden Frequenzen auch zunehmend die Trägheitseffekte der Porenwassermasse eine Dämpfung der Schwingung im Trennbauteil. Dieser hygrysch bedingte zusätzliche Dämpfungseffekt trägt zu einer Erhöhung des Verlustfaktors im Wandbaustoff bei.

Verlustfaktor

Dies bestätigen auch die Messergebnisse in Abbildung 10. Dort werden die Verlustfaktoren aus den Untersuchungen mit dem Resonanzverfahren an Baustoffstäben und denen aus den Körperschall-

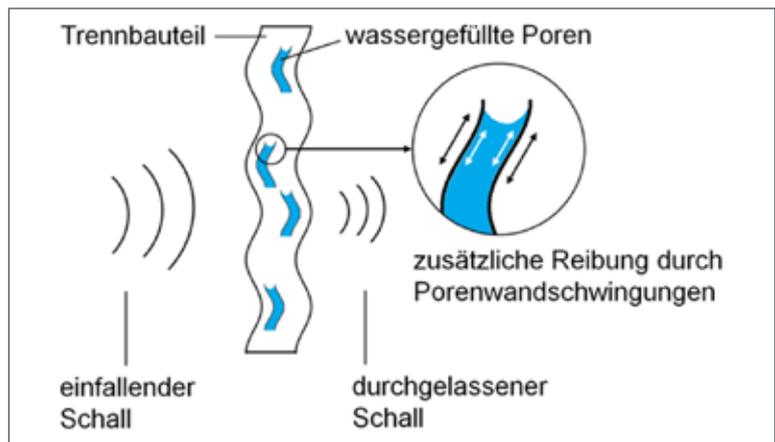
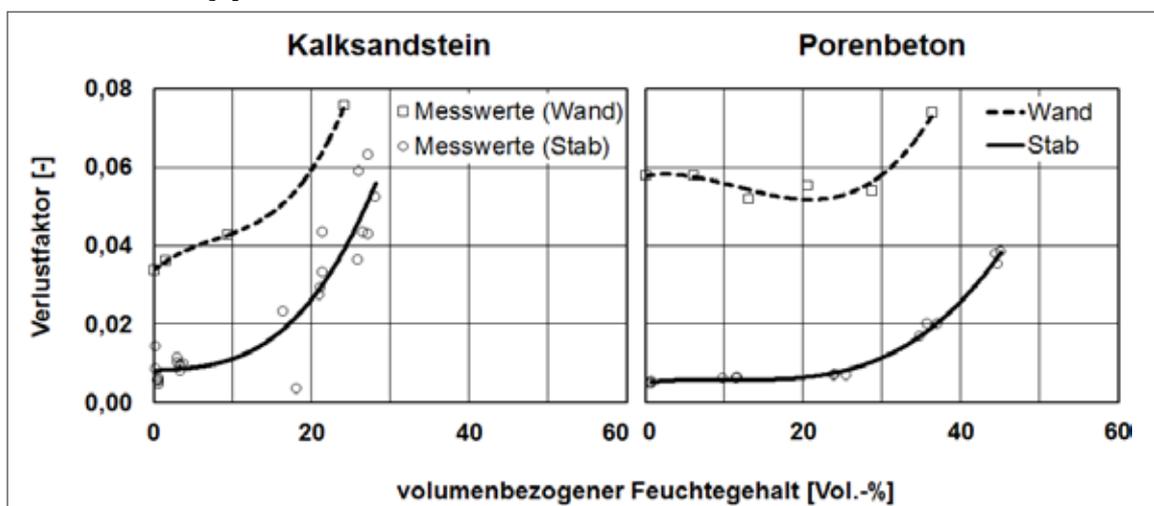


Abb. 9: Schematische Darstellung eines zu Schwingungen angeregten hygrysch belasteten einschaligen Trennbauteils.

nachhallzeit-Messungen an den Trennwänden für Kalksandstein und Porenbeton gegenübergestellt. Generell zeigen die Verläufe der Verlustfaktoren über dem Feuchtegehalt trotz zweier völlig unterschiedlicher Messverfahren und Prüflingen für beide Baustoffe eine deutliche Verwandtschaft auf. Dies zeigt sich besonders im ähnlichen Verlauf der Kurvenanstiege mit zunehmendem Feuchtegehalt in Abbildung 10. Unabhängig vom Messverfahren bestätigt sich, dass mit zunehmend feuchteren Baustoffen der jeweilige Verlustfaktor gleichermaßen ansteigt, wenn auch auf unterschiedlich hohem Werte-Niveau.

Offensichtlich zeigen bei den Prüfwänden zusätzliche Einflusskomponenten wie die endliche Wandgröße mit den kompakten Abmessungen, die Fugenausgestaltung in der Prüfoffnung oder auch den im Mauerwerksverbund vorhandenen Inhomogenitäten durch Steinfugen, Grifflöcher sowie den unterschiedlichen Materialien wie dem Dünnbettmörtel und dem Gipsputz eine verlustfaktor erhöhende

Abb. 10: Verlustfaktor in Abhängigkeit des volumenbezogenen Feuchtegehalts. Dargestellt sind die einzelnen Messwerte. Die angegebenen Verlustfaktoren der Wände repräsentieren Mittelwerte aus dem Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 5 kHz [2].



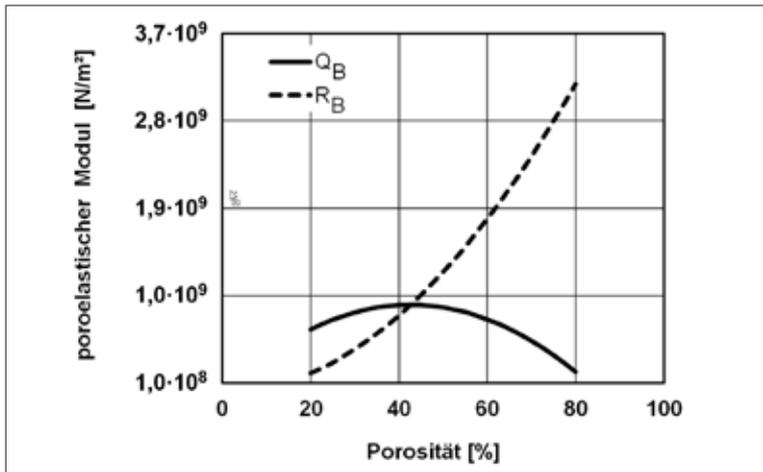


Abb. 11: Poroelastische Module Q_B und R_B in Abhängigkeit von der Porosität, Auswertungen der Gleichungen (5) und (6).

Wirkung. Das unterschiedliche Niveau der absoluten Verlustfaktorwerte zwischen den Messverfahren stellt für die Untersuchungen jedoch keine Beeinträchtigung dar, da es hier in erster Linie um das generelle Anstiegsverhalten vom trockenen hin zum wassergesättigten Baustoff geht.

Feststoff- und Fluidanteil

Die getrennte Betrachtung von Feststoff- und Fluid-

anteil führt mit der Feststoffdichte ρ_s und der Fluid-dichte ρ_f unter Beachtung der zwischen 0 und 1 liegenden Porosität σ zur gesamten Rohdichte ρ des porösen Materials [9]:

$$\rho = (1 - \sigma)\rho_s + \sigma\rho_f \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

Daraus ergibt sich für die flächenbezogene Masse m_h des nassen Bauteils mit der Dicke h [2]:

$$m_h = ((1 - \sigma)\rho_s + \sigma\rho_f)h \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4)$$

Poroelastische Module

Zusätzlich treten in der Theorie nach [9] die beiden poroelastischen Module Q_B und R_B gemäß den Gleichungen (5) und (6) als grundlegende Einflussgrößen auf. Sie dienen zur Quantifizierung der bei einer äußeren Belastung entsprechend auftretenden Druckverhältnisse in den Porenräumen. Wie in [2] gezeigt, gilt für das Feststoff-bezogene Modul Q_B im Rahmen dieser Untersuchung abhängig von der Porosität σ :

$$Q_B = \frac{\sigma(0,08533 - \sigma)}{2,0127 \cdot 10^{-10}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

Das Fluid-bezogene Modul R_B errechnet sich nach [2] zu:

Schallschutz- und Akustiklösungen weltweit



für Medizin und Gesundheit, Testeinrichtungen für die Industrie, Gebäudeakustik, Studios

deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de

$$R_B = \frac{\sigma^2}{2,0127 \cdot 10^{-10}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (6)$$

Mit zunehmender Porosität nähert sich beispielsweise das Modul R_B dem Wert für das Elastizitätsmodul von Porenbeton an und unterstreicht damit, dass die poroelastischen Module in der Theorie nach [9] nicht zu vernachlässigen sind (siehe Abb. 11).

Erweiterte Gleichung

Ein in [8] vorhandener Ansatz für die tieffrequente Schwingungsanregung einer im Erdreich liegenden Bodenplatte liefert ein gekoppeltes System zweier Bewegungsgleichungen zur Beschreibung der darin ausgelösten Biegeschwingungen. Dieses Gleichungssystem aus [8] bildet den Ausgangspunkt für die Herleitung einer um die hygrischen Effekte erweiterten Biegewellengleichung.

Daraus entwickelt sich in [2] schließlich eine erweiterte Gleichung für das Luftschalldämm-Maß einschaliger, poröser und feuchter Trennbauteile oberhalb der Grenzfrequenz. Nach [2] gilt:

$$R = 10 \lg \left(\frac{m^2 \omega}{2Z_L} \right)^2 + 5 \lg \left(\frac{f}{f_g} \right) + 10 \lg(2\eta) + 10 \lg(1 + C_h \lambda_{bh}^2) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

Der gegenüber Gleichung (2) zusätzliche Term in Gleichung (7) formuliert die feuchtebedingte Erhöhung des Verlustfaktors. Neben der quadrierten Biegewellenlänge λ_{bh} des feuchten Bauteils findet sich darin auch die „Porenfluidzahl C_h “ aus Gleichung (8). Sie setzt sich aus Komponenten zusammen, die sowohl das Feststoffgerüst, wie auch das im Porenraum eingelagerte Wasser betreffen. Für C_h gilt in der vereinfachten Form mit nur reellwertigen Termen [2]:

$$C_h = \frac{\nu}{R_B} \left[\frac{1}{\lambda} \left(\frac{Q_B + R_B}{R_B} - 1 \right) \omega^2 Q_B \sigma \rho_f \frac{2\mu}{(2\mu + \lambda)} \right] + \omega^2 \left[\sigma \rho_f - \frac{Q_B \sigma \rho_f (Q_B + R_B)}{(2\mu + \lambda) R_B} - \frac{Q_B \sigma \rho_f}{(2\mu + \lambda)} \right] \quad [1/\text{m}^2] \quad (8)$$

Bei μ und λ handelt es sich um die bekannten Lamé-Konstanten aus der Mechanik, ν ist die Querkontraktionszahl. Insgesamt zählt die Porenfluidzahl ein Dutzend Einflussfaktoren [2]. Dabei entfalten die vier nachfolgenden Basisgrößen ihre größte Wirkung:

- Frequenz
- Porosität
- Fluiddichte
- Viskosität der Porenraumfüllung

Da die Porosität eines Baustoffs aus der jeweiligen Baustoffmatrix hervorgeht, spielt die Porenstruktur eine zusätzliche wesentliche Rolle. Die Porenstruktur bildet so eine weitere einflussreiche Basisgröße

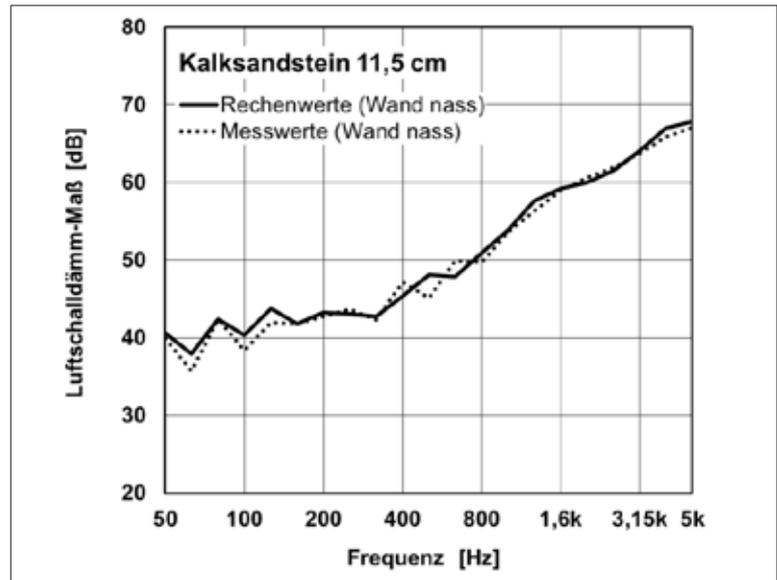


Abb. 12: Rechnerische Vorhersage der Luftschalldämm-Maße der nassen Kalksandsteinwand unter Berücksichtigung der Porenfluidzahl C_h auf Grundlage der Messwerte der trockenen Wand im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten der nassen Wand aus Kalksandstein.

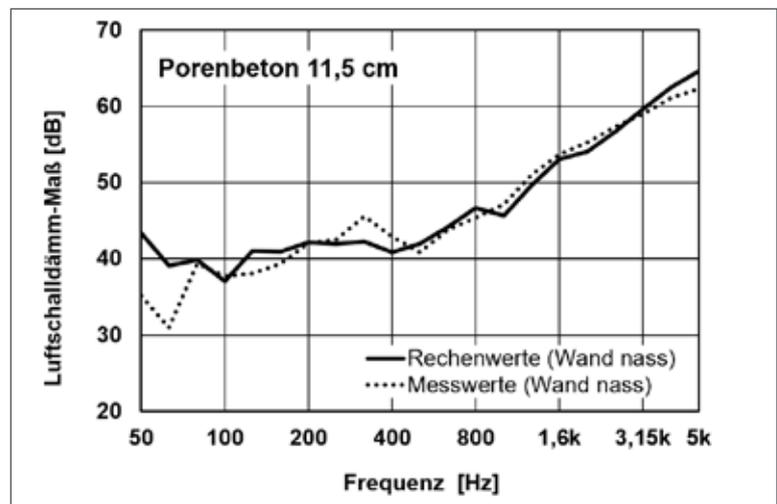


Abb. 13: Rechnerische Vorhersage der Luftschalldämm-Maße der nassen Porenbetonwand unter Berücksichtigung der Porenfluidzahl C_h auf Grundlage der Messwerte der trockenen Wand im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten der nassen Wand aus Porenbeton.

und wird im Folgenden über den Formfaktor berücksichtigt.

Vergleich und Interpretation

Messung und Rechnung

Die berechneten Werte der nassen Wand basieren auf den Messwerten der trockenen Wand. So kann direkt überprüft werden, ob mit der Erweiterung durch den hygrischen Einflusstern in Gleichung (7) eine Annäherung an die Messwerte der nassen Wand erzielt werden kann.

Die Vergleiche in Abbildung 12 und Abbildung 13 bestätigen eine hohe Übereinstimmung der berech-

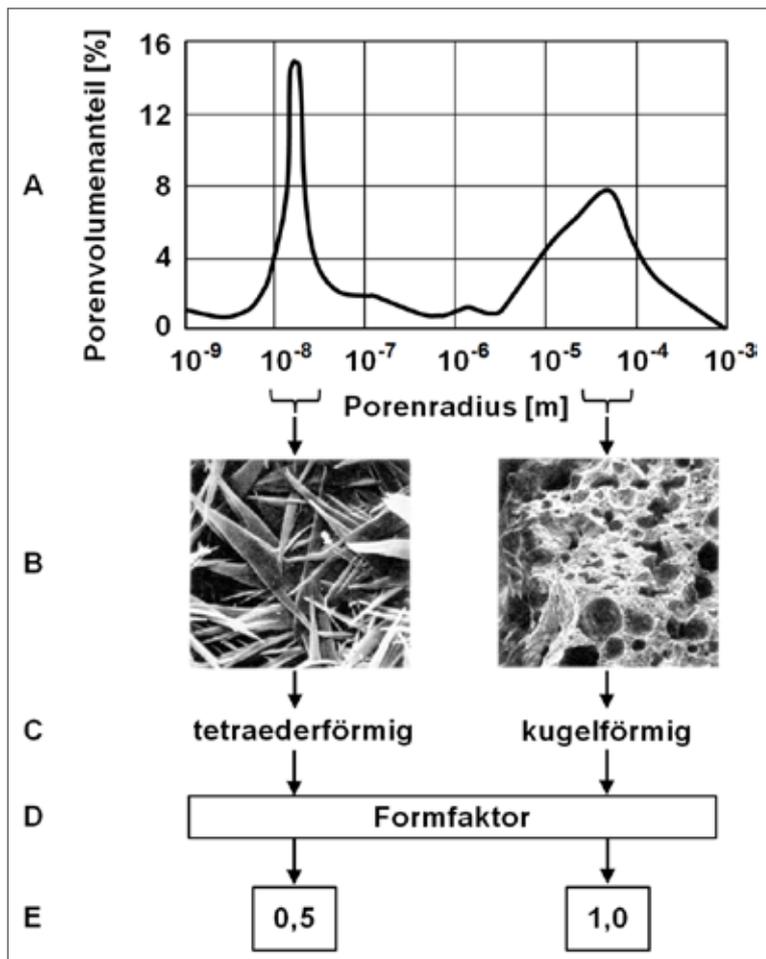


Abb. 14: Schema zur Feststellung des Formfaktors nach [2]:
 A: Porengrößenverteilung, B: REM-Aufnahme im jeweiligen Bereich der Häufigkeitsmaxima, C: Feststellung der vorherrschenden Porenform, D: Ermittlung des Formfaktors, E: Formfaktorergebnis

neten Luftschalldämm-Maße mit den tatsächlich gemessenen Ergebnissen der feuchten Bauteile. Die hohe Übereinstimmung ergibt sich, wenn der hygrische Einflusstern in Gleichung (7) zusätzlich mit dem Porenstruktur-Formfaktor gewichtet wird. Dieser Formfaktor wird in [2] ausführlich beschrieben und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Hierbei wird die überwiegende Formgebung der zumeist kugelförmigen Makroporen und der zumeist tetraederförmigen Mikroporen gemäß Abbildung 14 entsprechend der Theorie nach [9; 10] berücksichtigt. Mit den beiden Informationen über die Porengrößenverteilung beziehungsweise der vorherrschenden Porengeometrie einer Baustoffmatrix lässt sich nach Abbildung 14 ein statistisch zweidimensionales Porenmodell angeben. Hierbei zeigt sich am Beispiel Porenbeton, dass die Poren der beiden häufigsten Größenbereiche unterschiedliche vorherrschende Formen aufweisen. Bei den häufigsten kleinsten Porengrößen bewirken die auftretenden nadelförmigen Tetraeder der Calcium-Silikat-Phasen im Baustoff einen Formfaktor in Höhe von 0,5. Bei den häufigs-

ten Poren im oberen Größenbereich begründet die vorherrschend kugelförmige Porenform einen Porenstrukturfaktor von 1,0. Bei Kalksandstein führt der hohe Anteil an Mikroporen gemäß Abbildung 6 mit häufig engen Kapillaren, die als vornehmlich zylinderförmig anzusehen sind, zu einem zusätzlich niedrigen Porenstrukturfaktor von 0,2, der insbesondere bei anregenden Frequenzen oberhalb von 2 kHz wirkt [2].

Teilgesättigte Baustoffe

Bei der Berechnung der teilgesättigten Baustoffzustände wird das porenraumfüllende Fluid gemäß seines Feuchtegehalts in einen Wasser- und einen Luftanteil zweigeteilt. Unter Berücksichtigung der anteilmäßigen Dichte- und Viskositäts-Werte liefern die rechnerischen Ergebnisse unter Beibehaltung des Porenstrukturfaktors ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten der entsprechenden einschaligen und unterschiedlich teilgesättigten Bauteile. Zudem ergibt die Berechnung unter Annahme vollständig luftgefüllter Porenräume folgerichtig wieder den Schalldämmwerteverlauf des trockenen Baustoffzustands.

Am Beispiel der Porenbetonwand zeigt Abbildung 15 die Ergebnisse der rechnerischen Vorhersage der Luftschalldämm-Maße im Vergleich zu den gemessenen bei unterschiedlichen Feuchtegehalten im Baustoff.

Die entsprechenden Vergleichswerte der Kalksandsteinwand bei unterschiedlich starker Befüllung der Porenräume mit Wasser stimmen ebenfalls sehr gut überein und sind in [2] dargestellt.

Vergleich von klassischer und erweiterter Gleichung

Bei den bisherigen Vergleichen zwischen den Kurvenverläufen ergeben sich die berechneten Luftschalldämm-Maße der Trennbauteile bei den unterschiedlichen Feuchtegehaltstufen durch die Addition des jeweiligen rechnerisch bestimmten hygrischen Einflusses und den gemessenen Ergebnissen der trockenen Bauteile. Wie zuvor dargestellt, führt dies zu einer hohen Übereinstimmung der entsprechenden Kurvenverläufe. Ergänzend hierzu sollen die Ergebnisse der Luftschalldämm-Maße-Ermittlung der beiden einschaligen Trennbauteile aus Kalksandstein und Porenbeton nach Gleichung (7) ohne Berücksichtigung des Verlaufs der Schalldämm-Messwerte der trockenen Trennbauteile erfolgen. Dies führt zu einer generellen Betrachtung der Luftschalldämm-Maße in gleichzeitiger Abhängigkeit von Baustofffeuchtegehalt und der Frequenz, wie sie in Abbildung 16 und Abbildung 17 (siehe übernächste Seite) dargestellt ist. Dabei wird der Bereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz betrachtet.

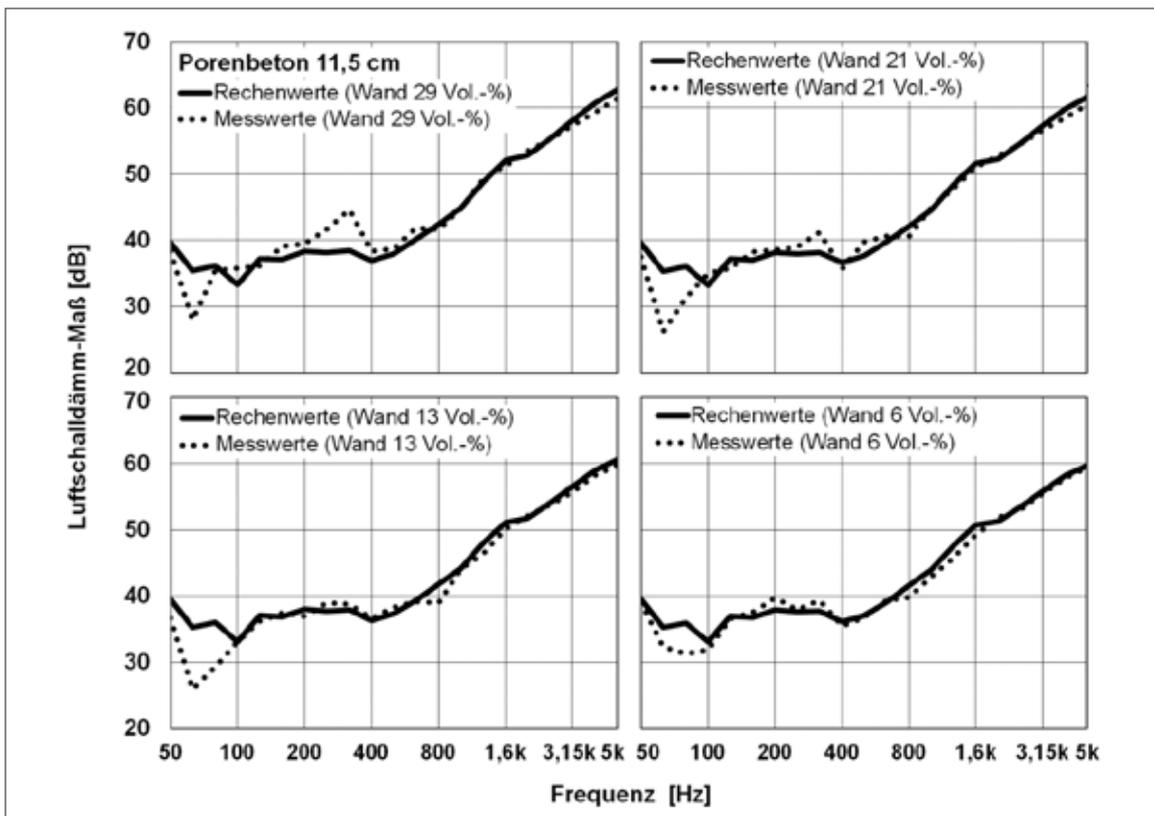


Abb. 15: Luftschalldämm-Maß der Porenbetonwand bei unterschiedlichen Feuchtegehalten in Abhängigkeit von der Frequenz

WIE MACHT MAN EFFIZIENTEN SCHALLSCHUTZ MÖGLICH?

Antworten erhalten Sie auf unserer neuen Webseite.

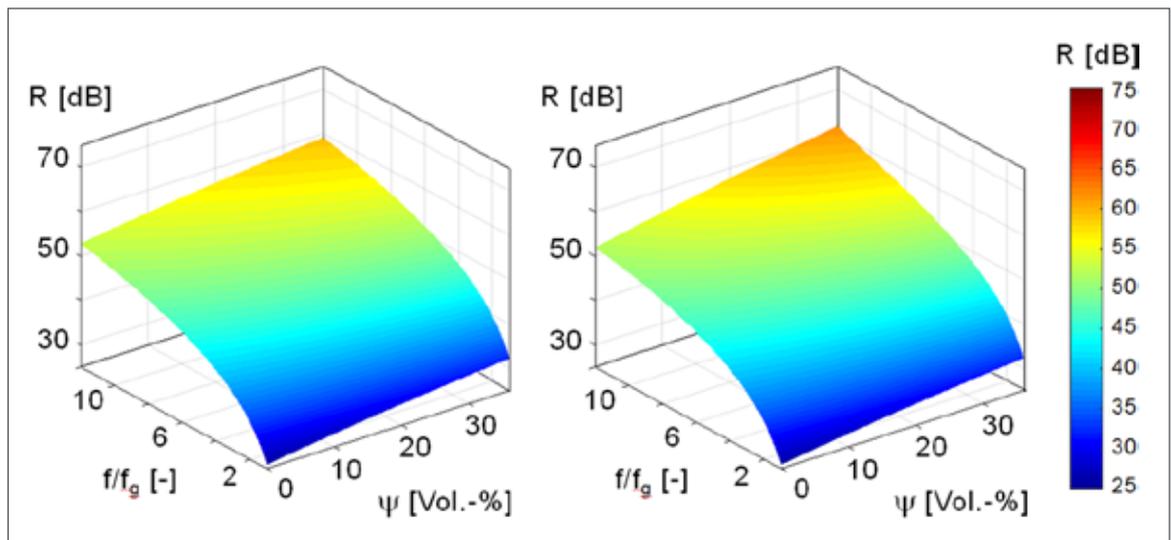


Abb. 16: Luftschalldämmung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (ψ) und der Frequenz (f/f_g) für das einschalige Trennbauteil aus Porenbeton; Diagramm links: Auswertung der Gleichung (2), Diagramm rechts: Auswertung der Gleichung (7).

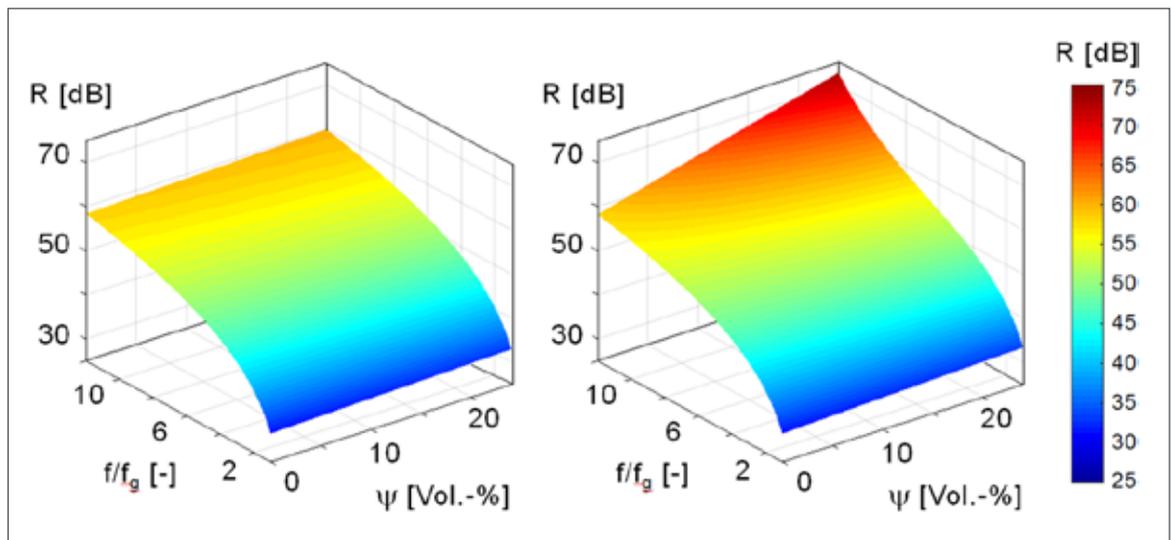


Abb. 17: Luftschalldämmung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (ψ) und der Frequenz (f/f_g) für das einschalige Trennbauteil aus Kalksandstein; Diagramm links: Auswertung der Gleichung (2), Diagramm rechts: Auswertung der Gleichung (7).

Abbildung 16 zeigt die Veränderung des Luftschalldämm-Maßes der Porenbetonwand in Abhängigkeit vom Baustoff-Feuchtegehalt zwischen 0 Vol.-% und 36 Vol.-% im linken Diagramm nach Gleichung (2) bereits deutlich auch ohne Berücksichtigung des hygrischen Zusatzterms aus Gleichung (7). Der deutliche Anstieg ergibt sich aus der Massezunahme der in den Makroporen des Porenbetons eingelagerten Wassermasse. Die feuchteabhängigen Maximalwerte für das Luftschalldämm-Maß erreichen beim Frequenzquotient $f/f_g = 12$ demnach rund 52 dB bis 59 dB. Im rechten Diagramm aus Abbildung 16 ist zusätzlich die Wirkung der Porenfluidzahl mitberücksichtigt. Es ist erkennbar, dass die Luftschalldämm-Maße bei hohen Feuchtegehalten im Baustoff

oberhalb von rund 25 Vol.-% gegenüber dem linken Diagramm nochmalig etwas ansteigen und den Maximalwert so auf rund 62 dB erhöhen. Dieser Wert wird bei 36 Vol.-% erreicht, was dem wassergesättigten Zustand der einschaligen Trennwand aus Porenbeton entspricht.

Kalksandstein

Abbildung 17 liefert abschließend die entsprechenden Diagramme für das einschalige Trennbauteil aus Kalksandstein. Im linken Diagramm zeigt sich wiederum die Änderung des Luftschalldämm-Maßes in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Frequenz nur durch die Massezunahme aufgrund des in den Poren eingeschlossenen Wassers. Dadurch, dass bei

Kalksandstein die Massezunahme nur 13 % beträgt, verläuft der Anstieg der Maximalwerte bei $f/f_g = 12$ kaum merklich von gut 58 dB auf rund 60 dB. Wird jedoch die zusätzliche hygrische Wirkung des in den Poren eingelagerten Wassers über die Porenfluidzahl berücksichtigt, so ergibt sich im rechten Diagramm von Abbildung 17 eine deutliche Zunahme der Luftschalldämmung bei den höheren Feuchtegehalten der Kalksandsteinwand.

Bedingt durch die besondere Porenstruktur des Kalksandsteins, bei der sich über die Hälfte des gesamten Porenraumvolumens aus Mikroporen zusammensetzt, herrschen höhere innere Kräfte, die über die Porenfluidzahl im rechten Diagramm von Abbildung 17 ihre Berücksichtigung finden. Es zeigt somit deutlich, dass die Erhöhung der Luftschalldämmung einschaliger Trennbauteile aus Baustoffen mit hohem Mikroporenanteil nicht über den Massezuwachs erfolgt, sondern schlussendlich über die inneren Kräfte, die in wassergefüllten Kapillaren mit Radien unterhalb von 100 Nanometer wirken.

Schalldämmkurvenverlauf

In Abbildung 18 erweitert sich der prinzipielle Verlauf der Luftschalldämmung bei einschaligen Wänden aus Abbildung 1 um die wesentlichen zusätzlichen Einflüsse bei hygrisch belasteten porösen Baustoffen. Es zeigt sich, dass die Porenstruktur des Baustoffs mit seiner Porosität und der Anteile von Makro- und Mikroporen entscheidend das Luftschalldämm-Maß beeinflussen.

Generell zeigt sich, dass das Bergersche Massegesetz für den Frequenzbereich deutlich unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz auch für einschalige hygrisch belastete Trennbauteile seine Gültigkeit behält, wenn bei der Anwendung von Gleichung (1) die flächenbezogene Masse des trockenen Bauteils um den entsprechenden Betrag der eingelagerten Wassermasse erhöht wird.

Fazit

Feuchtigkeit reduziert wirksam die Schalltransmission!

Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen lässt sich herausstellen, dass sich die Erhöhung des Luftschalldämm-Maßes im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz durch Wassereinlagerung nicht alleine auf den Mechanismus der Massezunahme, sondern auch auf die Wirkung mechanischer Kräfte durch eingelagertes Wasser in den Porenräumen zurückführen lässt. Je kleiner die Porengrößen, desto größer die mechanischen Wirkkräfte und desto höher der Verlustfaktor. Baustoffe mit einem ähnlichen Mikro-/Nanoporenanteil im Baustoffinnern, wie beim vorliegenden Kalksandstein, dürften sich in Be-

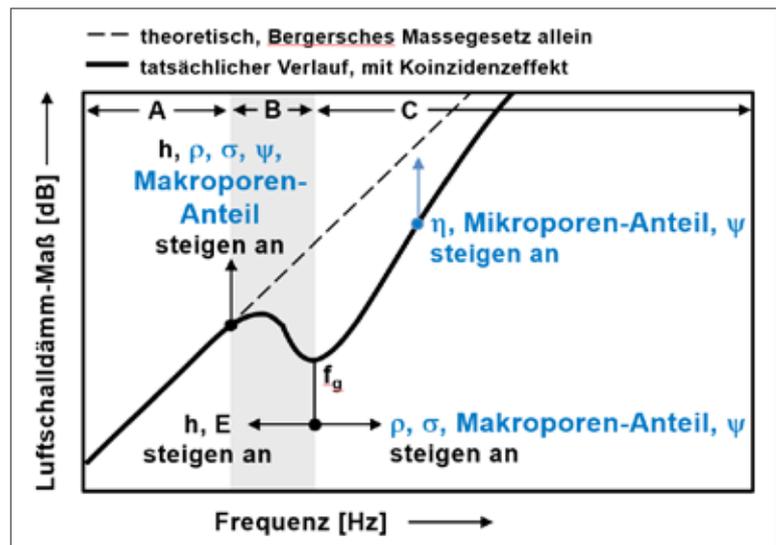


Abb. 18: Prinzipieller Verlauf des Luftschalldämm-Maßes von einschaligen hygrisch belasteten Trennbauteilen in Abhängigkeit von der Frequenz (die hygrisch relevanten Einflüsse sind gegenüber Abbildung 1 in blauer Farbe angegeben); ρ = Rohdichte des nassen Baustoffs [kg/m^3].

zug auf die Veränderung der Luftschalldämmung bei Wassereinlagerung ähnlich verhalten.

Da generell feuchte oder gar nasse Wände aus anderen Gründen bauphysikalisch zumeist weniger erwünscht sind, wären auch Alternativen zu Wasser in den Porenräumen denkbar. Diese Eckpunkte führen zu einer Reihe möglicher Ansätze für zukünftige Untersuchungen und Entwicklungen in den unterschiedlichsten Bauproduktbereichen, wie zum Beispiel bei der Optimierung von Porengeometrien oder der Konzeption neuartiger Trennwandkonstruktionen.

Literatur

- [1] Mehra, S.-R.: Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [2] Hermes, M.: Luftschalldämmung hygrisch belasteter einschaliger Trennbauteile. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020.
- [3] Berger, R.: Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation, T.H. München, 1911.
- [4] Kuttruff, H.: Akustik. Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 2004.
- [5] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Berlin, Springer-Verlag, 1996.
- [6] Heckl, M.: Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. *Acustica* 10, S. 98–108, 1960.
- [7] Möser, M.: Technische Akustik. Berlin, Verlag Springer Vieweg, 2012.
- [8] Theodorakopoulos, D.D.; Beskos, D.E.: Flexural vibrations of poroelastic plates. *Acta Mechanica* 103, S. 191–203, 1994.
- [9] Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 28, Nr. 2, S. 168–178, 1956.
- [10] Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 28, Nr. 2, S. 179–191, 1956. ■



Dr.-Ing. Marcus Hermes

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart