

Schwingungsverhalten und Trittschall bei Holzdecken – ein Zusammenhang?

Patricia Hamm
Institut für Holzbau
Hochschule Biberach
Biberach, Deutschland



Manuel Stuhlinger
best wood SCHNEIDER® GmbH
Eberhardzell, Deutschland



Schwingungsverhalten und Trittschall bei Holzdecken – ein Zusammenhang?

1. Einleitung

Bei der Bemessung von Holzdecken ist oft der Gebrauchstauglichkeitsnachweis, bei längeren Spannweiten der Schwingungsnachweis maßgebend. Bei diesem Schwingungsnachweis geht es um fühlbare Schwingungen, also solche, die nicht gehört, sondern gespürt werden. Bei den hörbaren Schwingungen geht es um Schall. Die Frage, der in diesem Beitrag nachgegangen werden soll, ist, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Schwingungsverhalten (der spürbaren Schwingungen) und den Trittschalleigenschaften gibt.

2. Ausgangssituation

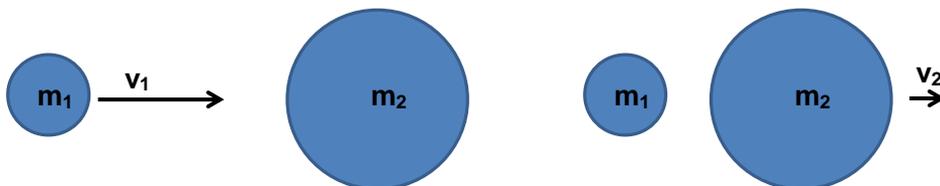
Sowohl bei den fühlbaren Schwingungen als auch beim Schall ist ausreichend Masse ein wesentliches Kriterium. Ein anschaulicher Vergleich ist der mit einer Billardkugel. Je nach Verhältnis der Massen der anstoßenden Kugel (anregende Person) zur angestoßenen Kugel (Decke) ist deren Geschwindigkeit kleiner oder größer, vgl. Abb. 1. Physikalischer Hintergrund ist der Impulserhaltungssatz mit $m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$.

Vor dem Stoß:

Nach dem Stoß:



Kleines m_2 , großes v_2



Großes m_2 , kleines v_2

Abbildung 1: Impulserhaltungssatz

Beim Schallschutz von Holzdecken ist eine hohe Masse ebenfalls ein wichtiges Kriterium.

So kam der Gedanke, ob sich ein Zusammenhang zwischen den Schwingungseigenschaften und dem Trittschallschutz einer Decke formulieren lässt. Ob eine Decke, die gute (Tritt-) Schallschutzeigenschaften besitzt, automatisch ein gutes Schwingungsverhalten aufweist? Mittels Experimenten wurde versucht, diese Frage zu beantworten.

3. Versuche

3.1. Prüfstand für Schallmessungen

Auf dem Firmengelände der best wood SCHNEIDER® GmbH in 88436 Eberhardzell werden wöchentlich unterschiedliche Decken mit unterschiedlichen Deckenaufbauten in einem Prüfstand für Schallmessungen eingebaut, vgl. Abb. 2. Eigentliches Ziel der best wood SCHNEIDER® GmbH ist die schalltechnische Beurteilung dieser Decken.

Die Schwingungsmessungen der Decken (vgl. Abb. 3) konnten an diese Messserie «angedockt» werden, so dass nun bei diesen realen Decken sowohl der Schallschutz als auch das Schwingungsverhalten bekannt sind.



Abbildung 2: Außenansicht des Bauakustik-Prüfstands der best wood SCHNEIDER® GmbH, Eberhardzell.

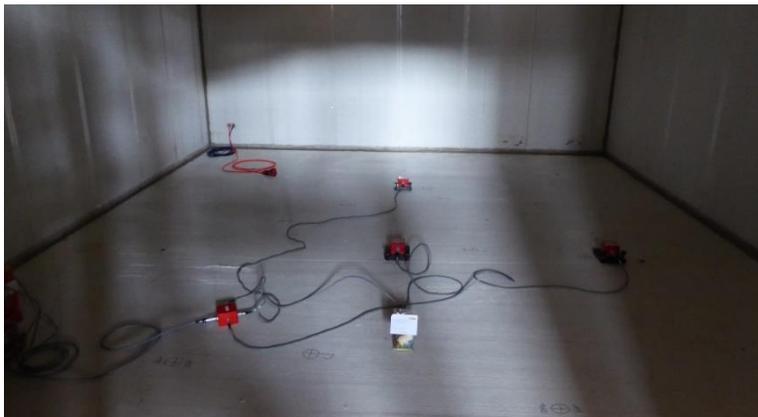


Abbildung 3: Beschleunigungsaufnehmer im Bauakustik-Prüfstand

3.2. Probekörper

Von Beginn der Untersuchungen des Schwingungsverhaltens (im April 2018) bis jetzt wurden folgende Tragkonstruktionen eingebaut und untersucht, vgl. Abb. 4:

- a) Balkendecke
- b) Brettsperrholzdecke (CLT)
- c) Kastendecke (CLT-BOX)

Die Spannweite der Decken ist jeweils 4,61m.

Auf diese Tragkonstruktionen wurden unterschiedliche Aufbauten aufgebracht, z. B. Trockenestrich, Nassestrich, ohne oder mit Schüttung, ungebundene oder gebundene Schüttung, unterschiedliche Dämmungen, unterschiedliche Reihenfolge der Aufbauten.

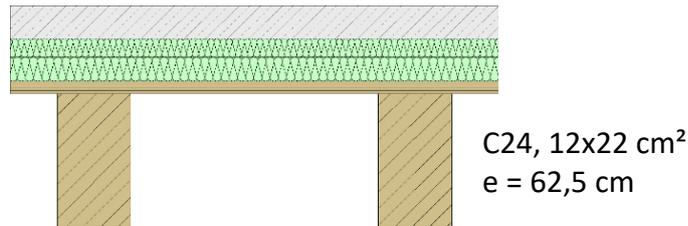
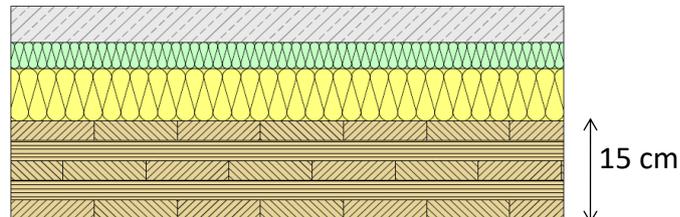
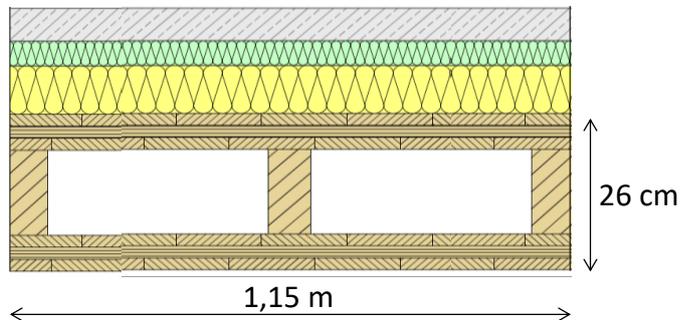
a) Balken**b) Brettsperrholz (CLT)****c) CLT-BOX**

Abbildung 4: Im Prüfstand gemessene Tragkonstruktionen

3.3. Ablauf der Messungen

Das Schalldämm-Maß R_w wurde nach ISO 10140-2 gemessen. Die Bewertung wurde nach ISO 717-1 durchgeführt.

Der Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ wurde nach ISO 10140-3 gemessen und die Bewertung wurde nach ISO 717-2 durchgeführt.

Bei der Schwingungsmessung der fühlbaren Schwingungen wurde wie folgt vorgegangen:

- Zuerst wurde mittels Heeldrop die Decke zu Schwingungen angeregt, so dass die Eigenfrequenz der Decke ($f_{e,gemessen}$) gemessen werden konnte.
- Wenn die Eigenfrequenz kleiner als ca. 8 – 10 Hz war, konnte die Decke in Resonanz mit dem Drittel der Eigenfrequenz angeregt werden. Z. B. bei einer Eigenfrequenz von 9 Hz wurde in der Mitte des Deckenfelds mit einer Schrittfrequenz von 3 Hz «auf der Stelle» gelaufen. Das Ergebnis dieser Messung ist die Beschleunigung in Resonanz ($a_{gemessen}$).
- Auch «Regellooses Gehen» ist Bestandteil der Versuche. Hier wird die «normale Nutzung» der Decke simuliert.
- Zuletzt wird die Decke beurteilt. Es können «Noten» von 1 bis 4 vergeben werden. Note 1 wurde für den Fall vergeben, wenn die Schwingungen so gut wie nicht spürbar waren, Note 4, wenn die Schwingungen deutlich spürbar und störend waren. Bei dieser Beurteilung stellt sich heraus, dass die zuverlässigsten Ergebnisse erzielt werden konnten, wenn der Beurteiler nicht gleichzeitig der Schwingungserreger ist.

4. Berechnungen – am Beispiel der Holzbalkendecke

Für alle Decken und Aufbauten wurden die Eigenfrequenzen und Beschleunigungen (im Resonanzfall) berechnet und der Schwingungsnachweis nach [Hamm, 2017] geführt, vgl. Abb. 5. Exemplarisch wird hier eine Bemessung vorgestellt: Die Balkendecke mit einer Spannweite von $L = 4,61\text{m}$ nach Abb. 4a mit 55mm Zementestrich, beidseitig elastisch gelagert auf je einem IPE 400, Spannweite 6,75m.

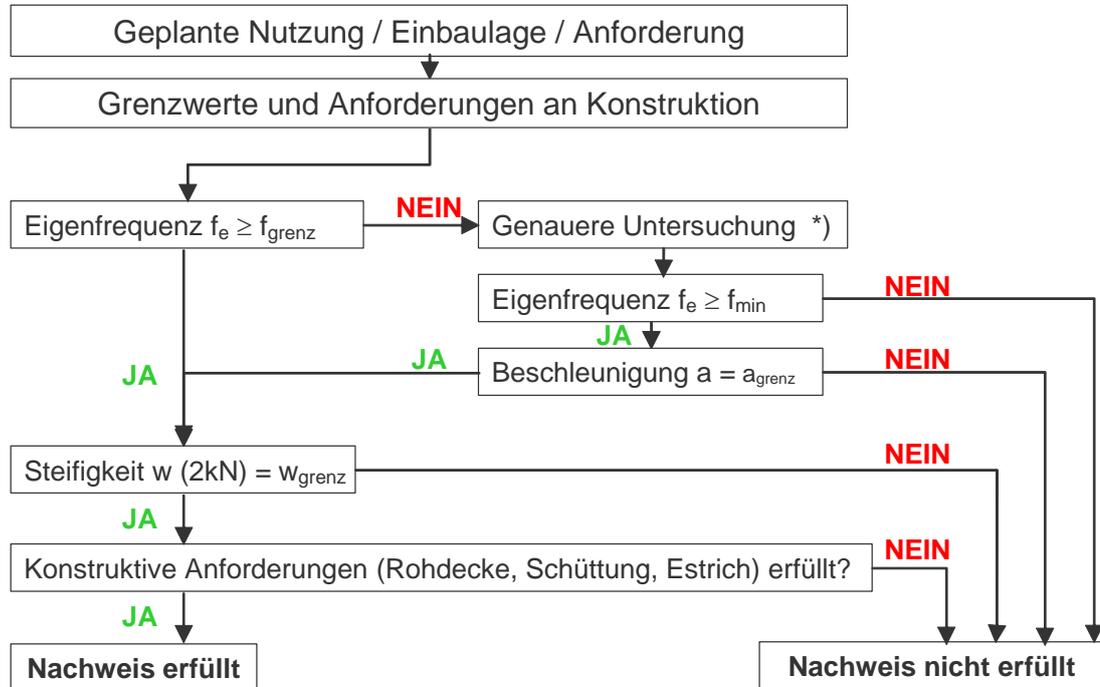


Abbildung 5: Nachweis nach den Konstruktions- und Bemessungsregeln aus dem Forschungsvorhaben [Winter/Hamm/Richter, 2010]

4.1. Eigenfrequenz

Eigenfrequenz der Holzbalken starr gelagert:

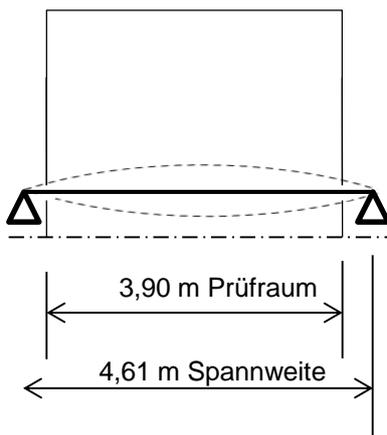


Abbildung 6: Situation Oberer Prüfraum auf Decke

$$f_{e,\text{starr}} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m \cdot e}} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,61^2} \cdot \sqrt{\frac{1,17 \cdot 10^6}{154 \cdot 0,625}} = 8,15 \text{ Hz}$$

Deckenbalken: C24, $b \times h = 12 \times 22 \text{ cm}^2$, $e = 62,5 \text{ cm}$; $L = 4,61 \text{ m}$
 $EI = E_{0,\text{mean}} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} = 11000 \cdot \frac{0,12 \cdot 0,22^3}{12} = 1,17 \text{ MNm}^2$
 $m = 154 \text{ kg/m}^2$

Hinweis: Die Prüfräume sind von der Decke entkoppelt. Die Last des oberen Prüfraums wird von einer externen Konstruktion getragen.

Eigenfrequenz mit Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs:

$$EI_{\text{Estrich}} = 25000 \cdot \frac{1,0 \cdot 0,055^3}{12} = 0,347 \text{ MNm}^2 = EI_{\text{quer}}$$

$$EI_{\text{gesamt}} = \frac{1,17}{0,625} + 0,347 = 1,87 + 0,347 = 2,22 \text{ MNm}^2 = EI_{\text{längs}}$$

$$f_{e,\text{Decke+Estrich}} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{gesamt}}}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,61^2} \cdot \sqrt{\frac{2,22 \cdot 10^6}{154}} = 8,9 \text{ Hz}$$

Eigenfrequenz der Unterzüge, Stahlträger (IPE 400):

Die Decke ist beidseitig nachgiebig auf Stahlträger gelagert, vgl. Abb. 7 und 8. In [Hamm, 2008] wird eine Methode hergeleitet und vorgestellt, wie die resultierende Eigenfrequenz aus den Deckenbalken und den Unterzügen näherungsweise berechnet werden kann. Dazu ist die Berechnung der beiden starr gelagerten Eigenfrequenzen, der Decke $f_{e,\text{Decke+Estrich}}$ und des Unterzugs $f_{e,\text{UZ}}$ erforderlich.

$$f_{e,\text{UZ}} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m \cdot e}} = \frac{\pi}{2 \cdot 6,75^2} \cdot \sqrt{\frac{4,857 \cdot 10^7}{420,5}} = 11,7 \text{ Hz}$$

$$EI_{\text{UZ}} = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 23130 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 = 4,857 \cdot 10^7 \text{ Nm}^2$$

$$m = 154 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 4,6 \text{ m} \cdot \frac{1}{2} + 66,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 354,2 + 66,3 = 420,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$



IPE 400, L = 6,75m

Abbildung 7: Situation Lagerung der Decke auf dem Stahlträger und dessen Eigenform.

Resultierende Eigenfrequenz:

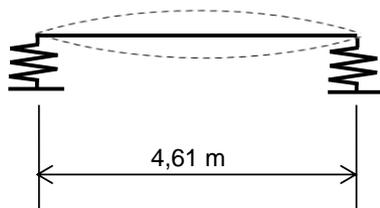


Abbildung 8: Elastische Lagerung der Decke auf dem Stahlträger.

$$f_{e,\text{Res}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{e,\text{Decke+Estrich}}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{e,\text{UZ}}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{e,\text{UZ}}^2}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{e,\text{Estrich}}^2} + \frac{2}{3 \cdot f_{e,\text{UZ}}^2}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{8,9^2} + \frac{2}{3 \cdot 11,7^2}}} = 7,6 \text{ Hz}$$

Nachweis: $f_{e,Res} = 7,6 \text{ Hz} \leq 8 \text{ Hz} \rightarrow$ Für MFH ist ein genauere Nachweis (Beschleunigung) erforderlich. $f_{e,Res} \geq 6 \text{ Hz} \rightarrow$ NW für übliches EFH erfüllt.

Vergleich mit Messung: $f_{e,gemessen} = 7,8 \text{ Hz}$

4.2. Genauere Untersuchung – Beschleunigung in Resonanz

Die Gleichung für die Berechnung der Beschleunigung im Resonanzfall sowie die Parameter a und D finden sich z. B. in [Winter/Hamm/Richter, 2010].

$$a = \frac{F}{M^* \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot \alpha_3 \cdot G}{m \cdot 0,5 \cdot L \cdot 0,5 \cdot B \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot 0,1 \cdot 700}{154 \cdot 0,5 \cdot 4,61 \cdot 0,5 \cdot 5,0 \cdot 2 \cdot 0,03} = 0,52 \frac{m}{s^2}$$

Fourierkoeffizient für die 3. Harmonische: $\alpha_3 = 0,1$

Gewichtskraft Testperson (nach EC5): $G = 700 \text{ N}$

Mitschwingende Masse: $M^* = m \cdot 0,5 \cdot L \cdot 0,5 \cdot B$

Dämpfung für Holzbalkendecken mit schwimmendem Estrich: $D = 3 \%$.

Nachweis: $a = 0,52 \frac{m}{s^2} \geq 0,05 \frac{m}{s^2} \rightarrow$ NW für MFH nicht erfüllt.

Vergleich mit Messung: $a_{gemessen} = 0,58 \frac{m}{s^2}$

4.3. Steifigkeit – Durchbiegung unter Einzellast

Durchbiegung der starr gelagerten Deckenbalken:

$$w(2\text{kN}) = \frac{2\text{kN} \cdot L^3}{48 \cdot EI_{\text{Längs}} \cdot b_{\text{ef}}} = \frac{2\text{kN} \cdot 4,61^3}{48 \cdot 2,22 \cdot 2,64} = 0,70 \text{ mm} = w_{\text{Balken}}$$

Mit einer mittragenden Breite von:

$$b_{\text{ef}} = \frac{L}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{\text{quer}}}{EI_{\text{längs}}}} = \frac{4,61}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{0,347}{2,22}} = 2,64 \text{ m}$$

Durchbiegung der Unterzüge unter 1 kN:

$$w(1\text{kN}) = \frac{1\text{kN} \cdot L^3}{48 \cdot EI_{\text{UZ}}} = \frac{1\text{kN} \cdot 6,75^3 \text{ m}^3}{48 \cdot 4,857 \cdot 10^7 \text{ Nm}^2} = 0,13 \text{ mm} = w_{\text{UZ}}$$

Überlagerung der Durchbiegungen:

$$w(2\text{kN})_{\text{Res}} = w_{\text{UZ}} + w_{\text{Balken}} = 0,13 + 0,70 = 0,83 \text{ mm}$$

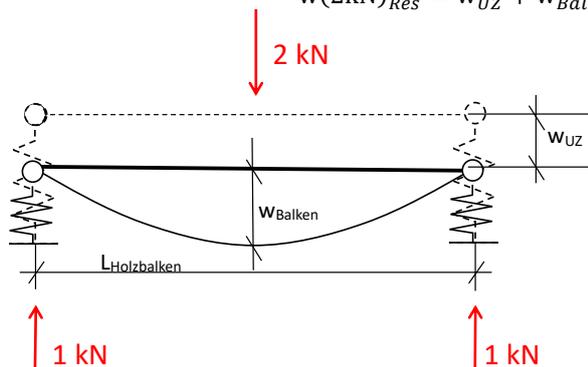


Abbildung 9: Durchbiegung unter Einzellast bei Decke und Stahlträger.

Nachweis: $w(2\text{kN})_{\text{Res}} = 0,83 \text{ mm} \geq 0,5 \text{ mm} \rightarrow$ NW für MFH nicht erfüllt.

$w(2\text{kN})_{\text{Res}} = 0,83 \text{ mm} \leq 1,0 \text{ mm} \rightarrow$ NW für übliches EFH erfüllt.

4.4. Konstruktive Anforderungen

Der letzte Nachweis ist die Überprüfung der konstruktiven Anforderungen nach Tabelle 1 (aus [Hamm, 2017]). In diesem Beispiel handelt es sich um eine Holzbalkendecke mit schwimmendem Nassestrich ohne Schüttung. Damit ist die Anforderung für die Bewertung 1,5 bis 2,5 (übliches Einfamilienhaus) erfüllt. NW für MFH ist nicht erfüllt.

Tabelle 1: Konstruktive Anforderung je nach Art der Rohdecke, Einbaulage und Bewertung

Art der Rohdecke	Art des Estrichs	Anforderung an Aufbau bei Bewertung 1,0 bis 1,5 (MFH)	Anforderung an Aufbau bei Bewertung 1,5 bis 2,5 (EFH)
Flächige Massivholzdecken (Brettsperrholz-, Brettstapeldecken)	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer oder leichter Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung *)	schwimmend auf schwerer Schüttung *)
Holzbalkendecken oder Trägerroste	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	nicht möglich	schwimmend auf schwerer Schüttung

*) ... bis jetzt nur im Labor getestet.

4.5. Subjektiver Eindruck

Die subjektive Einschätzung des Schwingungsverhaltens dieser Decke ist schlechter als die rechnerischen Werte: Die Schwingungen waren spürbar und störend.

Auch der subjektive Eindruck bei der Schallmessung war sehr schlecht, da der durch das Norm-Hammerwerk erzeugte Körperschall im Empfangsraum als deutlich hörbar und störend wahrgenommen wurde.

4.6. Ergebnis der Schallmessungen

Das Ergebnis der Schallmessung im Labor liegt ohne Betrachtung der Flankenwege schon deutlich über ($L_{n,w}$) bzw. unter (R_w) den Mindestanforderungen für MFH und ist somit bestenfalls für Decken im eigenen Wohnbereich ohne Schallschutzanforderungen geeignet.

5. Weitere Messungen

Bei zwei Messungen ist die Tragkonstruktion eine Holzbalkendecke nach Abb. 4a. Die Aufbauten sind Nassestriche ohne Schüttung, d.h. nach Tab. 1 für übliche EFH geeignet. Sie weisen rechnerisch gute Ergebnisse auf (für übliche EFH geeignet), subjektiv und nach Schallmessung fallen sie schlecht aus, vgl. Rechenbeispiel im Kapitel 4.

Bei den folgenden Messungen ist die Tragkonstruktion eine Brettsperrholzdecke nach Abb. 4b. Die meisten Aufbauten sind mit Schüttung und Nassestrich, also auch für MFH geeignet. Die rechnerischen Werte der Schwingungsuntersuchung, sowie die Messergebnisse der Schwingungs- und Schallmessungen sind nicht für MFH, sondern nur für übliche EFH geeignet.

Ausnahmen bei den Aufbauten sind:

- der Aufbau ohne Schüttung.
- die Rohdecke
- der Aufbau mit Trockenestrich.

Das führt jeweils zu schlechten Schallschutzwerten. Die rechnerischen Schwingungskriterien bleiben jeweils in der Kategorie «EFH», außer bei der Rohdecke: Hier wird die Frequenz größer als 8 Hz, also für MFH geeignet, allerdings sind die konstruktiven Anforderung nicht mehr erfüllt.

Bei den letzten Messungen ist die Tragkonstruktion eine Kastendecke nach Abb. 4c. Die Kastendecke, CLT-BOX mit 26cm Höhe, hat bei gleichem Materialverbrauch wie die CLT-

Decke (15cm Höhe) eine deutlich größere Biegesteifigkeit. Dadurch sind die rechnerischen Kriterien an den Schwingungsnachweis auch für MFH erfüllt. Die subjektive Wahrnehmung ist hier gut bis sehr gut.

6. Vorläufige Ergebnisse

In der Tendenz nützen viel Masse durch die Schüttung und den Nassestrich sowie eine hohe Steifigkeit in der Tragkonstruktion beiden Nachweisen, Schwingungen und Schall. Nach derzeitiger Datenlage ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen gutem Schallschutz- und gutem Schwingungsverhalten nicht ablesbar.

7. Danksagung

Diese Untersuchungen sind nur durch die Unterstützung der best wood SCHNEIDER® GmbH in Eberhardzell möglich geworden. Die Autorin möchte sich für die zur Verfügung Stellung der Versuchsflächen, des Materials für die Versuchskörper, der Infrastruktur, den Personaleinsatz für die Ein- und Umbauten und natürlich für die zur Verfügung Stellung der Ergebnisse der Schallmessung ausdrücklich bei der best wood SCHNEIDER® GmbH bedanken.

Weiterhin ist an dieser Stelle auch den Tutoren Jenny Heinzmann und Fabian Bader gedankt, die in den letzten Monaten regelmäßig die Schwingungsmessungen durchgeführt haben.

8. Literatur

DIN 4109-1:2018-01 Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen.

DIN 4109-33:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau.

DIN EN ISO 10140-2:2010-12 Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung.

DIN EN ISO 10140-3:2015-11 Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 3: Messung der Trittschalldämmung.

DIN EN ISO 717-1:2013-06 Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung.

DIN EN ISO 717-2:2013-06 Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 2: Trittschalldämmung.

[Eurocode 5: 2010]

Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Dez. 2010.

[Eurocode 5: 2013 / NA - D]

Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.* August 2013.

[Hamm, 2008]:

Hamm, Patricia: *Schwingungsverhalten von Decken bei Auflagerung auf Unterzügen.* In: holzbau, die neue quadriga. 1/2008. S. 41-46.

[Hamm, 2017]:

Hamm, P.: *Schwingungsnachweise von Holzdecken auf Unterzügen.* In: 8. HolzBauSpezial | Bauphysik. 2017. Bad Wörishofen. März 2017. Hrsg.: Forum-Holzbau, CH-Biel.

[Winter/Hamm/Richter, 2010]:

Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.: *Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht Juli 2010.* TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Forschungsvorhaben gefördert aus den Haushaltsmitteln des BMWA über die AiF.