



BAUAKUSTISCHE EIGENSCHAFTEN VON DECKENKONSTRUKTIONEN IN HOLZBAUWEISE

Michael Flieger¹, Oliver Kornadt¹, Veronika Silberbauer², Tobias Götz²

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland,

E-Mail: michael.flieger@rptu.de

² PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Deutschland, E-Mail: veronika.silberbauer@pirminjung.de

Kurzfassung/Abstract

Aus ökologischen Gründen wird untersucht, bei Holzdecken den meist verwendeten Ortbeton durch Lehmsteine oder Schüttungen aus recycelten Materialien zu ersetzen. Ebenfalls werden Alternativen für den Estrich-Unterbau von Deckenauflagen analysiert. Im Vergleich zu aktuell üblichen Holzdecken soll aus akustischer Sicht eine gleichwertige oder bessere Qualität erreicht werden. Erste Ergebnisse zu simulativen Untersuchungen einer Deckenkonstruktion mit Lehmsteinbeschwerung werden diskutiert und bewertet. Zudem wird gezeigt, wie die Trittschallpegelminderung durch Deckenauflagen auf Holzdecken in einem akustischen Deckenprüfstand mit massiver Bezugsdecke unter Verwendung einer Holzdeckenattrappe gemessen werden kann.

Concrete is generally used to add necessary weight to wooden ceilings. For ecological reasons, it is being investigated whether this concrete can be replaced by clay stones or fills made from recycled materials. Alternatives are also being examined for the screed substructure. The aim is to achieve an equivalent or better quality from an acoustic point of view compared to current wooden ceilings. Initial results from simulative studies of a ceiling construction with clay stone weighting are discussed and evaluated. Additionally, it is shown how the impact sound reduction due to floor coverings of wooden ceilings can be measured in an acoustic test room with a massive reference ceiling using a wooden ceiling dummy.

Einleitung

Für die Baubranche wird die Berücksichtigung ökologischer Aspekte zunehmend wichtiger. Insbesondere die Reduktion der durch die Verwendung von Beton entstehenden CO₂-Emissionen und die Schonung von natürlichen Ressourcen spielen eine zentrale Rolle bei der Errichtung neuer Bauwerke.

Der Holzleichtbau benötigen gegenüber dem klassischen Massivbau keinen oder deutlich weniger Beton und ermöglichen zudem die schnelle Errichtung

leichter, schlanker Konstruktionen mit hohem Vorfertigungsgrad. Als Holzdeckenkonstruktionen werden jedoch in der Regel Holz-Beton-Verbunddecken, abgekürzt HBV-Decken, verwendet, um die für die Schalldämmung benötigte Masse über den Beton einzubringen.

Die Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) und die Pirmin Jung Deutschland GmbH forschen gemeinsam an der akustischen und materialtechnischen Optimierung von Holzleichtbaukonstruktionen [1, 2]. Anstelle der üblicherweise verwendeten Ortbetonbeschwerung sollen recycelte Materialien und/oder alternative Materialien verwenden. Im Vergleich zu aktuell üblichen Holzdecken soll aus statischer, baupraktischer, wirtschaftlicher sowie akustischer Sicht eine gleichwertige oder bessere Qualität sowie eine deutliche Verbesserung des ökologischen Aspekts erreicht werden. Gefördert wird das Forschungsprojekt von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU.

Erste akustische Forschungen beschäftigen sich mit Lehmsteinen als Alternative zu Betonbeschwerungen. Der Fokus liegt dabei auf dem Norm-Trittschallpegel im Frequenzbereich von 50 bis 500 Hz. Gleichzeitig werden neue Deckenauflagen, welche alternative Materialien anstelle von Estrich verwenden, entwickelt und durch simulative sowie experimentelle Untersuchungen schrittweise akustisch optimiert.

Simulative Analyse einer Holzdecke mit Lehmsteinbeschwerung

Es wurde eine „Basiskonstruktion“ für erste simulationstechnische Untersuchungen einer Holzdeckenkonstruktion mit Lehmbausteinen definiert. Die Konstruktion stellt noch keinen finalen Entwurf dar, sondern dient in erster Linie zur grundlegenden Analyse des akustischen Verhaltens von Deckenkonstruktionen mit Lehmsteinbeschwerungen im Vergleich zu Deckenkonstruktionen mit Betonbeschwerungen. Die betrachtete Konstruktion ist ein zweischaliges System, dessen genauer Aufbau Abbildung 1 entnommen werden kann.

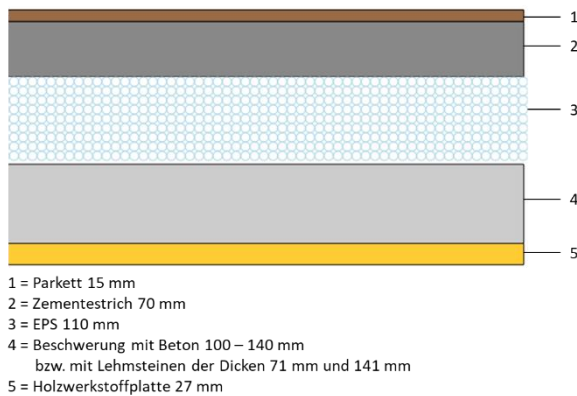


Abbildung 1: „Basiskonstruktion“ für erste Simulationen von Deckenauflagen mit Lehmbausteinen anstelle einer Betonbeschwerung

Diese Konstruktion stellt ein Masse-Feder-Masse-System dar, wobei die Schichten 2 und 4 in Abbildung 1 als Massen und die Schicht 3 mit EPS-Dämmmaterial als Federn fungieren. Ein solches System besitzt eine Resonanzfrequenz, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Schalldämmung hat. Im Bereich der Resonanzfrequenz schwingt die Konstruktion besonders stark, d.h. mit großer Amplitude, wodurch die Schallübertragung durch das Bauteil begünstigt wird. Die Schalldämmung ist daher gegenüber anderen Frequenzen merklich reduziert. Für Leichtbaukonstruktionen liegen die Resonanzfrequenzen meist im tieferen, aber vom menschlichen Ohr noch gut wahrnehmbaren, Frequenzbereich und haben maßgeblichen Einfluss auf die akustische Performance des Bauteils. Die Reduktion der Auswirkungen der Resonanzfrequenz und deren Verschiebung in unkritischere Bereiche ist daher ein zentraler Punkt bei der akustischen Optimierung und wird für Decken in der Regel durch eine Beschwerung realisiert. Rechnerisch kann die Resonanzfrequenz eines zweischaligen Systems nach Gleichung 1 aus den flächenbezogenen Schalenmassen und der dynamischen Steifigkeit der Federschicht ermittelt werden.

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (1)$$

f_o Resonanzfrequenz in Hz
 m_i Flächenbezogene Schalenmasse in kg/m^2
 s' Dynamische Steifigkeit der Federschicht in N/m^3

Die simulationstechnischen Untersuchungen der „Basiskonstruktion“ aus Abbildung 1 konzentrierten sich auf die Trittschalldämmung im Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz. Die Deckenkonstruktion wurde dazu mit der Simulationssoftware INSUL [3] nachgebildet. Die Beschwerungsschicht (Schicht 4) wurde zunächst als 100 mm dicke Betonschicht mit einer Rohdichte von $2500 \text{ kg}/\text{m}^3$ angesetzt. Anschließend fand eine Variation der Betondicke von 100 mm bis 140 mm statt. Im nächsten Schritt wurde anstelle der

Betonschicht eine Beschwerung mit Lehmsteinen der Dicke 71 mm bzw. 142 mm simuliert. Die Rohdichte der Lehmsteine wurde zwischen $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $2200 \text{ kg}/\text{m}^3$ variiert.

Eine Beschwerung mit Beton bietet die Möglichkeit, die Schichtdicke im Rahmen der Statik und Kosten nahezu beliebig anzupassen. Dahingegen ist für Lehmsteine die Schichtdicke direkt von der Höhe des verwendeten Steins abhängig, welche üblicherweise 52 mm, 71 mm oder 113 mm beträgt. Für die hier gezeigten Simulationen wurde ein Lehmstein der Höhe 71 mm gewählt. Die zweite simulierte Schichtdicke von 142 mm ergibt sich durch die Anordnung von zwei übereinander liegenden Lehmsteinreihen. Die Rohdichte der Lehmsteine kann je nach Hersteller stark schwanken und liegt in der Regel zwischen $700 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $2200 \text{ kg}/\text{m}^3$. Für die nachfolgenden Vergleiche wurden repräsentativ die vier Rohdichten $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ als unterer Grenzwert, $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ als Grenzwert zwischen Leichtlehmsteinen und Lehmsteinen, $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $2200 \text{ kg}/\text{m}^3$ als oberer Grenzwert festgelegt. Niedrigere Rohdichten als $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ wurden nicht betrachtet, da die Lehmsteine als Beschwerung verwendet werden.

Simulationsergebnisse

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der simulierten Norm-Trittschallpegel der Deckenauflage mit Betonbeschwerungen der Dicken 100 mm, 120 mm und 140 mm für den Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz. Der Norm-Trittschallpegel nimmt für den gesamten betrachteten Frequenzbereich mit zunehmender Betondicke ab. Im Frequenzbereich 200 Hz bis 500 Hz beträgt die Differenz zwischen den Dicken 100 mm und 140 mm 3 dB bis 4 dB. Unterhalb von 200 Hz liegt der Unterschied bei 1 dB bis 2 dB. Durch eine Dickenerhöhung der Beschwerungsschicht können somit niedrigere Norm-Trittschallpegel für die untersuchte Deckenauflage erreicht werden, wobei für tiefe Frequenzen die Verbesserungen geringer ausfallen.

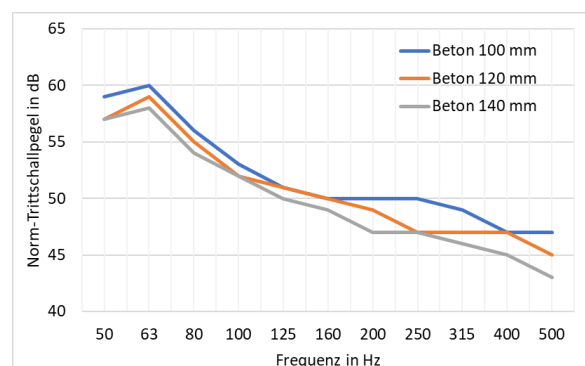


Abbildung 2: Vergleich der simulierten Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Betonbeschwerungen der Dicken 100 mm, 120 mm und 140 mm

Allgemein ist die Verbesserung der Trittschalldämmung jedoch nicht nur von der Dicke und dem Material der Beschwerungsschicht abhängig, sondern hängt auch direkt vom restlichen Aufbau der Decke ab. Je nach Anordnung, Material (Rohdichte) und Dicke der einzelnen Bauteilschichten kann das Ergebnis für andere Deckenaufbauten abweichen. Bei der Entwicklung der neuen Holzleichtbau-Deckenkonstruktionen werden daher die Interaktionen zwischen deren verschiedenen Bauteilschichten und das akustische Verhalten alternativer Beschwerungsmaterialien durch Simulationen sowie durch experimentelle Messungen detailliert betrachtet. Dies ermöglicht sowohl die Optimierung der Schalldämmeigenschaften als auch die Optimierung des Materialeinsatzes. Erste Ergebnisse zu Simulationen mit Lehmsteinen werden nachfolgend gezeigt.

In Abbildung 3 und Abbildung 4 werden für den Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz die simulierten Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte einander gegenübergestellt. Sowohl für die Steinhöhe 71 mm als auch für die Steinhöhe 142 mm verbessert sich der Norm-Trittschallpegel für alle Frequenzen mit steigender Rohdichte der Lehmsteine. Die Differenz zwischen den Grenzwerten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³ nimmt mit abnehmender Frequenz zu. Bei 500 Hz beträgt der Unterschied 4 dB, während für Frequenzen unterhalb von 200 Hz eine Verbesserung von 8 dB bis 10 dB beobachtet werden kann. Der Betrag der Verbesserung ist auch hier maßgeblich von der Anordnung, dem Material (Rohdichte) und der Dicke der restlichen Bauteilschichten abhängig. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass eine höhere Rohdichte der Beschwerung bei gleichbleibender Schichtdicke in der Regel zu einer Senkung des Norm-Trittschallpegels führt.

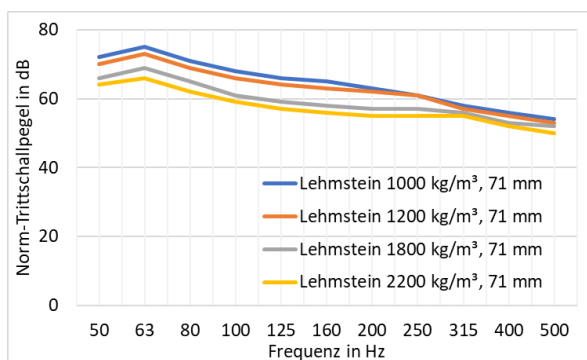


Abbildung 3: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte (Steinhöhe 71 mm)

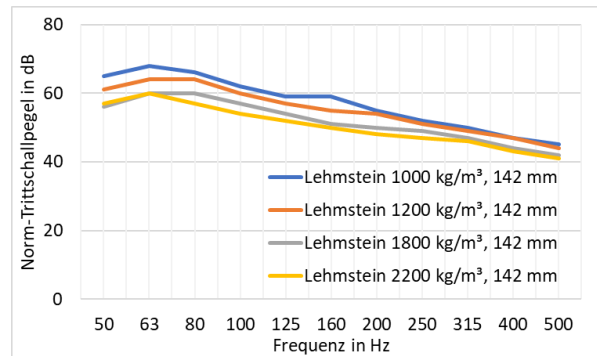


Abbildung 4: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden unterschiedlicher Rohdichte (Steinhöhe 142 mm)

Im nächsten Schritt wurden die Simulationsergebnisse für die beiden Beschwerungsschichtdicken 71 mm und 142 mm miteinander verglichen. Abbildung 5 zeigt dies exemplarisch für die Rohdichten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³. Analog zu den Simulationen mit Betonbeschwerung verbessert sich der Norm-Trittschallpegel für alle Frequenzen bei größerer Schichtdicke. Die größten Verbesserungen liegen auch hier im Frequenzbereich 200 Hz bis 500 Hz und betragen zwischen 8 dB und 9 dB. Unterhalb von 200 Hz sinkt der Norm-Trittschallpegel durch die Verdopplung der Beschwerungsschichtdicke um 5 dB bis 7 dB.

Ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen für die Deckenkonstruktion mit der Lehmsteinbeschwerungsschicht der Rohdichte 1000 kg/m³ und der Dicke 71 mm und den Simulationsergebnissen für die Deckenkonstruktion mit der Lehmsteinbeschwerungsschicht der Rohdichte 2200 kg/m³ und der Dicke 142 mm zeigt deutliche Unterschiede bei den frequenzabhängigen Norm-Trittschallpegeln. Für den gesamten Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz kann für die Simulationen mit der schwereren und dickeren Lehmsteinschicht eine Verbesserung von mindestens 12 dB bei 315 Hz und maximal 15 dB bei 50 Hz, 63 Hz, 160 Hz sowie 200 Hz beobachtet werden. Für den simulierten Deckenaufbau führt die Kombination aus höherer Rohdichte und größerer Dicke der Beschwerungsschicht somit zu einer signifikanten Senkung des Norm-Trittschallpegels und damit zu einer wesentlich höheren Trittschalldämmung im Frequenzbereich 50 Hz bis 500 Hz.

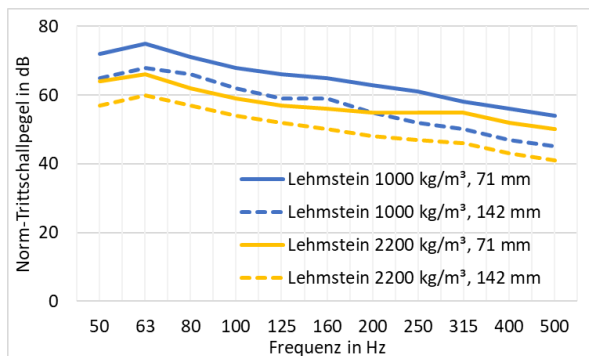


Abbildung 5: Vergleich der Norm-Trittschallpegel für die Deckenauflage mit Lehmsteinbeschwerden der Rohdichten 1000 kg/m³ und 2200 kg/m³ für die Steinhöhen 71 mm und 142 mm

Um aus akustischer Sicht eine erste Aussage zum Einsatz von Lehmsteinen anstelle von Beton zu treffen, können die Simulationsergebnisse für die Betonbeschwerung der Dicke 140 mm und die Simulationsergebnisse für die Lehmsteinbeschwerden der Dicke 142 mm einander gegenübergestellt werden. Für die Lehmsteinbeschwerung mit der höchsten Rohdichte von 2200 kg/m³ ist der Vergleich in Abbildung 6 dargestellt. Wie zu sehen ist, liegen die Norm-Trittschallpegel nahe beieinander. Für den tieffrequenteren Bereich 63 Hz bis 200 Hz liegen die Werte für den Beton um 1 dB bis 2 dB niedriger, während im Frequenzbereich 400 Hz bis 500 Hz die Werte für den Lehmstein um 2 dB niedriger sind.

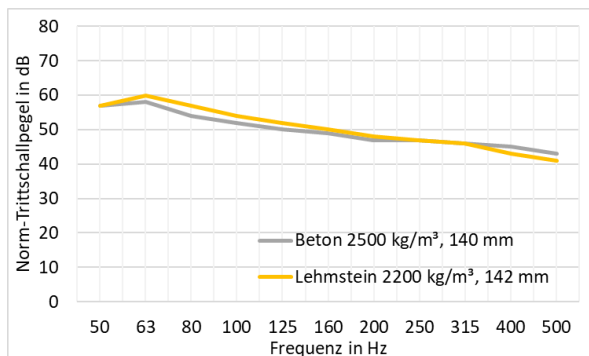


Abbildung 6: Exemplarischer Vergleich zwischen Lehmstein- und Betonbeschwerung

Die geringen Abweichungen lassen vermuten, dass der Lehmstein bei nahezu gleicher Schichtdicke und einer um 300 kg/m³ reduzierten Rohdichte eine realistische Alternative zum Beton darstellt. Im weiteren Forschungsverlauf soll dies durch die Simulation weiterer Deckenkonstruktionen und durch experimentelle Messungen genauer untersucht werden. Dabei wird insbesondere auch das Zusammenspiel der Beschwerungsschicht mit dem restlichen Deckenaufbau näher betrachtet. Zudem werden weitere Untersuchungen mit alternativen Materialien wie Schiefer-, Beton- und Ziegelschüttungen durchgeführt

Experimentelle Messung mit einer Holzdeckenattrappe nach DIN 10140

Parallel zu den simulationstechnischen Analysen begannen im akustischen Deckenprüfstand die Vorbereitungen zur experimentellen Messung der Verbesserung der Trittschalldämmung durch Deckenauflagen bei Montage auf Leichtbau-Rohdecken nach DIN 10140-1 Anhang H [4].

Abbildung 7 zeigt die akustischen Prüfstände an der RPTU, mit dem Deckenprüfstand im rechten Teil der Abbildung. Der akustische Deckenprüfstand besteht aus zwei übereinander liegenden Räumen, welche durch eine fest eingebaute, massive Bezugsdecke nach DIN EN ISO 10140-5 Anhang C2 [4] getrennt sind.

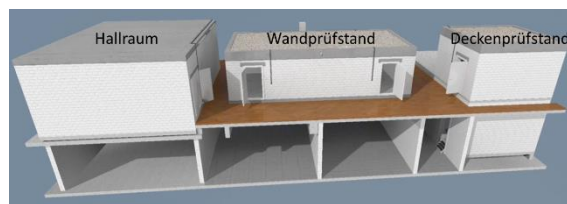


Abbildung 7: Akustische Prüfstände an der RPTU

Zur experimentellen Messung von Deckenauflagen auf Leichtbau-Deckenkonstruktionen sollten diese auf einer Leichtbau-Bezugsdecke und nicht auf einer Massiv-Bezugsdecke montiert werden. Alternativ kann jedoch die Massivdecke in Kombination mit einer Holzdeckenattrappe nach DIN EN ISO 10140-5 Anhang G [4] verwendet werden. Auf deren Aufbau und die damit einhergehende experimentelle Versuchsdurchführung wird im Nachfolgenden näher eingegangen.

Die Holzdeckenattrappe ist eine leichte Oberdecke, die an der vorhandenen massiven Bezugsdecke befestigt wird. Zuvor wird auf der massiven Decke eine dünne Lage elastischen Materials aufgebracht. Das elastische Material gleicht kleinere Unebenheiten aus und stellt dadurch einen vollflächigen Kontakt zwischen Holzdeckenattrappe und massiver Bezugsdecke sicher.

Soll keine bestimmte Leichtbaudecke nachgebildet werden, besteht die Holzdeckenattrappe aus einer 22 mm dicken Spanplatte der Fläche 2 m auf 2,6 m, welche auf 20 Holzfüßen montiert wird. Die Spanplatte muss ein Elastizitätsmodul zwischen 3000 MPa und 3500 MPa und eine Rohdichte zwischen 700 kg/m³ und 900 kg/m³ besitzen. Der Abstand zwischen den äußeren Holzfüßen und den Plattenkanten muss ungefähr 100 mm betragen. Die Holzfüße selbst sind 200 mm hoch, haben einen Querschnitt von 50 mm auf 50 mm und müssen aus Fichtenholz gefertigt werden. Die normativ geforderte feste Verbindung zwischen Spanplatte und Holzfuß wird sowohl durch Verschrauben als auch durch Verkleben erzielt.

Bei Verwendung der Holzdeckenattrappe sind die Messergebnisse des Verfahrens jedoch nur auf

analoge Einbaubedingungen übertragbar. Die Norm erlaubt daher eine Anpassung der Holzdeckenattrappe. Hierzu wird die Spanplatte entfernt und durch eine oder mehrere andere Platten ersetzt, welche den oberen Teil einer beliebigen Leichtbaudecke nachbilden. Dies ermöglicht eine direktere Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen zwischen Deckenauflage und eigentlicher Leichtbaudecke, sodass praxisnahe Werte für die spätere Einbausituation gemessen werden können.

Vor der experimentellen Messdurchführung müssen auf der montierten Holzdeckenattrappe zunächst fünf Gewichte mit einem jeweiligen Gewicht von 20 kg bis maximal 25 kg angeordnet werden. Eines der Gewichte muss in der Mitte der Holzdeckenattrappe und die vier übrigen Gewichte an den Ecken aufgebracht werden. An den Ecken ist dabei ein Abstand von 40 cm zu den Kanten einzuhalten. Die Gewichte sind sowohl bei Messungen mit als auch ohne Deckenauflage zu verwenden. Die Gewichte stehen dabei stellvertretend für eine typische Möblierung.

Umgebungsbedingungen, insbesondere die Temperatur und die Luftfeuchte, können Einfluss auf die akustischen Eigenschaften von Deckenauflagen haben und müssen bei der Messdurchführung beachtet werden. Normativ wird daher auch eine Temperatur zwischen 18°C und 25°C in der Mitte der Deckenoberfläche und die Angabe der Luftfeuchte im Prüfbericht gefordert.

Zur Anregung des Prüfbauteils wird ein Norm-Hammerwerk mit Konfigurationen gemäß DIN EN ISO 10140-5 Anhang E [4] verwendet. Das Norm-Hammerwerk wird an mindestens sechs Positionen aufgestellt, wobei jede Position wenigstens 300 mm zu den aufgebrachten Gewichten und 100 mm zu den Bauteilkanten entfernt sein muss. Die Positionen sind für Messungen mit und ohne Deckenauflage gleich zu wählen. Für jede Hammerwerksposition wird eine eigene Messung des Norm-Trittschallpegels durchgeführt. Gemessen wird der Norm-Trittschallpegel mit Mikrofonen, welche im unteren Raum des akustischen Deckenprüfstandes aufgestellt werden.

Der Norm-Trittschallpegel der Holzdeckenattrappe-Bezugsdecken-Konstruktion wird zunächst ohne Deckenauflage und im Anschluss mit Deckenauflage experimentell bestimmt. Aus deren Differenz ergibt sich nach Gleichung 2 die frequenzabhängige Verbesserung der Trittschalldämmung durch die Deckenauflage in Dezibel.

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (2)$$

ΔL Verbesserung der Trittschalldämmung
 $L_{n,0}$ Norm-Trittschallpegel ohne Deckenauflage
 L_n Norm-Trittschallpegel mit Deckenauflage

Im nächsten Schritt wird aus den experimentell bestimmten, frequenzabhängigen Verbesserungen der Trittschalldämmung die bewertete Trittschallpegelminderung ΔL_w nach den Vorgaben von DIN EN ISO

717-2 [5] bestimmt. Zur Beachtung der akustischen Merkmale typischer Gehgeräuschspektra wird abschließend der Spektrum-Anpassungswert $C_{I,\Delta,t}$ nach DIN EN ISO 717-2 [5] ermittelt. Zur besseren Berücksichtigung des tieffrequenten Bereichs 50 Hz bis 100 Hz wird zusätzlich der Spektrum-Anpassungswert $C_{I,\Delta,t,50-2500}$ bestimmt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Forschungsergebnisse lassen vermuten, dass Lehmsteine der Rohdichte 2200 kg/m³ aus akustischer Sicht eine praktikable Alternative zu Beschwerungen aus Beton sind. Durch die simulationstechnische Analyse weiterer Holzdeckenkonstruktionen mit Lehmsteinbeschwerung und durch experimentelle Messungen soll dies im weiteren Forschungsverlauf detaillierter untersucht werden. Neben Lehmsteinen sollen dabei auch Beton-, Ziegel- und Schieferschüttungen als Alternativen für die Beschwerungsschicht erprobt werden.

Für die Entwicklung der neuen Deckenkonstruktionen sollen verschiedene Deckenauflagen im akustischen Deckenprüfstand der RPTU messtechnisch untersucht werden. Zur weiteren Verbesserung des ökologischen Aspekts sollen die Deckenauflagen möglichst ohne Estrich-Unterboden auskommen. Stattdessen sollen rückbaubare, alternative Materialien verwendet werden. Im Deckenprüfstand der RPTU finden hierzu erste experimentelle Untersuchungen unter Verwendung einer Holzdeckenattrappe statt. Die Holzdeckenattrappe ermöglicht normgerechte Messungen der Trittschallpegelminderung durch die Deckenauflage auch ohne Leichtbau-Bezugsdecke. Parallel werden verschiedene neu entworfene Deckenauflagen simulativ analysiert und verbessert.

Auf Basis der bisherigen Forschungen und umfangreicher Recherchen konnten bereits erste Ansätze für neue ökologisch vorteilhaftere Holzdeckenkonstruktionen entwickelt werden. Diese werden in den nächsten Monaten simulationstechnisch untersucht und schrittweise weiterentwickelt, sodass Prototypen für experimentelle Prüfstandmessungen erstellt werden können.

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts.

Literatur

- [1] *Flieger M.; Hofmann M.; Kornadt O. et al.:* Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer neuartigen Holzleichtbauwand für Schulen. Bauphysik-Kalender. Ernst & Sohn, Berlin, 2022.

- [2] *Flieger, M.; Hofmann, M.; Kornadt, O.:* Experimentelle Messung des Schalldämm-Maßes von Leichtbaukonstruktionen zur Dimensionierung akustisch entkoppelnder Schichten. Bauphysiktag, Kaiserslautern, 2022.
- [3] INSUL Version 9.0 [Software]. Marshall Day Acoustics.
- [4] DIN EN ISO 10140:2021-09, Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand, Beuth Verlag.
- [5] DIN EN ISO 717-2:2021, Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung, Beuth Verlag.