

Bauphysik im Holzmodulbau – Planung und Umsetzung

Jesse Zimmermanns
W. u. J. Derix GmbH & Co
Niederkrüchten, Deutschland



Bauphysik im Holzmodulbau – Planung und Umsetzung

1. Einleitung

Die Holzmodulbauweise aus X-LAM/Brettsper Holz hat bauphysikalische Besonderheiten gegenüber konventionellen oder elementierten Holzbauweisen. Dies zeigt sich auch beim Schallschutz. Eine grundsätzliche Konstruktionseigenschaft der Modulbauweise ist die durchgängige Zweischaligkeit der Trennwände und -decken, welche aus Sicht des Schallschutzes als vielversprechendes Potenzial gesehen werden kann. Durch die zweischalige Bauweise sind aber nicht automatisch alle Anforderungen erschlagen. Die Wahl des Bodenaufbaus, eine sinnvolle Ausbildung des Moduldeckels und die Entkopplung der Modulstöße sind entscheidend für einen wirksamen Schallschutz.

Aktuell besteht ein großes Defizit an belastbaren und erprobten Bauteilaufbauten, sowie Fachliteratur und normativen Nachweisen, derer sich in der Planung für die schalltechnische Bemessung bedienen werden kann. Daraus resultiert eine große Unsicherheit bei allen Projektbeteiligten. Belastbare Nachweise erfolgen in der Regel erst nach Fertigstellung des Gebäudes durch bauakustische Abnahmemessungen. Während des gesamten Projektverlaufs liegt somit das Planungsrisiko für die Einhaltung der Schallschutzanforderungen beim Bauherren, Schallschutzgutachter oder Modulhersteller. Für Produzenten von Holzmodulen heißt es daher, aktiv im Planungsprozess mitzuwirken. Verbindliche Vorgaben zur Qualität der vorgeschlagenen Wand- und Deckenaufbauten werden erwartet und durch den Produzenten verantwortlich vorgegeben, da es für Planer schwierig bis unmöglich ist, sichere Aussagen zu den Bauteilen zu treffen. Das Konfliktpotenzial ist groß, sollten die Prognosen bei den Messungen nicht bestätigt werden können.

Durch Versuchsstudien eine bessere Grundlage in der Planung und Umsetzung zu schaffen, liegt im Interesse aller Beteiligten. Aus dieser Motivation heraus sind interne Schallschutzmessungen an Testmodulen durchgeführt worden. Die Qualität der Decken- und Wandaufbauten konnte so gezielt erprobt werden. Gleichermäßen half die Studie, die Einflussfaktoren besser bewerten zu können. Die Versuchsstudie mit bauakustischen Messungen wird im Folgenden beschrieben und die Ergebnisse auszugsweise dargestellt.

Die Messungen sind mit maßgeblicher Unterstützung durch Matthias Lutter, Absolvent der TH Rosenheim, im Rahmen seiner Bachelorarbeit erfolgt. Die Messungen sind als bauakustische Messungen unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 10140 erfolgt.

Weiterhin ist eine intensive Betrachtung und Messung der Stoßstellendämm-Maße durch Jan Georg Rathfelder, ebenfalls TH-Rosenheim, im Zuge seiner Masterarbeit erfolgt.

Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle aufgeführten Messwerte und Ergebnisse im Rahmen von bauakustischen Messungen (keine Prüfstandsmessungen) ermittelt worden. Die Anwendung oder Übertragung ist nicht sinnvoll bzw. allgemein gültig.

2. Bauteilprüfungen an Testmodulen

Um die Qualität der Trennbauteile und Anschlusssituationen in der Holzmassiv-Modulbauweise, sowie die Einflussgrößen, wie Entkopplung, Schalenabstand, Fußbodenaufbau und Ausbildung des Moduldeckels zuverlässiger bewerten zu können, wurden drei Raummodule mit einer Größe von ca. 3 m x 7 m x 3 m (B x L x H) erstellt. Durch die Ausbildung verschiedener, wechselbarer Moduldeckel und verschiedener Fußbodenaufbauten, konnte eine ausgedehnte Prüfmatrix erstellt werden. Messungen der Trennwände sind in untergeordnetem Umfang ebenfalls erfolgt.



Abbildung 1: Versuchsdurchführung

2.1. Bauteile

Für die Studie wurden fünf unterschiedliche Moduldeckel (Abbildung 4) erstellt. Deckel aus X-LAM mit und ohne Beschwerung, sowie drei Holzrahmenbauelemente, die in der Höhe der Gefache variieren. Eines davon ebenfalls mit einer Schüttung auf einer Trennlage beschwert. Alle Decken sind unterseitig mit Gipskarton beplankt.

Es wurden drei gängige entkoppelte Fußbodenaufbauten (Abbildung 3) gewählt: Nassestrich, Trockenestrich und Trockenestrich mit Beschwerung in Form einer gebundenen Schüttung.

Alle flankierenden Wände im Empfangs- und Senderraum sind als X-LAM Element mit Sichtoberfläche in Stärken von 80 mm bis 120 mm ausgeführt. Vorsatzschalen waren zum Zeitpunkt der Deckenmessungen nicht vorhanden. Die Entkopplung ist ungestört durch Elastomerlager erfolgt.

Die Wände der Module sind durchlaufend, so dass vertikal direkte Wandstöße vorliegen (Abbildung 2).

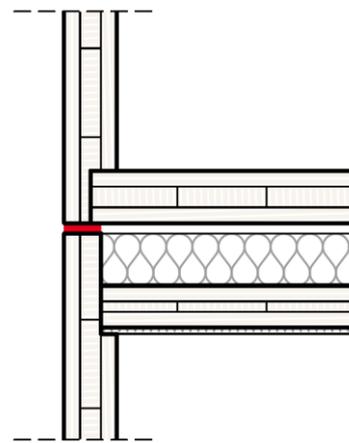


Abbildung 2: Systemschnitt

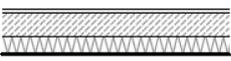
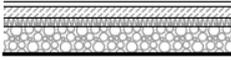
ZE	TEmS	TE
		
5,0 Zementestrich 4,0 Trittschalldämmung, mineralisch	2,5 Trockenestrich 2,0 Trittschalldämmung, mineralisch 6,0 Splittschüttung	2,5 Trockenestrich 2,0 Trittschalldämmung, mineralisch

Abbildung 3: Bodenaufbauten

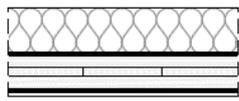
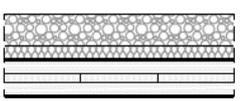
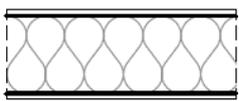
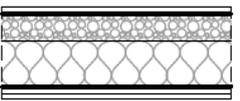
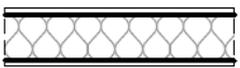
X - LAM 1	X - LAM 2	HRB 1	HRB 2	HRB 3
				
10,0 Mineralwolle 8,0 X-LAM, Brettsper Holz 1,0 Gipskartonplatte	7,0 Splittschüttung 3,0 Mineralwolle 8,0 X-LAM, Brettsper Holz 1,0 Gipskartonplatte	1,5 OSB 17,0 HRB/Mineralwolle 1,0 Gipskartonplatte	1,5 OSB 16,0 HRB (MW 100 SPL 60) 1,5 OSB 1,0 Gipskartonplatte	7,5 Luftschicht 1,5 OSB 10,0 HRB/Mineralwolle 1,0 Gipskartonplatte

Abbildung 4: Moduldeckel

2.2. Durchführung

Der Bau der drei Module, sowie fünf Deckenelemente erfolgte im Sommer 2019. Die bauakustischen Messungen wurden direkt im Anschluss im Außenbereich des Werksgeländes durchgeführt. Die drei baugleichen Module, die sich lediglich in der Wandstärke der Trennwände unterscheiden, wurden mit den unterschiedlichen Moduldeckeln bestückt. Die Fußbodenaufbauten wurden fest installiert. Mit Hilfe eines Autokranes wurde der Senderaum wechselnd auf die beiden verbleibenden Module versetzt.

Mit bauakustischen Messungen unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 10140 wurde das Luftschalldämm-Maß, sowie der Norm-Trittschallpegel bestimmt. Alle Bauteilmessungen sind mit einer linienförmigen Entkopplung, Sylodyn NC, erfolgt.

Im Anschluss an die Deckenmessungen wurden akustische Messungen der Trennwände in verschiedenen Anordnungen durchgeführt. Das Anbringen von Vorsatzschalen erfolgte erst im Zuge dieser Messungen.

Bei der Erstellung der Testmodule wurde der Nassestrich irrtümlich mit einer steiferen Trittschalldämmung ausgeführt. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen wider, die etwas schlechter als erwartet ausfielen. Dieser Aufbau ist unter baupraktischen Aspekten dennoch relevant, da eine dynamische Steifigkeit von 7MN/m^3 zwar häufig gefordert wird, im Zusammenspiel mit einer Fußbodenheizung aber nicht immer umsetzbar ist.

3. Auswertung

Alle Messreihen wurden bewertet, so dass entsprechende bauakustische Messkurven für das bewerte Luftschalldämm-Maß R'_{w} , sowie den bewerteten Trittschallpegel $L'_{n,w}$ vorliegen. Die Überlagerung der Messergebnisse zeigt die Eigenheiten der verschiedenen Decken- und Bodenaufbauten und auch spezifische Eigenschaften der Massivholz- und Modulbauweise auf.

Vereinzelte Ausbrüche der Messkurven konnten im Rahmen der Auswertung nicht zweifelsfrei zugeordnet werden und könnten auch aus Messfehlern oder ungewollten Schallkopplungen bei den Messungen resultieren. Die Auswertung der Deckenaufbauten und eine Einschätzung zu den Einflussfaktoren erfolgt im Folgenden.

3.1. Vergleich Prognose und Messung

Den bauakustischen Messungen sind frequenzunabhängige, als auch frequenzabhängige Berechnungen und Prognosen vorangegangen. Dazu wurden beispielsweise das Programm «VBAcoustic» und das Berechnungsverfahren nach Kühne und Blickle genutzt.

Die Bewertung der Flankenübertragung ist unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 12354 und DIN 4109-2 erfolgt. Erwartungsgemäß erschwerten die fehlenden Bauteilkataloge und Bemessungsverfahren die Erstellung verlässlicher Prognosen.

Der Vergleich mit den Messungen zeigte, dass die Prognosen für den Trittschallpegel mitunter im unsicheren Bereich lagen. Umgekehrt ergab sich beim Ansatz von Beschwerungen in den Moduldeckeln ein deutlich besseres Messergebnis, als vorab prognostiziert.

Die Prognosen der Spektrum-Anpassungswerte waren beim Zementestrich zutreffend. Insbesondere beim Trockenestrich mit Beschwerung jedoch unsicher. Die gemessenen Luftschalldämm-Maße lagen grundsätzlich etwas oberhalb der Prognosen.

3.2. Stoßstellenentkopplung

Wie bereits erwähnt, wurden alle Bauteilmessungen mit einer linienförmigen Entkopplung durch Elastomerlager durchgeführt. Anhand der Konstellation mit Trockenestrich mit Beschwerung und dem beschwerten X-LAM Deckel (X-LAM2) wurden zusätzlich verschiedene Entkopplungen bis hin zur direkten Kopplung studiert. Es zeigte sich, dass mit einer möglichen Verbesserung von bis zu 10 dB ein großes Potenzial vorhanden ist. Dies gilt insbesondere für den Luftschall. Aus den Messkurven des Trittschallpegels ist deutlich erkennbar, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen die Wirksamkeit der Entkopplung nur bei richtig ausgelegten Lagern gelingt. In der konkreten Betrachtung konnte nur das regulär angedachte Lager die Eigenfrequenz des Estrichaufbaus wirksam bedämpfen. Dies zeigte beim Moduldeckel X-LAM1 noch deutlicher.

Ob die weiteren Entkopplungsvarianten bei korrekter Auslegung gleiche Ergebnisse erzielen können, kann nicht abschließend bewertet werden. Die Messungen schärfen in jedem Falle die Annahme, dass das reale Lastbild, die Materialqualität und die Qualität der Montageausführung erheblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Entkopplung haben.

Die sehr detaillierte Betrachtung der Stoßstellendämm-Maße durch Herrn Jan Georg Rathfelder [2] zeigt ebenfalls auf, dass die mögliche Verbesserung groß ist und maßgeblich durch die Qualität und Auslegung des Lagers bestimmt wird.

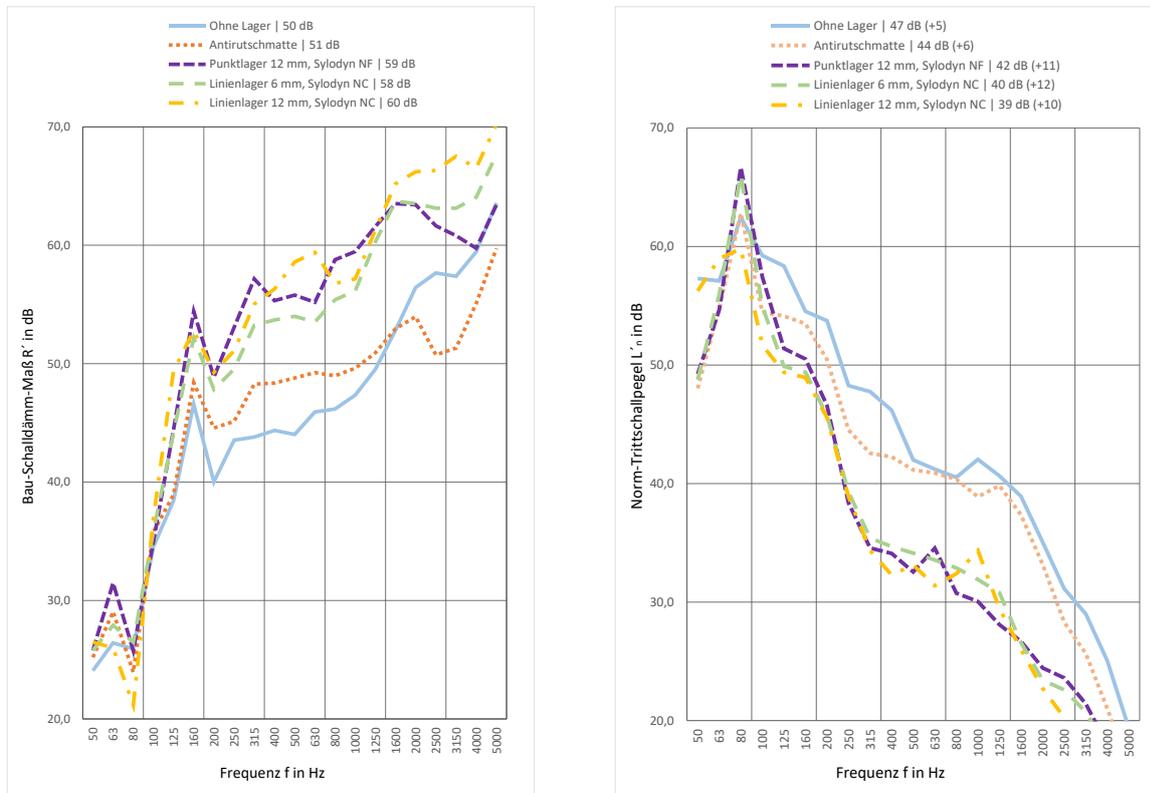


Abbildung 5: Messergebnisse, Bodenaufbau Trockenestrich mit Schüttung, Moduldeckel X-LAM2, R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

Eine vollständige Entkopplung ist konstruktiv nicht immer möglich. Inwieweit punktuelle oder linienförmige Kopplungen die Qualität der Trennbauteile beeinflussen, kann aktuell nicht verlässlich prognostiziert werden.

Die Störung der Entkopplung durch Zugverbindungen, hier durch Teilgewindeschrauben zwischen Moduldeckel und Modulboden simuliert (Abbildung 6), erhöht den Trittschallpegel. Die Bedämpfung der Estricheigenfrequenz durch die Elastomerlager wird durch die Kopplung verringert, was am Anstieg des Schallpegels im Bereich der Resonanzfrequenz erkennbar ist.

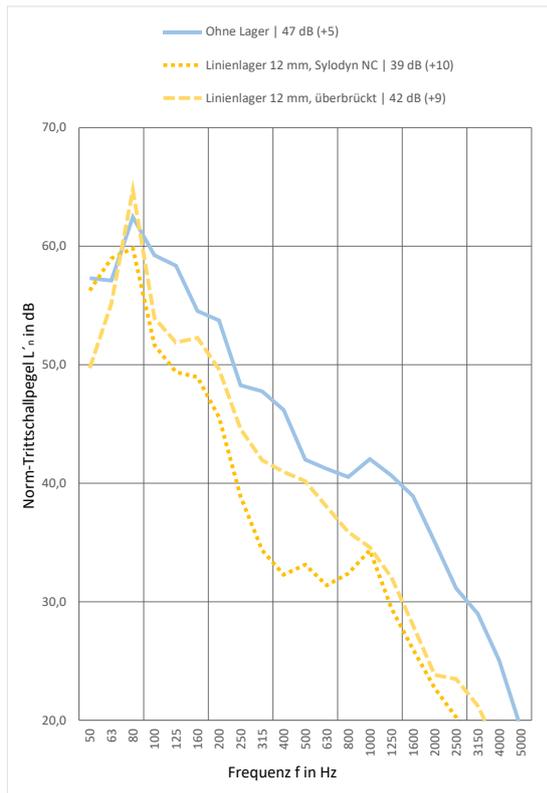
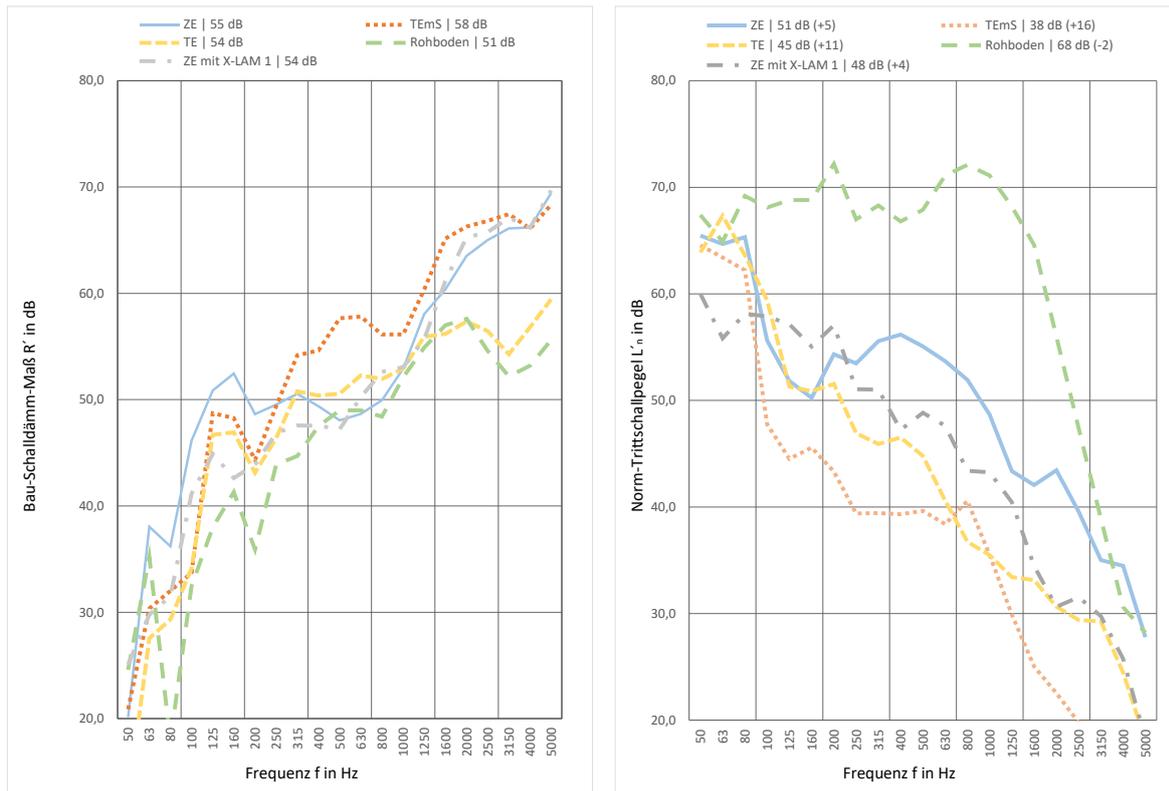
Abbildung 6: Schallkopplung, $L'_{n,w}$ ($C_{i,50-2500}$)

Abbildung 7: Kopplung mit Teilgewindeschrauben

3.3. Fußbodenaufbau

Erwartungsgemäß sind die Spektrum-Anpassungswerte des Nassestrichs viel geringer als die eines Trockenstrichs. Die Ausführung eines Trockenstrichs ohne Schüttung ist für gesetzliche Mindestanforderungen darstellbar, aber nicht unbedingt empfehlenswert. Innerhalb von Nutzungseinheiten und bei eingeschossigen Gebäuden ist der Trockenstrich ohne zusätzliche Beschwerung sicherlich eine praktikable und bzgl. der Vorfertigung in Modulbauweise bevorzugte Variante.

Die recht hohe Eigenfrequenz des Zementestrichs bei ca. 80-90 Hz wird auf die falsche Trittschalldämmung mit einer dynamischen Steifigkeit von ca. 40 MN/m³ zurückgeführt. Die Ausführung einer Schüttung bedämpft die Estricheigenfrequenz spürbar, so dass diese nur schwach ablesbar ist. In folgender Abbildung (Abbildung 8) sind die Estrichvarianten mit Ausbildung des Moduldeckels HRB1 dargestellt. Zusätzlich informativ die Konstellation mit Moduldeckel X-LAM1.

Abbildung 8: Varianten Bodenaufbau, Moduldeckel HRB1, R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

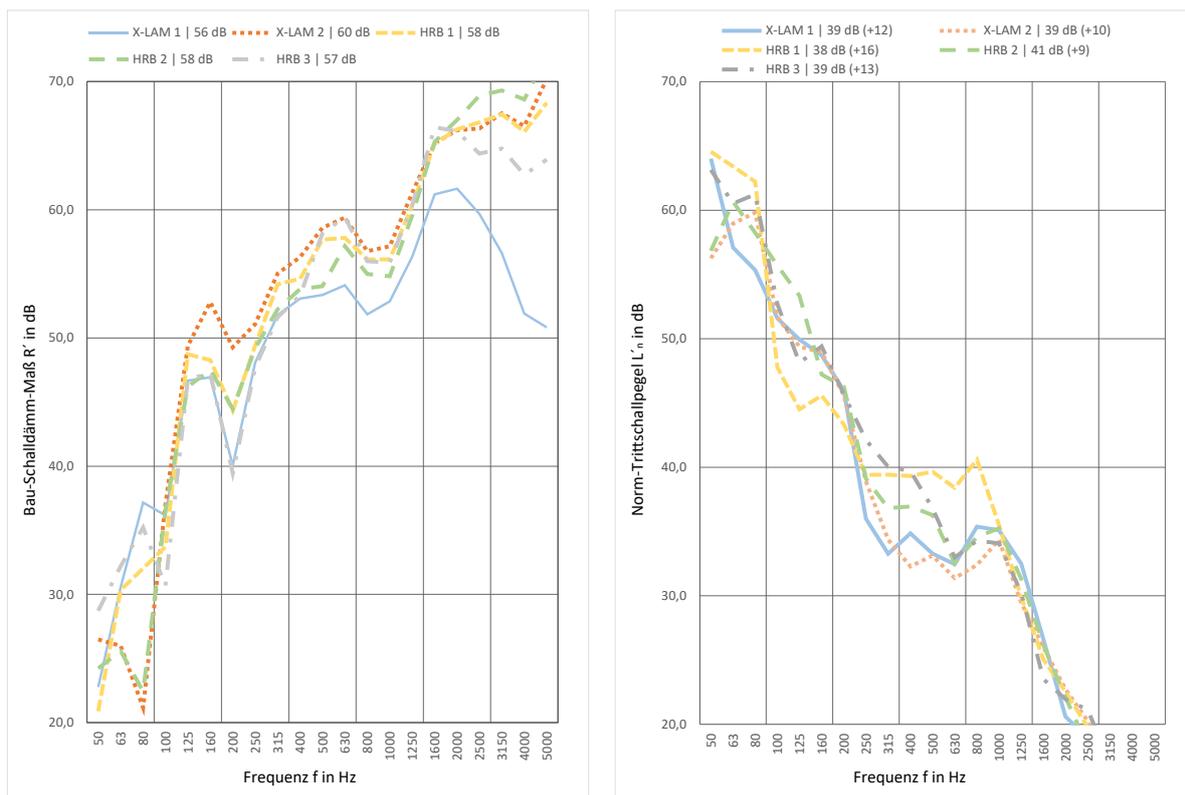
3.4. Moduldeckel

Die Messung der verschiedenen Moduldeckel zeigt, dass sowohl X-LAM-Elemente, als auch HRB-Elemente wirksam eingesetzt werden können. Eine Tendenz zugunsten der X-LAM-Bauteile bei der Betrachtung des Trittschallpegels kann aus Abbildung 9 abgeleitet werden. Bei den Holzrahmenbau-Elementen zeigt sich wenig überraschend, dass große Schalenabstände mit den daraus resultierenden Resonanzfrequenzen wirksam sind. Der Ansatz zweier Schalen durch Einbau eines flachen HRB-Elementes mit Luftraum oberhalb (HRB3) konnte nicht überzeugen.

Die Beschwerung des Moduldeckels brachte nur in einzelnen Frequenzbändern Vorteile. Ob hier die Trennlage aus Mineralwolle positiv oder negativ zu bewerten ist, konnte in den Prüfungen nicht ermittelt werden. Es ist denkbar, dass das direkte Aufbringen der losen Schüttung zielführender sein könnte.

Bei Anwendung des Moduldeckels X-LAM1 zeigt sich für alle gewählten Bodenaufbauten eine Bedämpfung im Frequenzbereich von ca. 63 Hz. Diese Eigenschaft wird auch beim Trockenestrich bestätigt (Abbildung 9). Bei den Baumesungen konnte diese Eigenschaft nur beim Zementestrich gänzlich bestätigt werden (Abbildung 11).

Der Einbruch des Luftschalldämm-Maßes im Bereich der Koinzidenzfrequenz der Brettsperrholzelemente ist unabhängig des Moduldeckels aufgrund der Wandabstrahlung im Empfangsraum deutlich erkennbar. Das beschwerte X-LAM-Element, X-LAM2, und die HRB-Elemente, HRB1 und HRB2, weisen einen geringeren Einbruch der Luftschalldämmung im Vergleich zum unbeschwerten Moduldeckel X-LAM1 auf, was auf Grund der zusätzlichen Deckenabstrahlung konsistent ist. Beim Trittschallpegel hat die Koinzidenzfrequenz hingegen einen untergeordneten Einfluss und verursacht nur einen geringen Resonanzanstieg.

Abbildung 9: Varianten Moduldeckel, Bodenaufbau Trockenestrich mit Schüttung, R'_{w} bzw. $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

3.5. Flankierende Wände

Bei allen Messungen zeigen sich Resonanzeinbrüche im Bereich von 100 Hz bis 200 Hz. Die Brettsperrholzwände im Empfangsraum scheinen auf Grund ihrer Koinzidenzfrequenz für den systematischen Einbruch der Messkurven verantwortlich zu sein. Insbesondere im Zusammenspiel mit Trockenestrichen können ungünstige Überlagerungen in diesem Frequenzbereich entstehen. Eine Kompensation dieses Effekts durch eine Ausbildung allseitiger Vorsatzschalen im Empfangsraum wurde im Rahmen der Studie nicht untersucht. Eine direkte Beplankung mit Werkstoffplatten ergab in den Messungen keine deutliche Verbesserung, was vermutlich an der nur geringfügig veränderten Koinzidenzfrequenz liegt. Bei der Planung ist das Zusammenspiel aus Koinzidenzfrequenz der Bauteile und der Eigenfrequenz des Estrichs zu berücksichtigen.

4. Verifizierung an gebauten Objekten

Die Erkenntnisse der Studie wurden anhand einiger gebauter Objekte verifiziert. Die Messergebnisse konnten in etwa reproduziert werden. Die Trittschalldämm-Maße in den Bauprojekten liegen durchschnittlich etwas oberhalb des in den Versuchen gemessenen Niveaus. Die Luftschalldämm-Maße im positiven Sinne ebenfalls. Innerhalb der Objekte zeigten sich systematische Streuungen beim Trittschallpegel, deren Ursache unter anderem bei der Auslegung und Anordnung der Elastomerlager vermutet wird. Weiterhin könnte die Ausbildung modulübergreifender Räume mit Unterzügen und Stützen verantwortlich sein.

Im konkreten Beispiel zweier baugleicher Mehrfamilienhäuser, welche dreigeschossig aus zwei Wohnungstypen erstellt worden, lagen bei den Messungen der beiden Wohnungstypen deutliche Abweichungen vor, obwohl Fußbodenaufbau und Entkopplungssystematik identisch ausgeführt worden. In beiden Häusern konnte dies nahezu reproduziert werden, so dass Montagefehler als Ursache unwahrscheinlich sind. Während im Kinderzimmer der großen Wohnung ein sehr niedriger Trittschallpegel in Qualität eines erhöhten Schallschutzes vorherrscht, wird im Schlafzimmer der kleinen Wohnung nur der gesetzliche Mindestanspruch erfüllt.

Die Messungen in den Mehrfamilienhäusern mit Grundriss gemäß Abbildung 10 veranlassen zu folgenden Annahmen:

- Die Ausführung mittels Zementestrich erfüllen in den Versuchs- und Baumessungen die gesetzlichen Mindestanforderungen. Die Anforderungen des erhöhten Schallschutzes wurden teilweise auch erzielt. Die Spektrum-Anpassungswerte sind niedrig.
- Die Entkopplung, insbesondere von Punktlasten unter Stützen, kann durch eine falsche Lagerauslegung oder zu hoch prognostizierte Lasten deutlich vermindert sein. Eine wünschenswerte Abstimmung bei ca. 25 Hz ist dann nicht mehr gegeben.
- Die Vorsatzschale im Empfangsraum der großen Wohnung verbessert die Bedämpfung im tiefen Frequenzbereich.



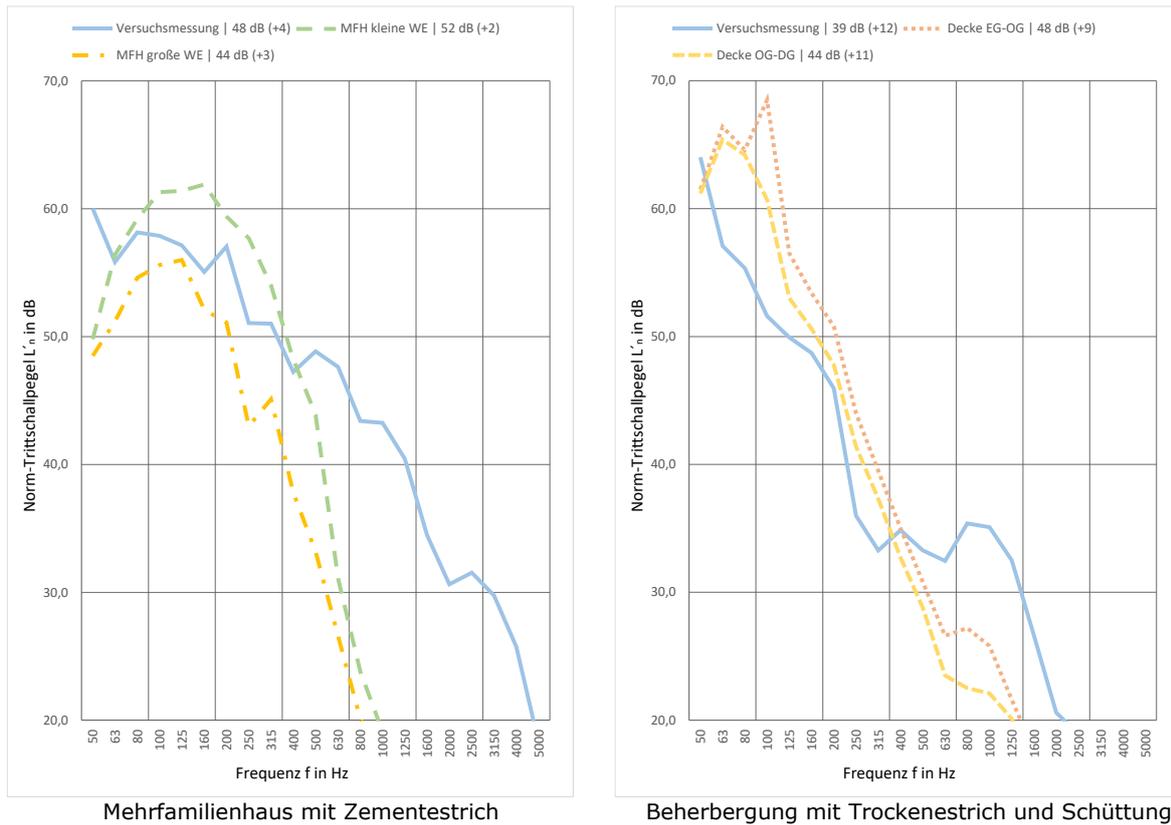
Abbildung 10: Grundriss Mehrfamilienhaus, Darstellung kleine und große Wohneinheit, dreigeschossig identisch

Im zweiten Objekt, eine dreigeschossige Beherbergung aus baugleichen Einzelapartments, konnte der Einfluss der Lagerauslastung festgestellt werden. Alle Bauteilanschlüsse und die Entkopplung sind in den Geschossen exakt identisch ausgeführt worden.

Durch einen starken Anstieg des Pegels zwischen 80-125 Hz, ist der bewertete Trittschallpegel der Trenndecke im EG ca. 4 dB höher als jener im 1.OG. Vergleichbar zeigte sich dies auch beim Luftschalldämm-Maß der Bauteile.

Die doppelte Belastung der Lager, welche in beiden Fugen identisch sind, scheint die entkoppelnde Wirkung soweit zu reduzieren, dass die Eigenfrequenz des Trockenestrichs deutlich messbar ist. In der Versuchsmessung ist die Resonanzfrequenz des Trockenestrich bei ca. 100 Hz kaum abgebildet und wird deutlich wirksamer bedämpft. Im Gegensatz zur Versuchsmessung betrug der Schalenabstand zwischen Moduldeckel und Modulboden nicht 100 mm sondern 40 mm. Vermutlich hat dies ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Bedämpfung bei tiefen Frequenzen. Mit aktuellem Kenntnisstand kann nicht identifiziert werden, wie der Einfluss der beiden Faktoren gewichtet werden sollte.

Mit einem bewerteten Trittschallpegel, $L'_{n,w}$, von 44 dB bzw. 48 dB sind beide Objektmessungen insgesamt zufriedenstellend. Der Spektrum-Anpassungswert war jedoch bei beiden Messungen hoch. Durch eine bessere und differenzierte Lagerauslegung hätte voraussichtlich eine höhere und zwischen den Geschossen gleichwertige Qualität erreicht werden können.

Abbildung 11: Vergleich Versuchs-messung und Objekte, Norm-Trittschallpegel, $L'_{n,w}$ ($C_{1,50-2500}$)

5. Fazit

5.1. Eigenfrequenz Brettsper Holz

Bei den Luftschallmessungen hat die Koinzidenzfrequenz der Brettsper Holzbauteile, die bei üblichen Wandstärken im Bereich von 100-200 Hz liegt, häufig einen Einfluss auf die bewerteten Schallpegel. Eine wirksame Kompensation könnte die Ausbildung allseitiger Vorsatzschalen sein, die in der Studie nicht untersucht wurde. Eine hohe Qualität dieser Ausführung ist unumstritten, geht jedoch zu Lasten der möglichen Sichtoberflächen und deutlich größerer Wandstärken. Höhere Erstellungskosten bei verringertem Wohnflächenanteil gehen ebenfalls einher, weshalb dieses Vorgehen für die Marktfähigkeit des Holzmodulbaus kritisch ist.

5.2. Ausbildung und Dimensionierung der Entkopplung

Bei der Dimensionierung und Anordnung der Entkopplungslager ist eine genaue Prognose der vorherrschenden Lasten äußerst wichtig, um eine adäquate Lagerdimensionierung vornehmen zu können. Fehleinschätzungen in der Tragwerksplanung, können damit erheblichen Einfluss auf die Qualität der Trennbauteile haben.

Die differenzierte Auslegung der Entkopplung gilt es zu verfeinern. Häufig wird die zulässige Stauchung unter Eigengewicht als Dimensionierung herangezogen. Die Eigenfrequenz sollte bei der Auslegung noch stärker in den Fokus rücken.

Die Störung der Entkopplung durch vertikale Verbindungen wurde in den Versuchen simuliert. Da die Einflüsse der verschiedenen Verbindungstypen, wie Winkel, Schrauben, Knaggen und weitere Kopplungsarten kaum vorhersehbar sind, muss der Fokus zukünftig weiter auf der Ausbildung entkoppelter Zug- und Schubverbindungen liegen. Eine verlässliche Prognose der diversen Verbindungsmöglichkeiten ist aktuell nicht möglich.

5.3. Planung und Umsetzung zukünftiger Projekte

Die Studie zeigt die Potenziale der Modulbauweise und zweischaligen Ausbildung der Holzbauteile in diversen Varianten. Es bestehen viele praxisgerechte Bauteilaufbauten, die in der Modulbauweise angewandt werden können.

Die Kenntnis und Erfahrungen müssen durch weitere Studien zu den Bauteilen und Einflussgrößen vertieft werden, damit die Berechnungen und Prognosen eine höhere Zuverlässigkeit für Bauherren, Planer und Ersteller zulassen.

Langfristig müssen neben der sicheren Prognose der Bauteilqualitäten auch die verschiedenen Flankenausbildungen und Modulstöße in Berechnungs- und Prognoseverfahren verankert werden. Planer müssen in die Lage versetzt werden, unabhängig und verlässlich in Holz- und Holzmodulbauweise planen zu können, ohne dabei ein erhöhtes planerisches Risiko eingehen zu müssen. Bis dieser Zustand erreicht ist, ist der frühzeitige Austausch zwischen Bauherren, Planern und Herstellern unabdingbar. Insbesondere die verantwortliche Rolle der Hersteller bleibt vorerst bestehen.

5.4. Forschungsbedarf

Die Versuchsreihe stellt trotz des großen Umfangs getesteter Bauteile nur einen Bruchteil der möglichen Konstellationen dar. Eine Untersuchung einzelner Einflussfaktoren und Wechselwirkungen ist nur in Auszügen erfolgt.

Viele Aspekte müssen noch intensiver studiert werden, um sichere Prognosen tätigen zu können. Dazu zählen unter anderem:

- Erweiterung der gemessenen Bauteilaufbauten durch weitere Variation der Parameter: Schalenabstand, Dämmstoff und Bekleidung.
- Optimierung des Einsatzes von Beschwerungen auf dem Moduldeckel, sowie der Einsatz von Tilgern als Teil des Moduldeckels.
- Effiziente Auslegung der Bauteilstärken zur Vermeidung ungünstiger Resonanzerscheinungen durch die Koinzidenzfrequenzen der angrenzenden X-LAM Bauteile.
- Bewertung und Prognose von konstruktiven Kopplungen und Verbindungen.
- Wirksame und differenzierte Auslegung der Entkopplungslager.

6. Literaturhinweise

- [1] Bachelorarbeit an der TH Rosenheim, *Schallschutz in modularer Holzmassivbauweise, Ausarbeitung und Prüfung von Deckenaufbauten, sowie deren Bewertung unter schallschutztechnischen und wirtschaftlichen Aspekten*, 25.11.2019, Matthias Lutter
- [2] Masterarbeit an der TH Rosenheim, *Messtechnische Ermittlung von Stoßstellen-dämm-Maße von Wohnmodulen in Holzmassivbauweise*, 03.07.2020, Jan Georg Rathfelder