

Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109

Robert Zehetmayr
ig-bauphysik GmbH & Co. KG
Hohenbrunn, Deutschland



Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109

1. Einleitung

Mit der Einführung der DIN 4109:2016 [1] wurde die Nachweisführung im Holzbau wesentlich verbessert, in der nun baurechtlich eingeführten DIN 4109: 2018 [3] wurden lediglich die Anforderungen an einzelne Bauteile angepasst.

Im Folgenden soll dieses grundlegende Nachweisverfahren sowie dessen Grenzen aufgezeigt werden. Hiervon ausgehend, werden aktuelle Planungsmöglichkeiten und differenzierte Prognosemodelle vorgestellt, um das Nachweisverfahren zu erweitern. Hierbei wird besonders der Holzmassivbau betrachtet, da dieser in der DIN 4109 [3] eine unzureichende Berücksichtigung findet. Letztlich soll ein Ausblick auf die frequenzabhängige Prognose von Holzmassivbauteilen erfolgen.

2. Nachweis nach DIN 4109

2.1. Anforderungen und Zielwerte für den erhöhten Schallschutz

Der Einsatzbereich von Trenndecken in Holzbauweise erstreckt sich von Wohnungstrenndecken in Zweifamilienhäusern über Mehrfamilienhäuser bis hin zu Schul- und Bürogebäuden sowie Krankenhäusern und Beherbergungsstätten. An diese werden neben den statischen sowie thermischen und brandschutztechnischen Anforderungen auch solche des Schallschutzes in Abhängigkeiten der Gebäudenutzung gestellt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Auszug von Anforderungen an Trenndecken nach DIN 4109: 2018, in Abhängigkeit der Nutzung

Bauteil	Anforderungen 2018	
Wohnungstrenndecken	erf. $R'_w \geq 54$ dB	zul. $L'_{n,w} \leq 50$ dB ^{a),b),c)}
Decken zwischen Unterrichtsräumen in Schulen u.ä.	erf. $R'_w \geq 55$ dB	zul. $L'_{n,w} \leq 53$ dB
Decken zwischen „lauten“ Räumen und Unterrichtsräumen	erf. $R'_w \geq 55$ dB ^{d)}	zul. $L'_{n,w} \leq 46$ dB

^{a)} Trenndecken in Bürogebäuden, Bestandsgebäuden (Sanierung) und Zweifamilienhäusern mit Leichtbaudecken: zul. $L'_{n,w} \leq 53$ dB

^{b)} Im Falle von baulichen Änderungen von vor 1. Juli 2016 fertiggestellten Gebäuden liegt die Anforderung bei $L'_{n,w} \leq 53$ dB.

^{c)} Beim Neubau von Gebäuden mit Deckenkonstruktionen, die [2] zuzuordnen sind, liegt die Anforderung bei $L'_{n,w} \leq 53$ dB.

^{d)} Sporthallen und Werkräumen: erf. $R'_w \geq 60$ dB

Neben den Mindestanforderungen, werden durch die neue DIN 4109-5 [4] nun auch Anforderungen für den erhöhten Schallschutz zur Verfügung gestellt. Diese orientieren sich grundsätzlich an einer wahrnehmbaren Erhöhung des Schallschutzes von 3 dB bei Luftschalldämmung und einer Verminderung des Trittschallpegels um 5 dB. Darüber hinaus bietet das Beiblatt 2 nach DIN 4109:1989 [9], aber auch die VDI 4100 [7] weitere Empfehlungen für einen erhöhten Schallschutz.

Baurechtlich geschuldet wird in erster Linie nur der Mindestschallschutz nach DIN 4109. Im Zuge der Planung ist daher der Bauherr darüber zu informieren, welches Schallschutzniveau er mit den Mindestanforderungen zu erwarten hat und welche Zielwerte darüber hinaus erreicht werden könnten. Eine ausreichende Aufklärung ist besonders wichtig, da der Bauherr in der Regel irrtümlicher Weise davon ausgeht, dass die Geräusche seines Nachbarn durch die Anwendung der Mindestanforderungen nach DIN 4109 nicht hörbar sind. Dies entspricht jedoch nicht dem Anspruch der Mindestanforderungen, die lediglich einen Schutz vor unzumutbaren Übertragungen aus fremden Nutzungseinheiten gewährleisten soll. Zum Zwecke der Aufklärung bietet die VDI 4100 Anhaltswerte für die subjektive Empfindung von

Schalldämmung zur Nachbarwohnung in Abhängigkeit von verschiedenen Schallschutzniveaus. Zusätzlich wird der Planer bei seiner Aufklärung mit dem Kunden durch die DEGA Empfehlung [10] mithilfe einer orientierenden Beschreibung der subjektiven Wahrnehmbarkeit von üblichen Geräuschen aus benachbarten Wohneinheiten unterstützt. Werden im privatrechtlichen Bereich erhöhte Zielwerte vereinbart, ist dies unbedingt vertraglich festzuhalten.



Abbildung 1: Wahrnehmung von Geräuschen aus Nachbarwohnung in Anlehnung an [7], [10]

Unabhängig von der Bauweise werden Bauvorhaben, die rein durch anspruchsvolle Zielwerte an $L'_{n,w}$ und R'_w dafür sorgen sollen, dass der Nachbar nicht wahrnehmbar ist, unwirtschaftlich. Wie umfangreiche Untersuchungen in verschiedenen europäischen Ländern gezeigt haben, ist es daher sinnvoller die Zielwerte der einzelnen Bauteilwerte inklusive der Spektrumanpassungswerte im erweiterten Frequenzbereich festzulegen [11]–[18].

2.2. Schalltechnische Planung von Holzdecken nach DIN 4109

In der bauakustischen Planung von Bauvorhaben hat sich für die Leistungsphasen 1–3 folgende Vorgehensweise in der Praxis bewährt.

Schallschutzkonzept

- Beratung und Festlegung der Zielwerte mit dem Bauherren nach DIN 4109 sowie oben genannter Literatur für Anforderungen an den erhöhten Schallschutz nach [4], [7], [9] oder [10].
- Auswahl geeigneter Deckenkonstruktion mithilfe von Datenbanken, herstellereigenen Aufbauten (AbP, Prüfzeugnis) oder Bauteilkatalogen (Schallschutz im Holzbau) [11].
- Beurteilung der Decke im tieffrequenten Bereich ($L_{n,w} + C_{l,50-2500} \leq 53$ dB oder $L_{n,w} + C_{l,50-2500} \leq 46$ dB) [11].

Schallschutznachweis

- Berechnung des Trittschalls (bewerteter Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$) nach Formel (1), hierbei sind die Korrektursummanden K_1 und K_2 den Angaben aus [3] zu entnehmen.

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_1 + K_2 \quad (1)$$

- Berechnung des Luftschalls (bewertetes Luftschalldämm-Mass R'_w) nach Formel (2) aus dem bewerteten Luftschalldämm-Mass der Decke R_w und dem Flankenschalldämm-Mass $R_{Ff,w}$ nach Formel (3)¹ mit der Trennfläche S_s und der Kantenlänge l_f .

$$R'_w = -10 \lg \left(10^{-0,1 R_w} + \sum_{f=f_1}^n 10^{-0,1 R_{Ff,w}} \right) \quad (2)$$

$$R_{Ff,w} = 67 + 10 \lg \left(\frac{S_s}{10 \text{ m}^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{4,5 \text{ m}}{l_f} \right) \quad (3)$$

¹ Für die Berechnung des Flankendämm-Maßes $R_{Ff,w}$ nach Gleichung (3) darf für Holzständerwände und Montagewände (C-Profil-Wände), die durch die Decke vollständig unterbrochen werden, ein $D_{n,f,w} = 67$ dB verwendet werden [2].

- Der Nachweis nach DIN 4109 [3] erfolgt letztlich anhand Formel (4).

$$R'_{w} - 2 \text{ dB} \geq \text{erf. } R'_{w} \quad \text{Bzw.} \quad L'_{\{n,w\}} + 3 \text{ dB} \leq \text{zul. } L'_{\{n,w\}} \quad (4)$$

Grenzen der DIN 4109

Das vorgestellte Verfahren zeichnet sich durch geringen Planungs- und Zeitaufwand aus und führt bei Standardkonstruktionen schnell zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Hierbei ist besonders auf die Beurteilung der tiefen Frequenzen hinzuweisen, durch die sichergestellt wird, dass der Nutzer nicht durch zu starke Trittschallübertragungen gestört wird. Dennoch weist das Verfahren deutliche Lücken auf, denen durch aktuelle Forschungen Rechnung getragen wird oder durch diese noch zu schliessen sind. Insbesondere sind folgende Punkte zu nennen:

Deckenkonstruktionen

- Die Bauteilsammlungen der Bauteilkataloge der DIN 4109 [2] wurden im Wesentlichen 2004 abgeschlossen und sind somit bereits 17 Jahre alt. Zudem sind viele dieser möglichen Wohnungstrenndecken unwirtschaftlich. Deutliche Weiterentwicklung erfolgte vor allem bei den Holzmassivdecken wie auch bei Deckenkonstruktionen für die Altbausanierung. Eine aktuelle Bauteilsammlung ist [11] zu entnehmen, welche derzeit in den Bauteilkatalog der DIN 4109 [2] eingearbeitet wird.

Trittschallberechnung

- Die Berücksichtigung von Unterdecken an Holzmassivdecken durch die Korrektursummanden K_1 und K_2 ist noch nicht möglich. Zudem fehlen Werte für die Berücksichtigung von zusätzlichen Beplankungen oder Installationsebenen an flankierenden Wänden. Diese Umstände werden derzeit im Forschungsprojekt *Vertikale Flankenübertragung von Holz(ständer)wänden* am ift-Rosenheim untersucht.
- Das oben gezeigte Verfahren legt einen Raum mit vier gleichartigen Wänden zu Grunde. Die Berechnung mit unterschiedlichen Wänden erfolgt auf der sicheren Seite durch Auswahl der schlechtesten Variante. In diesem Bereich ist eine differenzierte Berücksichtigung notwendig.
- Zudem fehlen Angaben zu Korrektursummanden für die diagonale und horizontale Übertragung.

Luftschallberechnung

- Mithilfe der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w} = 67 \text{ dB}$ nach [3] werden nur flankierende Holzrahmenwände und Montagewände (Trockenbau C-Profil-Wände) abgedeckt, welche durch die Decke vollständig getrennt werden. Sie ist nicht auf durchlaufende Wände (balloon framing) anwendbar.
- Der Nachweis von flankierenden Wänden in Holzmassivbauweise ist derzeit nicht möglich. Auf Grund der stärkeren Kopplung dieser Bauteilart sollten die gemischten Übertragungswege F_d und D_f berücksichtigt werden. Im Zuge der Überarbeitung des Bauteilkataloges der DIN 4109 [2] soll mithilfe der Ergebnisse aus [22] und [23] die Flankenberechnung ergänzt werden, wodurch ihre Berechnung anhand des Stossstellendämm-Masses K_{ij} ermöglicht wird [32].

Trenndecken als flankierendes Bauteil

- Wird eine Trennwand-Situation schalltechnisch beurteilt, fungiert die Decke als flankierendes Bauteil. In diesem Fall ist es von Vorteil, wenn die Decke im Bereich der Trennwand unterbrochen wird. In vielen Situationen ist dies aus wirtschaftlichen oder statischen Gründen nicht realisierbar. Da eine durchlaufende Decke die Schalldämmung jedoch massgeblich beeinflussen kann, ist einer solchen Konstruktion eine gute Planung voranzustellen. In der DIN 4109 fehlen bislang Angaben zu solchen Situationen.

3. Differenziertes Prognosemodell

Um Holzbausituationen mit unterschiedlichen flankierenden Wänden und Decken oder etwaigen Zusatzmassnahmen (zusätzliche Beplankungen, Installationsebene oder Elastomere) im Planungsprozess prognostizieren zu können, ermöglicht die DIN EN ISO 12354-1 bis 2 ([5], [6]) ein differenziertes Verfahren. Hierdurch lassen sich auch flankierende Massivholzdecken betrachten, für die derzeit Planungsdaten im Bauteilkatalog der DIN 4109 fehlen.

Während sich die Flankenberechnung im Holzbau nach [3] auf die Norm-Flankenpegeldifferenz und somit auf den Übertragungsweg Ff begrenzt, differenziert die ISO 12354 die Übertragung in die in Abbildung 2 dargestellten Übertragungswege. Für den Luftschall werden die Wege ij = Ff sowie Fd und Df berücksichtigt. Für den Trittschall wird neben dem bewerteten Norm Trittschallpegel der Decke Dd nur die Flankenübertragung über den Weg ij = Df berücksichtigt. Die daraus resultierenden Prognosen im Holzbau weisen starke Ungenauigkeiten auf, weshalb es sinnvoll ist, den ergänzenden Übertragungsweg DFF (Übertragung durch den Estrich in das flankierende Bauteil im Senderaum und Abstrahlung durch das flankierende Bauteil im Empfangsraum) zu berücksichtigen [19].

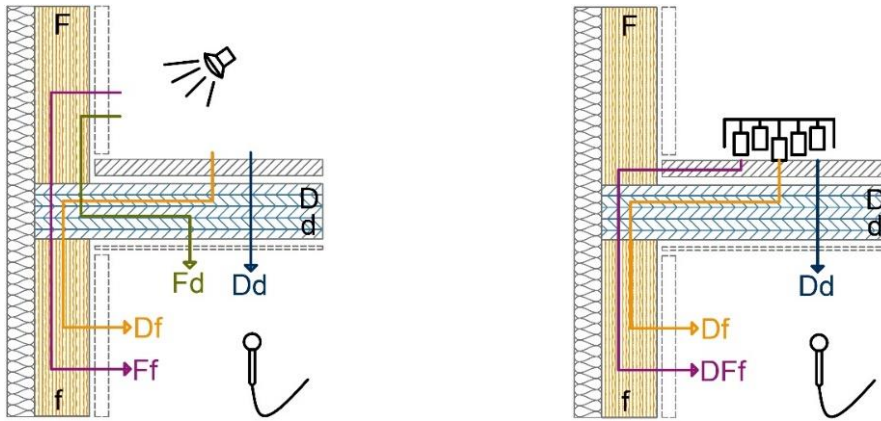


Abbildung 2: Schematische Darstellung der direkten (Dd) und flankierenden Schallübertragungswege (Ff, Fd, Df, DFF) im Holzbau anhand einer Trenndecke. Links: Luftschallübertragung, Rechts: Trittschallübertragung

Somit ergeben sich aus dem Bauteilwert der Decke und der summativen Betrachtung der flankierenden Übertragungen die Planungswerte unter Baubedingungen $L'_{n,w}$ und R'_w , wie Formel (5) und (6) zeigen.

$$L'_{n,w} = 10 \lg \left(10^{0,1 L_{n,w}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{0,1 L_{n,ij,w}} \right) \quad (5)$$

$$R'_w = -10 \lg \left(10^{-0,1 R_w} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-0,1 R_{ij,w}} \right) \quad (6)$$

In [22] wird gezeigt, dass die in DIN 4109 und ISO 12354 aufgeführten Rechenverfahren für Massivbauteile ebenfalls auf den Holzmassivbau sinnvoll angewendet werden können. Hierbei setzt sich die Berechnung der flankierenden Übertragung nach Formel (7) und (8) aus dem äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,eq,0,w}$, der bewerteten Trittschallminderung ΔL_w , dem Schalldämm-Mass der Decke oder der flankierenden Wände ($R_{i,w}, R_{j,w}$), der Verbesserung durch Vorsatzschalen ($\Delta R_{ij,w}$) sowie dem Stossstellendämm-Mass (K_{ij}) der jeweiligen Übertragungswege ij zusammen und bezieht sich dabei auf die gemeinsame Trennfläche (S_s) sowie die gemeinsame Kantenlänge (l_f).

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} - \Delta R_{ij,w} - K_{ij} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad (7)$$

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad (8)$$

Auf Grund der starken Inhomogenität von Holzbalkendecken sowie Holzrahmenbauteilen sind die Formeln (7) und (8) jedoch nicht anwendbar und müssen nach wie vor auf Grundlage von Labormesswerten ermittelt werden (siehe Formel (9) und (10)).

3.1. Schalltechnische Prognose für Holzdecken

Für Eingangsdaten können neben der Verwendung von Bauteilkennwerten aus Bauteilkatalogen und Datenbanken auch solche aus Labormessungen verwendet werden. Insbesondere für Holzrahmenbauteile und Holzbalkendecken, ist die Bausituation durch Messung des Trittschallpegels flankierender Bauteile $L_{n,ij,lab,w}$ zu charakterisieren. Diese ermittelt sich anhand des gleichen Verfahrens wie die Messung der Korrektursummanden K_1 und K_2 in [3]. Hierbei ist es möglich, gegebenenfalls vorhandene Vorsatzschalen $\Delta R_{ij,w}$ und Entkopplungen im Deckenstoss ΔK_{ij} zu berücksichtigen.

$$L_{n,Df,w} = L_{n,Df,lab,w} - \Delta R_{ij,w} - \Delta K_{ij} - 10 \lg \left(\frac{S_j}{l_0 l_{ij}} \right) \quad (9)$$

$$L_{n,DFf,w} = L_{n,DFf,lab,w} - \Delta R_{ij,w} - \Delta K_{ij} - 10 \lg \left(\frac{S_j}{l_0 l_{ij}} \right)$$

Liegen keine Messdaten für $L_{n,Df,lab,w}$ vor, kann dieser anhand des K_1 Korrektursummanden gemäss Formel (10) ermittelt werden.

$$L_{n,Df,lab,w} = 10 \lg \left(10^{0,1(L_{n,d,w}+K_1)} - 10^{0,1 L_{n,d,w}} \right) \quad (10)$$

Die Bestimmung von $L_{n,DFf,lab,w}$ ohne Laborwerte ist, in Abhängigkeit der Konstruktion, mit Hilfe der Tabelle für K_2 nach [3] zu realisieren.

In Hinsicht auf die Luftschallanregung berechnet sich das bewertete Flankendämm-Mass $R_{ij,w}$ für die vertikale Übertragung von flankierenden Holzrahmenbauwänden und horizontale Übertragung flankierender Holzbalkendecken durch Ermittlung der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$, welche entweder messtechnisch bestimmt oder aus dem Bauteilkatalog [2] entnommen wird.

$$R_{Ff,w} = D_{n,f,w} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{10 m} \right) + 10 \lg \left(\frac{4,5 m}{l_f} \right) \quad (11)$$

Liegen zusätzliche Vorsatzschalen vor, kann das Flankenschalldämm-Mass um die Verbesserung $\Delta R_{Ff,w}$ erhöht werden.

Die Berechnung der Flankenübertragung durch Massivholzwände und – decken erfolgt nach Formel (8).

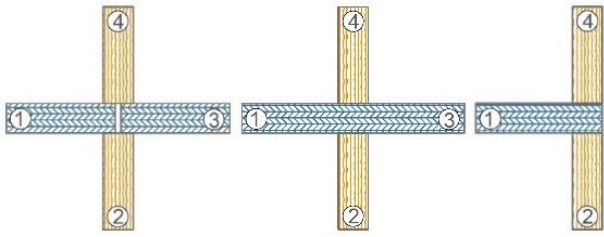
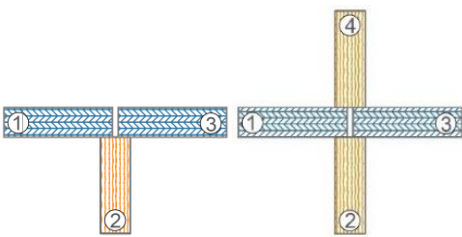
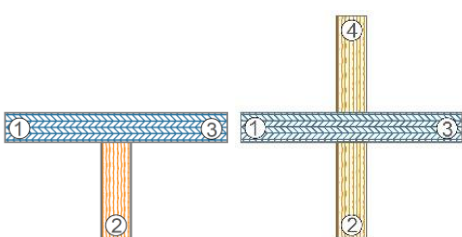
3.2. Stossstellen für Massivholzelemente

Die Charakterisierung der Stossstelle erfolgt anhand des Stossstellendämm-Masses K_{ij} . Die Ermittlung dieser Grösse kann anhand zwei verschiedener Ansätze erfolgen.

Die erste Möglichkeit der Stossstellenberechnung liefern die empirischen Angaben der DIN EN ISO 12354-1:2017-11 - Anhang E3. Für Holzmassivbau-Konstruktionen ist zwischen Kreuz- und T-Stoss zu unterscheiden. Es wird jedoch nur der Fall eines Durchlaufenden Deckenelementes abgebildet

Der zweite Ansatz ist die Verwendung aktueller Forschungsergebnisse auf Grundlage des Projektes «Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten» [22]. Massgebliche Aufgabe hierbei war die Ermittlung von Stossstellendämm-Massen von verschiedenen Massivholz-Bauteilstössen. Diese wurden mit verschiedenen Herstellern in realistischer Grösse unter Laborbedingungen gemessen und K_{ij} nach DIN EN ISO 10848 [8] ermittelt. Ergänzend hierzu wurden Messdaten vergleichbarer Aufbauten aus europäischen und kanadischen Instituten zusammengetragen und ausgewertet [23] [21]. Hierbei ist, nach aktuellem Stand der Forschung, das Massenverhältnis M in der Betrachtung der Bauteilkopplung von entscheidender Bedeutung. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich nun auch getrennte Deckenelemente betrachten.

Tabelle 2: Berechnung der Stossstellenmasse von Massivholzkonstruktionen nach [21]

Vertikale Übertragung übereinander liegender Bauteile	
	$ \begin{aligned} K_{Ff} &= K_{42} = 21 + 4M + 3M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Fd} &= K_{41} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Df} &= K_{12} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \end{aligned} \quad (12) $
Horizontale Übertragung nebeneinander liegender Räume mit getrenntem Deckenelement	
	$ \begin{aligned} K_{Ff} &= K_{42} = 12 + 10M + 11M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Fd} &= K_{41} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Df} &= K_{12} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \end{aligned} \quad (13) $
Horizontale Übertragung nebeneinander liegender Räume mit durchlaufendem Deckenelement	
	$ \begin{aligned} K_{Ff} &= K_{42} = 3 - 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Fd} &= K_{41} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \\ K_{Df} &= K_{12} = 12 + 14M^2 + 3,3lg\left(\frac{f}{f_k}\right) \end{aligned} \quad (14) $
Dabei ist $M = lg \frac{m'_l}{m'_i}$ und $f_k = 500 \text{ Hz}$	

Das Verfahren ist sowohl in der frequenzabhängigen Berechnung, als auch in der Einzahlberechnung anwendbar. Für die Einzahlberechnung wird f mit 500 Hz angesetzt, wodurch der frequenzabhängige Summand der jeweiligen Berechnung entfällt.

Wird im Bereich der Stossstelle eine zusätzliche Entkopplung geplant, ist es sinnvoll die tatsächliche Stosssituation inklusive der Elastomere messtechnisch zu bestimmen und im Berechnungsverfahren anzusetzen. Eine rein rechnerische Bestimmung der Verbesserung durch Elastomere ist nicht möglich. Soll eine entkoppelte Stosssituation ohne Prüfstandsmessung berücksichtigt werden, kann in Anlehnung an [3] eine massen-unabhängige Verbesserung durch das Elastomer ΔK_{ij} bzw. Δ_l ermittelt und mit $K_{ij, \text{starr}}$ addiert werden (siehe Formel (15)).

$$K_{ij} = K_{ij, \text{starr}} + \Delta_l \quad (15)$$

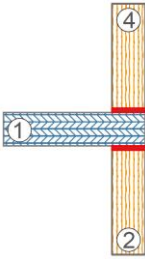
Hierzu wird die Differenz des Stossstellendämm-Masses ähnlicher Stossstellen gebildet, die sowohl mit, als auch ohne Elastomer messtechnisch untersucht wurden. Diese massenunabhängige Verbesserung des Elastomers wird anschliessend mit der tatsächlichen Stosssituation (berechnet oder gemessen) addiert. Messdaten von Stosssituation mit und ohne Elastomer sind beispielsweise in der Online-Datenbank VaBdat² zu finden.

Des Weiteren dient Tabelle 3 als Orientierung. Hierin werden die bereits 2010 von M. Schramm und F. Dolezal veröffentlichten Ergebnisse [24] zur Verbesserung durch elastisch entkoppelte Stosssituationen mit aktuellen Messwerten zugelassener Winkel und Entkopplungen aufgezeigt.

² <https://www.vabdat.de/Stossstelle/>

Werden die Übertragungswege nach Abbildung 2 beachtet, wirkt sich im Weg Fd nur das obere, im Weg Df nur das untere Elastomer aus. Die Übertragung über die Wege Ff und Dff wird von beiden Entkopplungselementen beeinflusst.

Tabelle 3: Verbesserung der Stossstellendämm-Masse ΔK_{ij} durch elastische Entkopplung

Position der Elastomere		Entkoppelte Befestigungsmittel	
		Nach [24]	Nach [25][26][22]
	Nur oben / nur unten	$\Delta K_{ij} = 7 \dots 10 \text{ dB}$	$\Delta K_{ij} = 4 \dots 10 \text{ dB}$
	Oben und unten	$\Delta K_{ij} = 8 \dots 19 \text{ dB}$	$\Delta K_{ij} = 13 \dots 15 \text{ dB}$

3.3. Verbesserung durch Vorsatzschalen

Die Verbesserung durch Vorsatzschalen/Installationsebenen an Massivholzelementen kann als Abschätzung nach [5] ermittelt werden. Wesentlicher Einfluss hat die Übertragung durch Befestigungen und der Übertragung durch das Gefach. Letzterer ist massgeblich durch die Masse-Feder-Masse Resonanz f_0 geprägt. Wie Formel (16) zeigt, lässt sich diese mit Hilfe der flächenbezogenen Masse des Grundbauteils (Wandelement) m'_1 und der Beplankung der Vorsatzschale m'_2 sowie der dynamischen Steifigkeit s' in MN/m^3 errechnen.

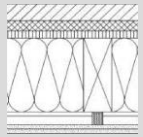
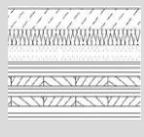
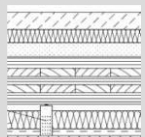
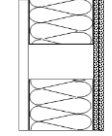
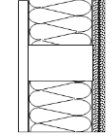
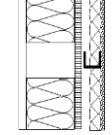
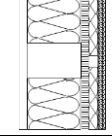
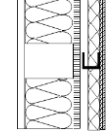
$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (16)$$

Wird der Hohlraum durch einen leichten, weichen Dämmstoff bedämpft, so kann anstelle von s' die dynamische Steifigkeit der Luftschicht und deren Dicke d angesetzt werden (17).

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,08}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (17)$$

Die Verbesserung der Vorsatzschale tritt oberhalb der Resonanzfrequenz f_0 auf, woraus folgt, dass die Verbesserung durch Vorsatzschalen umso grösser ist, je kleiner f_0 ist. Für Holzrahmenbauteile und Holzbalkendecken kann, basierend auf der stark inhomogenen Bauweise, keine Verbesserung rechnerisch ermittelt werden. Auf Grundlage von Untersuchungen der Flankenübertragung von Holzrahmenbauwänden mit Installationsebene [33] können dennoch Planungswerte für die flankierende Trittschallübertragung nach Formel (9) ermittelt werden.

Tabelle 4: Laborprüfwerte für den bewerteten Norm-Trittschallpegel flankierender Holztafelwände $L_{n,f,ij,lab,w}$ bezogen auf $S_{i,lab} = I_0 \cdot I_{ij,lab}$ sowie Verbesserungen durch Vorsatzschalen bzw. Zusatzbeplankungen $\Delta R_{j,w}$ an den Flanken. Messdaten aus [33]

Deckenaufbau					
Raumseitige + Vorsatzschale	Beplankung		$L_{n,w} = 40 \text{ dB [11]},$ Tab.25, Z.12	$L_{n,w} = 40 \text{ dB [11]},$ Tab.26, Z.3	$L_{n,w} = 23 \text{ dB [11]},$ Tab.27, Z.2
	12,5 mm 12,5 mm	GKF GKF	$L_{n,f,ij,lab,w} = 46 \text{ dB}$	-	-
	18 mm 18 mm	GKF GKF	-	$L_{n,f,ij,lab,w} = 34 \text{ dB}^a)$ $\Delta R_{j,w} = 2 \text{ dB}^b)$ $\Delta R_{ij,w} = 3 \text{ dB}^c)$	-
	12 mm 10 mm 75 mm 12,5 mm	OSB Luftschicht CW+MW GK	$L_{n,f,ij,lab,w} = 42 \text{ dB}$ $\Delta R_{j,w} = 4 \text{ dB}^b)$	-	-
	12 mm 40 mm 15 mm 12,5 mm	OSB L+MW GKF GK	-	$L_{n,f,ij,lab,w} = 33 \text{ dB}^a)$ $\Delta R_{j,w} = 3 \text{ dB}^b)$	-
	12 mm 10 mm 75 mm 12,5 mm 12,5 mm	OSB Luftschicht CW+MW GKF GKF	-	$L_{n,f,ij,lab,w} = 31 \text{ dB}^a)$ $\Delta R_{j,w} = 5 \text{ dB}^b)$	-

a) Bei Ausführung der Decke ohne Unterdecke (Spalte 3) kann die Gesamt-Flankenübertragung durch eine zusätzliche Übertragung des Deckenelements beeinflusst werden.

b) Verbesserung $\Delta R_{j,w}$ gegenüber direkter Beplankung nach Zeile 1. Gültig für Weg Df. Voraussetzung: Montage der Vorsatzschale an der flankierenden Wand im Empfangsraum.

c) Verbesserung $\Delta R_{ij,w}$ gegenüber Zeile 1. Gültig für Weg Dff. Voraussetzung: Montage der Beplankungen an den flankierenden Wänden im Send- und Empfangsraum.

GK Gipsplatte nach DIN 18180/DIN EN 520, $\rho \geq 680 \text{ kg/m}^3$, mechanisch verbunden

GKF Gipsplatte Typ F nach DIN 18180/DIN EN 520, $\rho \geq 800 \text{ kg/m}^3$, mechanisch verbunden

OSB Verlegetspanplatte aus gerichteten Holzspänen nach DIN EN 300, mechanisch verbunden

CW+MW C-Wandprofil mit einer Blechdicke von 0,6 mm nach DIN EN 14195 + 60 mm

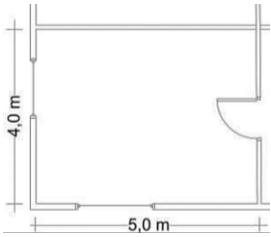
Mineralfaserdämmstoff

L+MW Lattung vertikal, auf dem Ständer montiert, $e = 0,625 \text{ m} + 40 \text{ mm}$ Mineralfaserdämmstoff

4. Planung anhand eines Ausführungsbeispiels

In dem vorangegangenen Kapitel wurde das differenzierte Berechnungsverfahren nach [5] und [6] in Verbindung mit Erkenntnissen aus aktuellen Forschungen vorgestellt. Auf Grundlage dessen soll im Folgenden ein mögliches Vorgehen für die Berücksichtigung von Bauteilen und Zusatzmassnahmen, die nicht durch die DIN 4109 abgedeckt werden, vorgestellt werden. Das hierzu verwendete Ausführungsbeispiel als Wohngebäude ist durch Massivholzelemente sowohl im Decken als auch im Wandbereich charakterisiert. Die Massivholzdecke ist mit schwimmendem Zementestrich auf Mineralfaser und einer zusätzlichen Splittbeschwerung gewählt. Im Bereich der flankierenden Aussenwände soll die Holzoberfläche sichtbar bleiben. Die flankierenden Innenwände werden hingegen mit Gipsbauplatten beplankt.

Tabelle 5: Ausführungsbeispiel für Planung anhand differenzierter Rechenmodelle mit Eingangsdaten sowie Ergebnissen der Prognose (Dickenangaben in mm)

Z	Decke (Dicke in mm)	Decke	Aussenwand	Innenwand
1		50 mm ZE ($m' = 120 \text{ kg/m}^2$) 40 mm MFT, $s' = 7 \text{ MN/m}^3$ 60 mm RDB, $m' = 94 \text{ kg/m}^2$ 160 BSH (Masse GE: $169,2 \text{ kg/m}^2$) ^{b)} $S_S = 20 \text{ m}^2$	Schalung Lattung 160 Dämmung 100 BSP (Masse GE: 48 kg/m^2) ^{b)}	12,5 GK 80 BSP 12,5 GK (Masse GE: 59 kg/m^2) ^{b)}
	Anforderungen: erf. $R'_w \geq 54 \text{ dB}$ zul. $L'_{n,w} \leq 50 \text{ dB}$	$R_w (C_{150-5000}) = 72 (-8) \text{ dB}$ $L_{n,w} (C_{150-2500}) = 40 (8) \text{ dB}$	$l_f = 9,0 \text{ m}$ $K_1 = 4 \text{ dB}$ $R_{f,w} = 32,4 \text{ dB}$ ^{a)c)}	$l_f = 9,0 \text{ m}$ $K_1 = 4 \text{ dB}$ $R_{f,w} = 35 \text{ dB}$ ^{a)d)}
2	Vorbemessung nach [11]	$L_{n,w} + C_{150-2500} = 48 \text{ dB} < 50 \text{ dB}$ → Basis +		
3	Berechnung nach DIN 4109	$L'_{n,w} = 48 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} + u_{\text{prog}} > \text{zul. } L'_{n,w}$ nicht erfüllt! ✗	$K_1 = 4 \text{ dB}$ $K_2 = 4 \text{ dB}$	
4	Differenzierte Berechnung Stossstelle als T-Stoss ^{e)}	$L'_{n,w} = 47,2 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} + u_{\text{prog}} > \text{zul. } L'_{n,w}$ nicht erfüllt! ✗ $R'_w = 55,6 \text{ dB} - 2 \text{ dB}$ $R'_w - u_{\text{prog}} < \text{erf. } R'_w$ nicht erfüllt! ✗	$L_{n,DFf,w} = 38,0 \text{ dB}$ $L_{n,Df,w} = 34,8 \text{ dB}$ $R_{Ff,w} = 63,0 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 82,5 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 66,5 \text{ dB}$	$L_{n,DFf,w} = 38,0 \text{ dB}$ $L_{n,Df,w} = 34,8 \text{ dB}$ $R_{Ff,w} = 65,3 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 83,6 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 67,6 \text{ dB}$
5	Zusatzmassnahme Aussenwand: Elastomer oben $\Delta K_{ij} = 5 \text{ dB}$	$L'_{n,w} = 45,1 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} + u_{\text{prog}} < \text{zul. } L'_{n,w}$ erfüllt! ✓ $R'_w = 60,3 \text{ dB} - 2 \text{ dB}$ $R'_w - u_{\text{prog}} > \text{erf. } R'_w$ erfüllt! ✓	$L_{n,DFf,w} = 33,0 \text{ dB}$ $L_{n,Df,w} = 34,8 \text{ dB}$ $R_{Ff,w} = 68,0 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 82,5 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 71,5 \text{ dB}$	$L_{n,DFf,w} = 33,0 \text{ dB}$ $L_{n,Df,w} = 34,8 \text{ dB}$ $R_{Ff,w} = 70,5 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 83,6 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 72,6 \text{ dB}$

ZE = Zementestrich, MFT = Mineralwolle, RDB = Rohdeckenbeschwerung/Splitt, BSH Brettschichtholz, GK = Gipsbauplatte, BST = Brettstapel GE = Grundlelement

^{a)} Schalldämm-Mass des Massivholzelements (bei Decke inkl. Splitt) für die Berechnung nach Gleichung (7)

^{b)} Daten entnommen aus [20] Tab. 26, Z.3

^{c)} Daten entnommen aus VaBDat-Datenbank: B_bCLT100

^{d)} Daten entnommen aus VaBDat-Datenbank: B_bGP12_bCLT80_bGP12

^{e)} Stossstellendämm-Mass nach Abschnitt 3.2

Aus Tabelle 5 können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Um die Trenndecke bezüglich ihres subjektiven Empfindens zu beurteilen, wird sie in Zeile 2 mit den in [20] angegebenen «normativen Anforderungen und Empfehlungen für wichtige Zielwerte» verglichen. Der Aufbau ist der Kategorie «Basis +» ($L_{n,w} + C_{150-2500} \leq 50 \text{ dB}$) zuzuordnen. Es ist davon auszugehen, dass keine störende Trittschallübertragung zu erwarten ist.
- Der Nachweis nach DIN 4109 wird für die Trittschallberechnung in Zeile 3 nicht erfüllt. Die Berechnung des Luftschalls ist auf Grund der flankierenden Massivholzelemente noch nicht möglich.
- In Zeile 4 erfolgt die detailliertere Prognose nach den in Abschnitt 3 aufgezeigten Berechnungsverfahren. Hierzu wird die Stossstelle durch die in [21] angegebenen Planungsdaten berechnet. Auch in der differenzierten Berechnung werden die Anforderungen nicht erreicht.
- Als Zusatzmassnahme wird in Zeile 5 deshalb ein Elastomer oberhalb der Decke angeordnet. Nach Tabelle 3 wird ein $K_{ij} = 5 \text{ dB}$ gewählt, wodurch die Anforderungen an Wohnungstrenndecken sowohl für den Luft- als auch Trittschall eingehalten werden.

Die Prognose anhand der differenzierten Berechnungsmodelle ist allgemein durch eine Baumessung zu validieren, da sie keinen Nachweis im Sinne der DIN 4109 darstellt. Landesbaurechtlich kann hiervon gegebenenfalls abgewichen werden, falls die allgemeinen Anforderungen durch eine andere Lösung im gleichen Masse erfüllt werden können³.

5. Baumessungen und Vergleichsprognosen

Anschliessend an Abschnitt 4 werden in Tabelle 6 weitere Ausführungsbeispiele für Massivholztrenndecken in mehrgeschossigen Bauobjekten sowie deren jeweiligen Zusatzmassnahmen für flankierende Wände anhand vier realer Bausituationen (BS) aufgezeigt. Bis auf den Trittschall der Bausituation 3 halten die Situationen sogar die erhöhten Anforderungen an Wohnungstrenndecken gemäss [4] ($L'_{n,w} \leq 45$ dB $R'_w \geq 57$ dB) ein.

Alle vier Gebäude wurden in Holzmassivbauweise errichtet. Empfangs und Senderraum liegen exakt untereinander und weisen jeweils die gleichen Bauteilkonstruktionen in Sende- und Empfangsraum auf. Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung ist in [30] nachzulesen.

Tabelle 6: Berechnung verschiedener Bausituation durch das differenzierte Berechnungsverfahren und Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Werten auf der Baustelle.

BS	Decke (in mm)	Flanke 1-4 und Entkopplung	Stossstellen-entkopplung	Baumessung	Einzahl-Prognose	Differenz
1	60 ZE 40 MFT 90 KS 200 BSH	1: MH + Bep. 2: MH + Bep. 3: MH + Bep. 4: MH + Bep.	Keine Entkopplung	$R'_w = 59,9$ dB ✓ $L'_{n,w} = 42,8$ dB ✓	$R'_w = 61,2$ dB $L'_{n,w} = 43,0$ dB	-1,3 dB 0,2 dB
2	65 ZE 40 MFT 90 KS 100 BSH	1: BSP + Bep. 2: BSP + Bep. 3: BSP + Bep. 4: HRB	Elastomer oben ^{a)}	$R'_w = 63,4$ dB ✓ $L'_{n,w} = 44,8$ dB ✓	$R'_w = 61,5$ dB $L'_{n,w} = 44,7$ dB	1,9 dB -0,1 dB
3	65 ZE 40 MFT 100 KS 200 BSH	1: BSP + Bep. 2: BSP + Bep. 3: BSP + Bep. 4: BSP + Bep.	Kork oben ^{c)}	$R'_w = 60,2$ dB ✓ $L'_{n,w} = 46,5$ dB ✗	$R'_w = 59,3$ dB $L'_{n,w} = 44,4$ dB	0,9 dB -2,1 dB
4	80 ZE 50 MFT 85 KS 200 BSH	1: BSP + Bep. 2: BSP + Bep. 3: BSP + Bep. 4: HRB	Elastomer oben + unten ^{b)}	$R'_w = 66,0$ dB ✓ $L'_{n,w} = 44,8$ dB ✓	$R'_w = 63,2$ dB $L'_{n,w} = 47,3$ dB	2,8 dB 2,5 dB

ZE = Zementestrich, MFT= Mineralfaser Trittschalldämmung, KS = Kalksplitt, BSH = Brettsperrholz, Bep. = Beplankung mit Gipsfaser oder Gipskarton, MH = Massivholzblock, HRB = Holzrahmenbau

^{a)} Entkopplungsschicht zwischen Deckenelement und flankierendem Bauteil im Senderraum

^{b)} Entkopplungsschicht zwischen Deckenelement und flankierendem Bauteil im Senderraum sowie zwischen Deckenelement und flankierendem Bauteil im Empfangsraum

^{c)} Die Messdaten zeigen, dass die Verbesserung des Stossstellendämm-Mass durch das Kork vernachlässigbar ist, weshalb die Stossstelle als starrer Stoss berechnet wird.

6. Ausblick auf frequenzabhängige Verfahren

Die Berechnung von Bauteilen und Bausituationen durch Einzahlwerte ist praktikabel und mit überschaubarem Aufwand möglich. Sie birgt jedoch die Gefahr des Informationsverlustes, da hierbei wichtige Informationen über das Verhalten in dem bauakustisch relevanten Frequenzbereich verloren gehen. Im tieffrequenten Bereich kommt dieser Umstand besonders zu tragen. In der DIN EN ISO 12354 ([5] und [6]) wird daher ein Berechnungsverfahren vorgeschlagen, durch welches die frequenzabhängige Prognose von Bauteilen und Bausituationen möglich ist. Diese wurde in [30] mit aktuellen Forschungsergebnissen für den Holzbau ergänzt und mithilfe des Prognosetools VBAcoustic⁴ automatisiert.

³ BayBo in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007, Art.3 Satz 1

⁴ http://bit.ly/VBAcoustic_download

6.1. Berechnungsgrundlagen

In der frequenzabhängigen Berechnung werden die Übertragungswege analog zu Abbildung 2 angewendet. Hieraus resultiert die Prognose der Planungswerte R' und L'_n durch die summativen Anteile aus direkter und flankierender Übertragung nach Formel (18) und (19).

$$R' = -10 \lg \left(10^{-R_{Dd,situ}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,situ}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Fd,situ}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,situ}/10} \right) \quad (18)$$

$$L'_n = 10 \lg \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{L_{n,Df,k}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{L_{n,Dff}/10} \right) \quad (19)$$

Die Betrachtung der direkten Übertragung $R_{Dd,situ}$ muss durch Messdaten erfolgen, eine Berechnung des trennenden Bauteils mit Estrichaufbau ist derzeit nicht möglich. Zudem können keine Unterdecken berücksichtigt werden, da eine Verbesserung in der Flankenübertragung aktuell nicht berechenbar ist. Um Messdaten für das Prognoseverfahren anzuwenden zu können, müssen diese stets durch die Körperschall-Nachhallzeit mit Formel (20) korrigiert werden.

$$R_{situ} = R - \left(10 \lg \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \right) \quad (20)$$

Die Berechnung der Flankenübertragung erfolgt anhand der Formeln (21) und (22). Im Gegensatz zur Einzahlberechnung wird die richtungsgemittelten Norm-Schnellepegel-differenz $\overline{D_{v,ij,situ}}$ für die Charakterisierung der Stossstellenausbildung verwendet. Ihre Berechnung erfolgt anhand des Stossstellendämm-Masses K_{ij} , welches analog zu Abschnitt 3.2. durch Messdaten oder Berechnung ermittelt werden kann.

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + \left(10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \quad (21)$$

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - \left(10 \lg \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \quad (22)$$

Das Schalldämm-Masses der flankierenden Bauteile $R_{i,situ}$ und $R_{j,situ}$ wird bestenfalls durch vorhandene Bauteilmessungen dargestellt. Zudem besteht für Massivholzbauteile die Möglichkeit das Schalldämm-Mass näherungsweise durch die Berechnung des Transmissionsgrades in Abhängigkeit der Koinzidenz-Grenzfrequenz f_c nach Formel (23), (24) und (25) zu prognostizieren. Die Verbesserung durch Vorsatzschalen $\Delta R_{i,situ}$ und $\Delta R_{j,situ}$ sollten gegebenenfalls bereits in den Messdaten der flankenbauteilen berücksichtigt sein, da derzeit kein validiertes Verfahren für deren Berechnung an Holzbauteilen vorliegt.

$$R = -10 \lg \tau \quad (23)$$

$$f < f_c: \quad \tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f \left[1 - \frac{f^2}{f_c^2} \right]^{-2} + 2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{4f\eta_{tot}} \right) \quad (24)$$

$$f > f_c: \quad \tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f\eta_{tot}} \quad (25)$$

Die Prognose des Norm-Trittschallpegels der Wände im Übertragungsweg Dff kann nach [6] gemäss Formel (26) erfolgen⁵.

$$L_{n,f} \approx 158 - \left(30 \lg \frac{m'}{(1\text{kg/m}^2)} \right) + \left(10 \lg \frac{T_s}{(1\text{s})} \right) + (10 \lg \sigma) + \left(10 \lg \frac{f}{(f_{ref})} \right) \quad (26)$$

⁵ Es wird vermutet, dass der hier verwendete Kraftpegel, basierend auf der Mittelung des ideal plastisch- und elastischen Stoßes, die Realität besser abbildet [12], [19].

6.2. Anwendungsbeispiel und Vergleichsmessung

Für die Abschätzung der Rechengenauigkeit dieses Prognoseverfahrens werden die vier Bausituationen aus Abschnitt 5 frequenzabhängig berechnet und die Ergebnisse mit den entsprechenden Baumessungen verglichen.

Tabelle 7: Vergleich der Einzulangaben resultierend aus der frequenzabhängigen Berechnung und den Messergebnissen der Baumessungen aus Luftschall- und Trittschalldämmung

BS	Frequenzabhängige Prognose	Baumessung	Differenz
1	$R'_w = 56,5 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 43,0 \text{ dB}$	$R'_w = 59,9 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 42,8 \text{ dB}$	3,4 dB 0,2 dB
2	$R'_w = 56,7 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 46,6 \text{ dB}$	$R'_w = 63,4 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 44,8 \text{ dB}$	6,7 dB 1,8 dB
3	$R'_w = 56,6 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 48,4 \text{ dB}$	$R'_w = 60,2 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 46,5 \text{ dB}$	3,6 dB 1,9 dB
4	$R'_w = 60,5 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 42,9 \text{ dB}$	$R'_w = 66,0 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 44,8 \text{ dB}$	5,5 dB -1,9 dB

Für Einzahlwerte des Bau-Schalldämm-Masses R'_w ist eine mittlere Abweichung $\overline{\Delta R'_w} = 4,8 \text{ dB}$ (Standardabweichung = 1,4 dB) festzustellen. Die erhöhte Abweichung ist vermutlich auf die fehlende Berücksichtigung der Koinzidenz-Grenzfrequenz zusätzlicher Beplankungslagen und mögliche Dickenresonanzen zurückzuführen. Im Bereich des Norm-Trittschallpegels ist bereits eine sehr geringe mittlere Abweichung $\overline{\Delta L'_{n,w}} = 0,5 \text{ dB}$ (Standardabweichung = 1,5 dB) zu erkennen. Allgemein wird die Bausituation durch das frequenzabhängige Verfahren tendenziell unterschätzt und liegt somit auf der sicheren Seite. Dennoch ist die Bausituation durch die frequenzabhängige Berechnung deutlich näher an der Realität zu simulieren und darzustellen.

7. Zusammenfassung

Mithilfe des Bauteilkataloges der DIN 4109 [2] ist eine weitaus spezifischere Planung von Bauvorhaben im Holzbau möglich. Dennoch bestehen grosse Lücken in Hinblick auf Holzmassivbauteile sowie Kosten-Nutzen-optimierte Deckenkonstruktionen. Beitragend hierzu werden differenzierte Berechnungsmöglichkeiten, sowie Planungsdaten vorgestellt, um den Planungsprozess von trennenden und flankierenden Deckenelementen zu ergänzen. Anhand dieser Verfahren ist es möglich die Realität durch die Prognose deutlich genauer abzubilden und mögliche Verbesserungsmassnahmen zu berücksichtigen. Auch die Darstellung von Massivholzbauteilen wird durch diese Verfahren ergänzt und ermöglicht eine schalltechnische Prognose. Letztlich werden aktuelle Forschungsergebnisse im Bereich der frequenzabhängigen Berechnung von Bausituationen aufgezeigt, die bereits vielversprechende Ergebnisse liefern. Dennoch ist es sowohl für die Einzahlberechnung, wie auch für die frequenzabhängige Berechnung sinnvoll, eine rechnergestützte Umsetzung zu verwenden, welche die holzbauspezifischen Besonderheiten berücksichtigt [31].

8. Grundlagenverzeichnis

- [1] DIN 4109-1:2016-07, *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*, Berlin.
- [2] DIN 4109-2:2016-07, DIN 4109-1:2016-07, *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*, Berlin
- [3] DIN 4109-33:2016-07, *Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau*
- [4] DIN 4109-1:2018-01, *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*, Berlin.
- [5] DIN 4109-2:2018-01, *Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen*, Berlin.
- [6] DIN 4109-5:2020-08, *Schallschutz im Hochbau - Teil 5: Erhöhte Anforderungen*, Berlin.
- [7] DIN EN ISO 12354-1:2017-11. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen*, Berlin.
- [8] DIN EN ISO 12354-2:2017-11. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen*, Berlin.
- [9] VDI 4100:2012, *Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz* und VDI 4100:2007, *Schallschutz von Wohnungen - Kriterien für Planung und Beurteilung*
- [10] DIN EN ISO 10848-1:2018-02. *Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau - Teil 1: Rahmendokument*, Berlin
- [11] Beiblatt 2 zu DIN 4109: 1989-11, *Schallschutz im Hochbau - Hinweise für Planung und Ausführung - Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz- Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- oder Arbeitsbereich*
- [12] DEGA-Empfehlung 103:2009-03, *Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis*
- [13] Lang, J. (2006), *Schallschutz im Wohnungsbau*, Forschungsbericht ifip TU Wien
- [14] Hveem, S., Homb, A., Haagberg, K., Rindel, J. H. (1996:12, *Low-frequency footfall noise in multi-storey timber frame buildings*, NKB report
- [15] Jeon, J., Y., Jeong, J. H. (2002), *Objective and Subjective Evaluation of Floor Impact Noise*, Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment
- [16] Warnock, A.C.C. (2000), *Low-frequency impact sound transmission through floor systems*, InterNoise,
- [17] Scholl, W.(2001), *Das Normhammerwerk muss laufen lernen*, Tagungsband DAGA
- [18] Burkhart, C. (2002), *Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, mögliche Ursachen*, Tagungsband DAGA
- [19] B. Rasmussen, J. H. Rindel (2003) *Sound insulation of dwellings – Legal requirements in Europe and subjective evaluation of acoustical comfort*. Proceedings of DAGA, 118–121
- [20] Kühn, B., Blickle R. (2004), *Trittschalldämmung und Gehgeräusche-Immission von Geschossdecken aus Holz*, WKSB
- [21] Holtz, F., Rabold, A., Buschbacher, H.P., Hessinger, J. (2003), *Verringerung der Schallabstrahlung von Holzständerwänden bei Trittschallanregung im mehrgeschossigen Holz-Wohnungsbau*. DGfH-Forschungsbericht des Labor für Schall- und Wärmemesstechnik, Stephanskirchen
- [22] Blödt, A., A. Rabold, M. Halstenberg, T. Ecker, A. Huber, L. Huissel und S.Löffler (2019). *Schallschutz im Holzbau - Grundlagen und Vorbemessung*, Holzbau Handbuch Reihe 3, Teil 3, Folge 1
- [23] Rabold, A., C. Châteaueux-Hellwig und S. Mecking (2019). *Flanking transmission of solid wood elements in multi-storey timber buildings - input data and prediction models for airborne and impact sound excitation*, Proceedings of Inter-Noise. Madrid, Spain.
- [24] Wohlmuth, B., T. Horger, E. Rank, S. Kollmannsberger, F. Frischmann, A. Paolini, U. Schanda, S. Mecking, C. Winter, T. Kruse, A. Rabold, C. Châteaueux-Hellwig, M. Schramm Markus Buchschmid und G. Müller (2018). *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten: Modellierung, numerische Simulation, Validierung*.
- [25] Timpte, A. (2016). *Stoßstellen im Massivholzbau - Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose*. Masterarbeit. TH Rosenheim und TU Berlin.
- [26] Schramm, M., Dolezal, F., Rabold, A., Schanda, U. (2010), *Stoßstellen im Holzbau – Planung, Prognose und Ausführung*, Tagungsband DAGA.
- [27] Kruse, T. (2015), *Messtechnische Untersuchung zur Stoßstellendämmung und Ausbreitungsdämpfung von Brettsperrholzbauteilen*, Bachelorarbeit Hochschule Rosenheim
- [28] Nicklaus, S. (2017), *Untersuchung zur schalltechnischen Entkopplung von Massivholzbauteilen an Wand-Decken-Stößen*, Bachelorarbeit Hochschule Rosenheim
- [29] Hernández, A.M. (2016), *Influence of suspended ceilings to airborne and impact sound insulation in massive wooden floors*, Projektarbeit Hochschule Rosenheim
- [30] Ift Bauteildatenbank Wände
- [31] Scheck, J., S. Reihnhold, P. Eschbach und H.-M. Fischer (2016), *Messung und Prognose der Luft- und Körperschallübertragung von gebäudetechnischen Anlagen im Massivbau*, Proceedings of DAGA, Aachen
- [32] Zehetmayr, R. (2021) *Datenbankgestütztes Berechnungstool zur frequenzabhängigen Schallschutzprognose im Holzbau* Masterarbeit, TH Rosenheim
- [33] Châteaueux-Hellwig, C., Mecking, S., Brummer, B., Rabold, A. (2016), *Anwendung zur SEA basierten Berechnung nach EN 12354 für Massivholzelemente*, Proceedings of DAGA, Aachen
- [34] Rabold, A., M. Schneider, H.M., Fischer, B. Zeitler (2020), *Neue Berechnungsverfahren zur Trittschallübertragung*, Bauphysik, Ernst&Sohn
- [35] Deutscher Holzbau Verband DHV (2019), *Untersuchung der Flankenübertragung von Holztafelbauwänden mit Installationsebenen* [Verbandsprojekt]. Holzbau Deutschland, Bund Deutscher Fertigbauer BDF.