

Entwicklung neuer Methoden zur Optimierung der Flankenschalldämmung im Massivholzbau mit Brettsperrholz

Blasius Buchegger
LKI – Labor für Bauphysik
Technische Universität Graz
Graz, Österreich



Entwicklung neuer Methoden zur Optimierung der Flankenschalldämmung im Massivholzbau mit Brettsperrholz

1. Einleitung

Die Verwendung von Massivholzkonstruktionen im mehrgeschossigen Wohnbau gewinnt international immer mehr an Bedeutung, da diese Bauweise viele Vorteile mit sich bringt. So kann beispielsweise der hohe Vorfertigungsgrad der Konstruktionen die Baukosten massiv senken und führt zu einer Reduktion der Komplexität der generellen Bauweise. Zur heutigen Zeit der Energiewende spielt der Nachhaltigkeitsgedanke eine große Rolle, welcher auch im Bauwesen einen immer höheren Stellenwert einnimmt.

Aufgrund der teils hohen bautechnischen Anforderungen insbesondere im Bereich des Schallschutzes nimmt auch die Notwendigkeit der Optimierung bestehender Konstruktion zu. Die Erfüllung dieser Anforderungen führt aber zur Notwendigkeit der Entwicklung neuartiger Konstruktionen. Bezogen auf die schalltechnische Leistungsfähigkeit der Produkte spielt neben der Direktschalldämmung auch die Flankenschalldämmung eine maßgebliche Rolle.

Insbesondere die Forschung und Entwicklung im Bereich der Flankenschalldämmung stellt aufgrund der aktuell zur Verfügung stehenden Methoden eine große Herausforderung dar, da hierbei zumeist normative, messtechnische Untersuchungen an Konstruktionen bei nahezu realer Baugröße durchgeführt werden müssen. Dadurch werden Sensitivitätsanalysen und Entwicklungen zu einem zeit- und kostenintensiven Unterfangen, insbesondere, da es einerseits eine große Anzahl an möglichen Aufbauten von Brettsperrholzelementen gibt, andererseits auch schier unzählbare Möglichkeiten der Verbindung dieser Elemente. Somit begrenzen die aktuell verfügbaren normativen Mess- und Berechnungsmethoden die Möglichkeiten insbesondere im Bereich der Forschung und Entwicklung neuer, innovativer Verbindungssysteme.

Durch die Verwendung erweiterter, spezialisierter und vertrauenswürdiger Mess- und Berechnungsmethoden kann die hohe Anzahl an möglichen Kombinationen der Aufbauten in eine Berechnungsumgebung ausgelagert werden. Dies ermöglicht sehr umfangreiche Sensitivitäts- und Parameterstudien im Vorfeld von normativen Messungen, wie auch die Entwicklung neuartiger Ansätze zur Reduktion der Schallübertragung. Diese Studien können für die Optimierung von bestehenden Systemen, wie auch für die Vorentwicklung neuer Verbindungssysteme und Ausführungsarten von Stoßstellen eingesetzt werden. Durch diese Vorgehensweise kann der Wissenstand über die schalltechnischen Eigenschaften von Verbindungsmitteln und der Ausbildung von Stoßstellen maßgeblich erweitert werden, und die Entwicklung von innovativen Leitdetails für den Massivholzbau gefördert werden. Es ist zu erwarten, dass dadurch eine erhöhte Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus entsteht.

1.1. Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Methoden im Bereich der Flankenschallübertragung

Im Rahmen der Doktoratsinitiative «DokIn`Holz» wurden im Zuge des Projektes «Das akustische Verhalten von Wand- und Deckenverbindungen im Massivholzbau» umfangreiche Untersuchungen zur Flankenschalldämmung in Brettsperrholzkonstruktionen durchgeführt. Dieser Beitrag stellt einen kurzen Überblick über einige der Forschungsansätze, Ergebnisse und deren Anwendung dar.

1.2. Schallübertragung zwischen benachbarten Räumen im Massivholzbau

Die Normenserie EN 12354 stellt ein vielfach verwendetes Vorhersagemodell zur Berechnung der Übertragung von Luftschall oder Trittschall zwischen benachbarten Räumen zur Verfügung. Hierbei wird die gesamte Schallübertragung von einem sogenannten Senderaum zum sogenannten Empfangsraum in unterschiedliche Übertragungswege unterteilt (Abbildung 1). Zusätzlich zum Pfad der Direktschallübertragung (D_d) können hierbei die Pfade der Flankenschallübertragung eine wesentliche Rolle spielen (F_f , D_f , F_d).

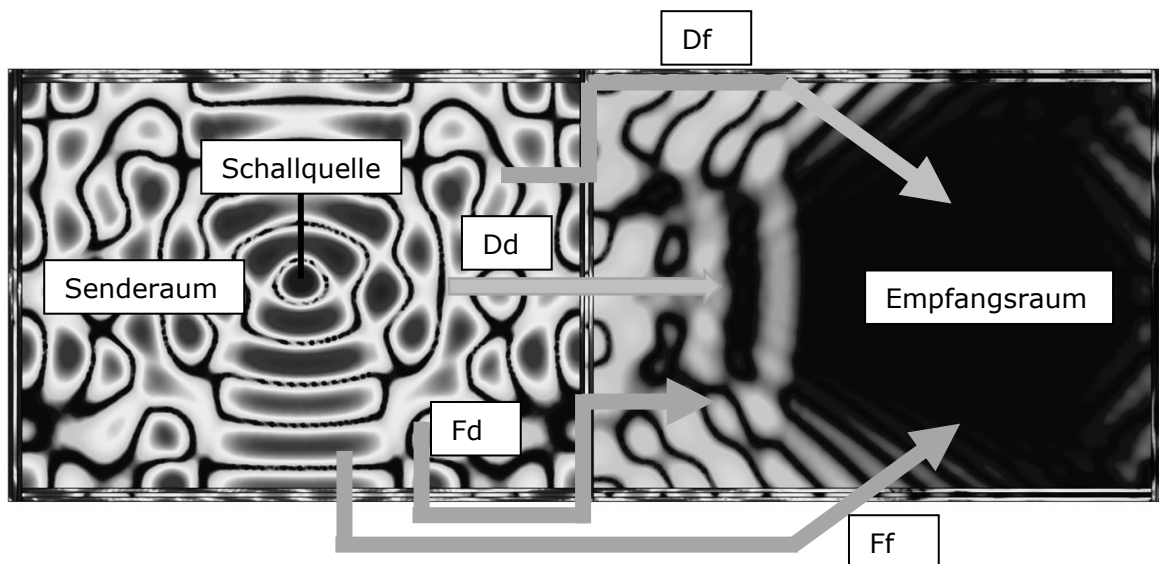


Abbildung 1: Beispiel der möglichen Schalldruckverteilung in einem Senderaum (links) und einem Empfangsraum (rechts); Unterteilung der gesamten Luftschallübertragung nach EN 12354 in unterschiedliche Übertragungspfade

Um die Planungssicherheit dieses Berechnungsmodell sicherzustellen, müssen die wesentlichen Kriterien der Statistischen Energie Analyse (SEA) erfüllt sein, welche die Basis dieses Prognosemodells darstellt [1] [2]. Für massive Bauweisen wie Beton sind diese Kriterien in den meisten Fällen erfüllt, wodurch die Berechnungen vereinfacht werden können, indem homogene, isotrope Materialien angenommen werden. Im Zuge der Prognosen können die Verbindungen als starr angenommen werden. In der Folge kann die Dimensionierung der Stoßstellendämmung durch eine Reduktion der Parameter auf die Art der Stoßstelle (Verzweigungswege) und die Massen bzw. die damit verbundenen mechanischen Impedanzen der beteiligten Bauteile reduziert werden, was zumeist zu einer ausreichenden Planungssicherheit führt.

Bei Holzkonstruktionen, insbesondere bei Brettsperrholz treten vielfach physikalische Effekte auf, welche im Gegensatz zu Beton nicht vernachlässigbar sind und unter Umständen berücksichtigt werden sollten. Derartige Effekte, welche von den idealen Kriterien der SEA abweichen, können

- Anisotrope Eigenschaften des Materials Holz und der Brettsperrholzplatte
- Wirksame Arten von Schwingungsfeldern und Wellentypen
- Hohe Materialdämpfung und damit verbunden Ausbreitungsdämpfung
- Umwandlung (Transformation) von Wellentypen in Unstetigkeiten wie Stoßstellen bzw. Verbindungsmitteln
- Art des Holzes, Holzfeuchtigkeit, mechanische Impedanz, statische Belastungen, etc.

sein. Viele dieser zumeist positiven Eigenschaften des Materials Holz verminderten jedoch bislang die Präzision der Berechnungen der Schallübertragung, da die bis heute angewendeten Modelle nur bedingt Gültigkeit besitzen. Dies kann einerseits oftmals zu einer Überdimensionierung der Bauten führen, was die Baukosten steigen lässt. Andererseits wird für Holzbauten die Dimensionierung für kritische Anwendungsbereiche wie der Forderung nach einem erhöhten Schallschutz besonders bei tiefen Frequenzen erschwert. In diesen

Frequenzbereichen können nicht nur die Berechnungsmethoden, sondern auch die Messmethoden eine hohe Unsicherheit aufweisen, wobei aktuelle Überarbeitungen der zugrundeliegenden Normen diese Eigenschaften deutlich besser berücksichtigen.

Eine der Aufgaben einer praxisnahen Grundlagenforschung ist es somit, neue Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um die komplexen schalltechnischen Eigenschaften von Brettsperrholz in Berechnungsmethoden in einer für die Praxis nutzbare Weise umzusetzen. Hierzu wurde international bereits einiges an Forschungsarbeit geleistet. Beispiele hierzu sind für die Direktschalldämmung z.B. bei [3] [4] [5] zu finden, für die Flankenschallübertragung sind beispielhaft bei [6] [7-12] zu erwähnen.

1.3. Verbindungsmittel und schalltechnische Eigenschaften der Stoßstelle

Am internationalen Markt existiert eine hohe Anzahl an unterschiedlichen Verbindungsmitteln und Arten, Brettsperrholzelemente miteinander zu verbinden. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt eine Auswahl gängiger Methoden der Verbindungen. Neben unterschiedlicher Schrauben- und Winkelverbindern, sowie einer Vielzahl von elastischen Zwischenschichten kommen sehr oft auch Verbindungsmittel zum Einsatz, welche auf bestimmte Anwendungen spezialisiert sind [13].

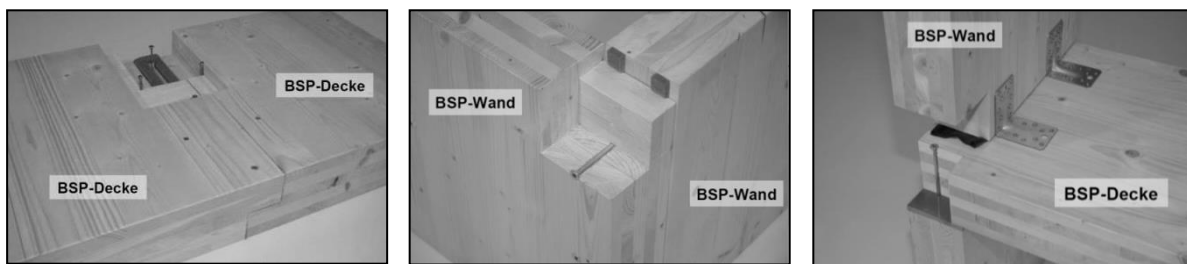


Abbildung 2: Typische Verbindungsmittel und Stoßstellenausbildung im Massivholzbau mit Brettsperrholz [14]

In Kombination mit der vielfältigen Weise der Ausbildung und Variationen von Brettsperrholzplatten (Qualität, Dicke und Anzahl der Schichten, Richtung der Deckschicht, geometrische Abmessungen, ...) ergibt sich eine unzählbare Anzahl an möglichen Konstruktionsvarianten. In vereinfachter Weise kann man die Auswirkung des Zusammenschlusses von Brettsperrholzplatten beispielsweise durch eine Definition schalltechnischer Kopplungssteifigkeiten, einer Übertragungsdämpfung und einer Stoßpressung approximieren. Untersuchungen zeigten, dass man u.a. drei Funktionen einer Stoßstelle definieren kann, welche ihr Wirkungsspektrum in unterschiedlichen Frequenzbereichen haben.

In der nachfolgenden Abbildung 3 ist eine derartige Sichtweise schematisch dargestellt. Neben einer gängigen Interpretation der Stoßstelle als Übertragungsmedium zeigen sich auch andere Funktionen, wie die Wirkung als Koppellelement von lokalen zu globalen Moden oder die Wirkung als Transformator unterschiedlicher Typen von Körperschallwellen. Details zu diesen Themen werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

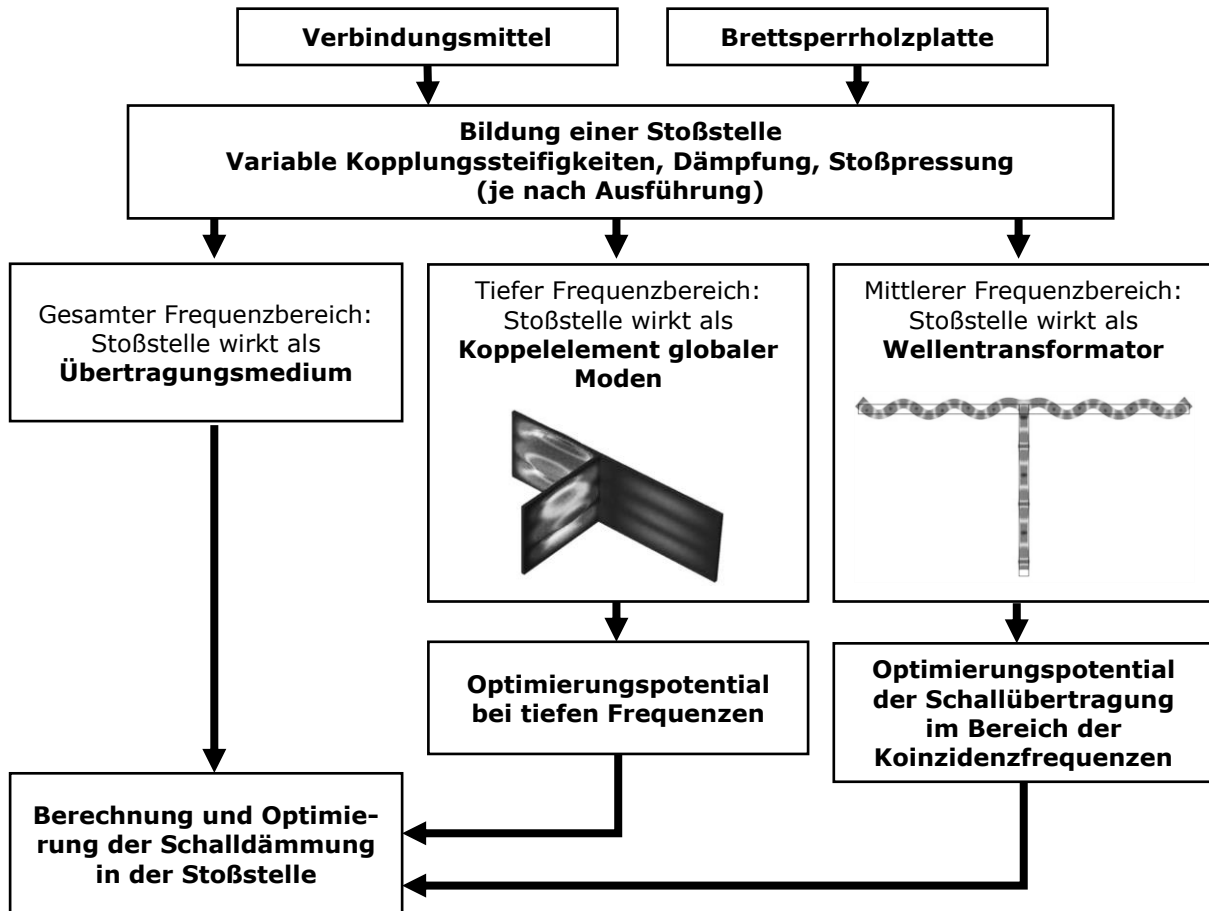


Abbildung 3: Generalisierte Darstellung schalltechnischer Wirkungsweisen und Potential neuer Methoden zur Optimierung der Flankenschalldämmung im Massivholzbau

1.4. Potential der Erweiterung normativer Messmethoden mit experimentellen Mess- und Berechnungsmethoden

Bei der Dimensionierung der schalltechnischen Eigenschaften von Konstruktionen aus Brettsperrholz muss vielfach auf messtechnische Untersuchungen zurückgegriffen werden, da bisherige normative Prognosemodelle die Eigenschaften von Holzkonstruktionen, bzw. der verwendeten Verbindungsmittel nur bedingt berücksichtigen. Dies kann besonders bei der Berechnung der Flankenschallübertragung einerseits zu einer kostenintensiven Überdimensionierung der Konstruktionen führen, um in den geforderten schalltechnischen Bereichen (200 Hz bis 1250 Hz für die Einzulangaben) die notwendigen Spezifikationen zu erfüllen. Andererseits sind Bemessungen beispielsweise für einen erhöhten Schallschutz im tieffrequenten Frequenzbereichen nicht oder nur bedingt möglich.

Um die notwendige statistische Aussagekraft der Sensitivitäten bzw. der Auswirkungen von Variationen der Stoßstellen sicherzustellen, sind umfangreiche Messserien notwendig. Diese erfordern jedoch ein hohes Maß an finanziellen, zeitlichen und materiellen Ressourcen, was in Verbindung mit der hohen Anzahl an möglichen Kombinationen von unterschiedlichen Verbindungsmitteln und Ausführungsarten der Brettsperrholzplatten ein Unterfangen darstellt, das ein hohes Maß an Ressourcen erfordert.

Zusätzlich zu standardisierten Messungen des Stoßstellendämm-Maßes können Mess- und Berechnungsmethoden verwendet werden, welche eine weit verbreitete Anwendung in anderen Fachbereichen wie dem Maschinenbau und der Fahrzeugakustik haben.

Hierzu können beispielsweise folgende Methoden zielführend verwendet werden:

- **Experimentelle Modalanalyse** (Messmethode): Identifikation des modalen Verhaltens von realen Konstruktionen zur Erhöhung der Vertrauenswürdigkeit der Messung der Stoßstellendämm-Maße, der Ermittlung der Materialdämpfung und schalltechnisch wirksamen, elastischen Materialparametern; Analyse von Resonanzeffekten, welche die Schalldämmung erhöhen können (Entkopplung durch elastische Zwischenschichten) oder verringern können (Plattenresonanzen oder Resonanzen von Verbindungsmitteln) [15] [16]
- Experimentelle und numerische **Schallintensitätsanalyse** (Mess- und Berechnungsmethode): Ermittlung des Energieflusses und der Übertragungspfade von Körperschallwellen in Strukturen [11, 17]
- Messung der **Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten** (Messmethode): Ermittlung von richtungsabhängigen Koinzidenzfrequenzen, elastischen Parametern, etc.
- **Finite Elemente Methode** (Berechnungsmethode): numerisches Berechnungsverfahren zur Analyse beispielsweise der Strukturmechanik oder Wellenausbreitung in Konstruktionen [11, 18]

Diese und andere Methoden ermöglichen einerseits tiefgehende Grundlagenforschung, um neue Ansätze für zukünftige Maßnahmen zur Erhöhung der Schalldämmung zu entwickeln. Andererseits ermöglichen diese Methoden, problematische Bereiche von bestehenden Konstruktionen oder Produkten zu analysieren und Optimierungsvorschläge zu entwickeln. Vielfach können die Methoden auch zur Vorentwicklung von neuen Prototypen genutzt werden, indem die Sensitivitäten einer großen Anzahl an möglichen Variationen eines Aufbaus zunächst in den Berechnungen analysiert werden, und danach die Varianten auf jene Konstruktionen reduziert werden, welche das höchste Optimierungspotential aufweisen. Diese einzelnen ausgewählten Konstruktionen und Varianten können dann in einer abschließenden normativen Messung der Stoßstellendämmung evaluiert werden. Des Weiteren ermöglichen diese Methoden in einer Grundlagenforschung die Entwicklung neuartiger Ansätze zur Optimierung von Systemen. In den nachfolgenden Kapiteln wird näher auf derartige Analysen eingegangen.

2. Die Stoßstelle als Übertragungsmedium

2.1. Normative Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes nach EN ISO 10848

Wie bereits zuvor in Abbildung 1 dargestellt, kann die gesamte übertragene Schallenergie zwischen zwei benachbarten Räumen durch eine Unterteilung der unterschiedlichen Übertragungspfade dargestellt werden. Das daraus resultierende bewertete Bau-Schalldämm-Maß

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} \right] \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

beschreibt die Dämmung der gesamten, in den Empfangsraum übertragenen Schalleistung. $R_{Dd,w}$ stellt das Schalldämm-Maß für die Direktschallübertragung dar, die restlichen Terme der Berechnung beschreiben die unterschiedlichen Flankendämm-Maße der Wege aus Abbildung 1. Als Alternative zum Bau-Schalldämm-Maß kann auch die Standard-Schallpegeldifferenz herangezogen werden, welche die Nachhallzeiten bzw. Absorption der Empfangsräume berücksichtigt. Die Ermittlung beispielsweise des Flankendämm-Maßes für den sogenannten Flanke-Flanke Weg ist definiert über den Zusammenhang

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

Hierbei beschreibt das sogenannte Stoßstellendämm-Maß

$$K_{ij} = \frac{1}{2} (D_{v,ij} + D_{v,ji}) + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

das schalltechnische Verhalten der Stoßstelle bezogen auf den jeweils untersuchten Übertragungspfad. $D_{v,ij}$ und $D_{v,ji}$ beschreiben die Schnellepegeldifferenz Schwingung normal zur Oberfläche eines Bauteils (i) bezogen auf das andere Bauteil (j) und umgekehrt. Die in der Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes verwendeten Kennwerte müssen oftmals in umfangreichen normativen Messungen ermittelt werden [19].

2.2. Messtechnische Ermittlung des Stoßstellendämm-Maßes zur Analyse der Sensitivitäten von Verbindungsmitteln

Im Zuge der Grundlagenforschung oder der Entwicklung neuer Systeme für die Flankenschalldämmung wird vielfach auf messtechnische Untersuchungen zurückgegriffen. Dabei wurden beispielsweise bei [20] unterschiedliche Wand- und Deckenstöße in Verbindung mit verschiedenen Verbindungsarten untersucht. Untersuchungen der Auswirkungen von Verbindungsmitteln mit elastischen Zwischenschichten sind beispielsweise bei [21] zu finden. Eine Zusammenstellung und Analyse von Messungen des Stoßstellendämm-Maßes von verschiedenen, internationalen Institutionen wurde bei [22] durchgeführt.

Bereits Mitte der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden an der Technischen Universität Graz die ersten Untersuchungen akustischer Entkopplung für die Flankenübertragung im Massivholzbau durchgeführt. Am Labor für Bauphysik werden aktuell umfangreiche und intensive messtechnische Untersuchungen als Basis der Entwicklung und Validierung von neuen Methoden zur Optimierung der Schalldämmung im Massivholzbau durchgeführt. Ein Auszug aus diesen Untersuchungen ist in nachfolgenden Kapiteln in einem Überblick beschrieben.

2.3. Entwicklung von Berechnungsverfahren für die Stoßstellendämmung unterschiedlicher Verbindungsmittel

Die hohe Anzahl an möglichen Stoßstellenausbildungen im Massivholzbau mit Brettspertholz führt zu einem enormen Aufwand, wenn messtechnische Untersuchungen an Konstruktionen nahezu realer Größe durchgeführt werden müssen. Im Zuge einer Vorentwicklung kann unter Verwendung numerischer Berechnungsverfahren diese hohe Anzahl an Variationen auf jene Varianten reduziert werden, welche das höchste Potential aufweisen. Des Weiteren können Struktur und Aufbau der Verbindungsmittel und Stoßstellen vor den Messungen auf deren Wirksamkeit untersucht werden, wodurch frühzeitig Tendenzen erkennbar sind und anhand dessen Modifikationen angesetzt werden können.

Um die Vorhersagepräzision numerischer Berechnungen sicherzustellen, ist es unumgänglich, die Berechnungskonzepte mit äquivalenten Messungen gegenüberzustellen und zu validieren. Dies stellt auch ein wesentliches Qualitätskriterium für die Verwendung derartiger Berechnungen dar.

Im Zuge der Forschungsarbeiten am Labor für Bauphysik der Technischen Universität Graz wurden verschiedenste Berechnungsansätze untersucht, realisiert und erweitert. Für die numerischen Berechnungen wurde vorwiegend die Finite Elemente Methode verwendet, da diese beispielsweise auch die Einbeziehung von Geometrie und Materialeigenschaften von Verbindungsmitteln ermöglicht. Zur Berechnung des Brettspertholzes und der Stoßstellen wurden unterschiedliche Materialmodelle, physikalische Randbedingungen, Analysemethoden der Eigenfrequenzen, oder des Verhaltens im Zeit- und im Frequenzbereich sowie Methoden der Evaluierung der resultierenden Kennwerte untersucht. Um die Einflussparameter präzise und nachvollziehbar untersuchen zu können, wurde zunächst generell das akustische Verhalten frei schwingender Brettspertholzplatten untersucht, dargestellt in Abbildung 4. Hierbei kam die zuvor beschriebene experimentelle Modalanalyse zu Einsatz. Durch einen Abgleich der gemessenen und berechneten Moden konnten durch diese Vorgehensweise elastische Parameter ermittelt werden, welche für akustischer Berechnungen dieser Ausführungen der Brettspertholzplatten verwendbar sind (Tabelle 1).

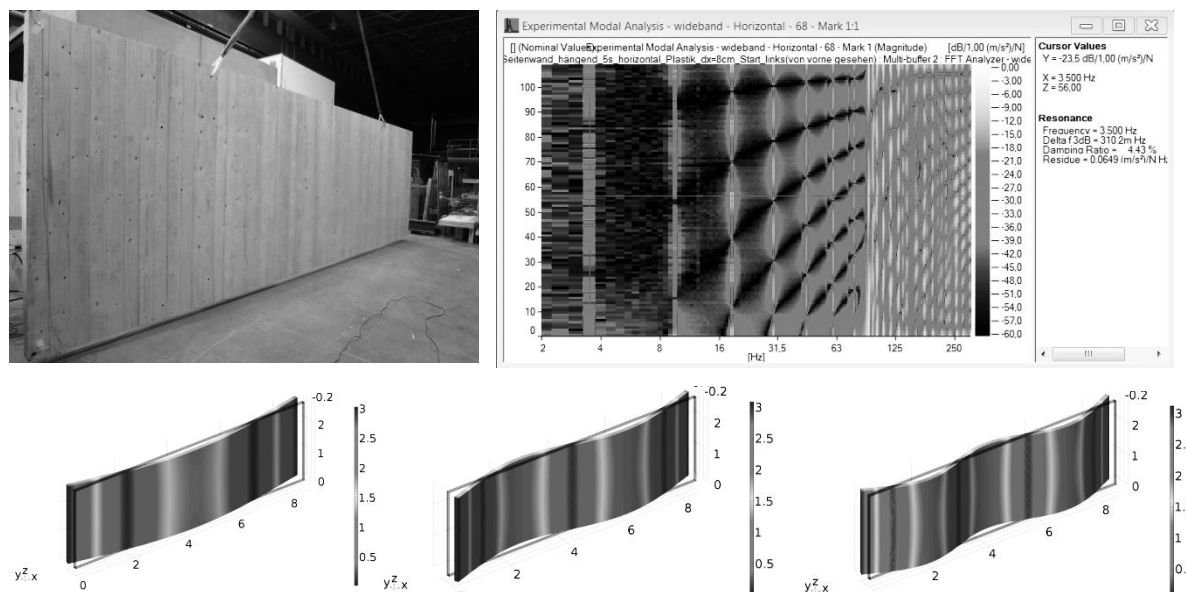


Abbildung 4: Prüfaufbau für experimentelle Messungen einzelner Brettsperrholzplatten (links) und Auszug der Resultate einer experimentellen Modalanalyse (rechts); Ergebnisse der numerischen Berechnungen der resultierenden ersten Moden (unten)

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen und berechneten Moden zur Ermittlung zuverlässiger Materialdaten für akustische Berechnungen

Mode Nr. (-)	FrequenzMessung (Hz)	FrequenzBerechnung (Hz)	Differenz (%)
1	3,5	3,500	0,089%
2	6,0	5,930	1,128%
3	9,5	9,570	0,771%
4	12,5	12,550	0,409%
5	18,5	18,520	0,135%
6	20,5	20,470	0,170%
8	30,0	30,150	0,498%
9	42,0	41,880	0,295%
10	44,0	44,010	0,033%

Tabelle 2: Berechnete Materialparameter für die Verwendung in akustischen Berechnungen

Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung des einzelnen Bretts (MN/m ²)	Elastizitätsmodul normal zur Faserrichtung des einzelnen Bretts (MN/m ²)	Schubmodul parallel zur Faserrichtung des einzelnen Bretts (MN/m ²)	Schubmodul normal zur Faserrichtung des einzelnen Bretts (MN/m ²)
11483	376	581	84,7

In einem nächsten Schritt wurden die Randbedingungen der einzelnen Brettsperrholzplatten auf den Einfluss der Lagerung auf das Schwingungsverhalten untersucht, da in der Praxis nur sehr selten ideale Randbedingungen wie frei oder starr vorkommen.

Danach wurde die Komplexität der Aufbauten erhöht, indem die Platten unter nachvollziehbaren Randbedingungen gelagert und zu Stoßstellen verbunden wurden, dargestellt in Abbildung 5. Normative Messungen des Stoßstellendämm-Maßes wurden mit experimentellen Mess- und Berechnungsmethoden erweitert. Die resultierenden Daten wurden zur Validierung der Berechnungskonzepte verwendet.

Unter Verwendung der entwickelten Methoden wurden Werte der Stoßstellendämm-Maße berechnet und unter Verwendung der normativen Berechnungen nach EN 12354-1 ein Vorhersagemodell für eine reale Bausituation erstellt. Dieses Modell konnte ebenfalls über in-situ Messungen der Luft- und Trittschalldämmung validiert werden, dargestellt in Abbildung 6.

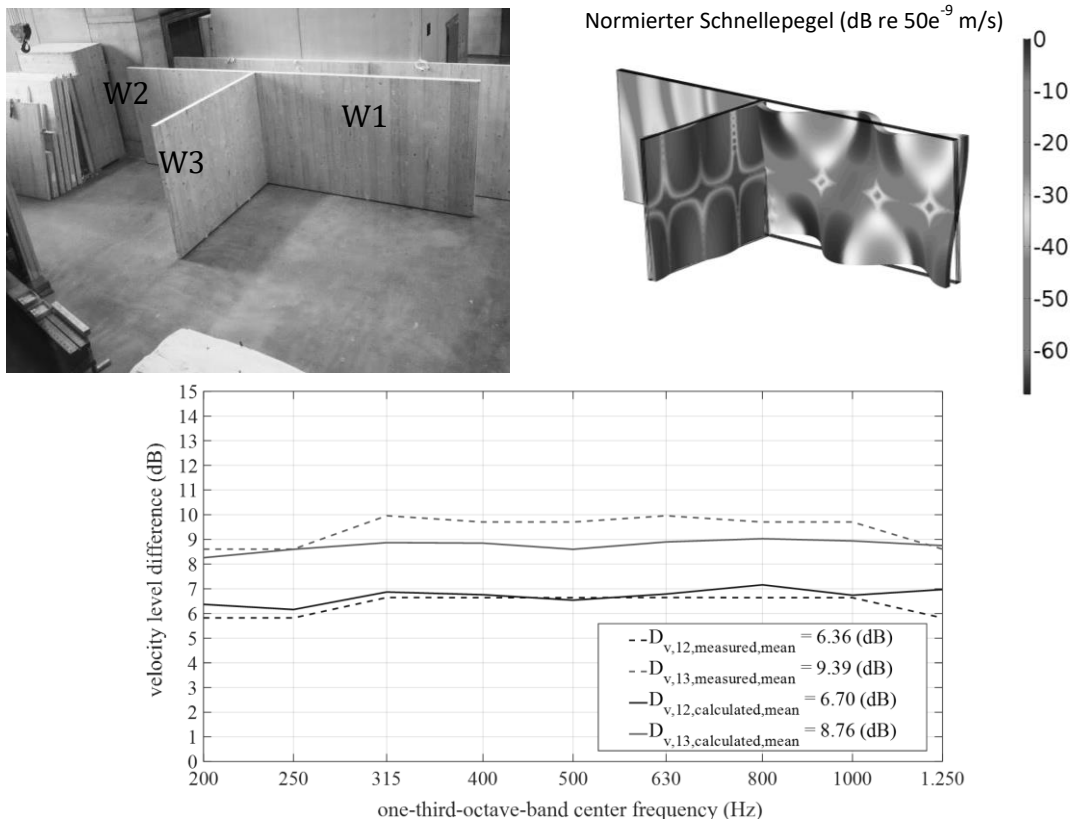


Abbildung 5: Messung und Berechnung der Körperschallübertragung über einen T-Stoß (oben links) unter Verwendung der Finite Elemente Methode (oben rechts); Vergleich der gemessenen und berechneten Schnellepegeldifferenzen (unten)



Abbildung 6: Validierung des gesamten Berechnungsansatzes – Bauvorhaben (links); Messung des Bau-Schalldämm-Maßes (rechts)

3. Modale (Ent-)Kopplung von Brettsperrholzelementen

3.1. Problemstellung

Aktuelle normative Mess- und Berechnungsmethoden sind vorwiegend auf den Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz (Direktschalldämmung) bzw. für 200 Hz bis 1250 Hz (Flankenschalldämmung) ausgelegt, welche auch für die Ermittlung von Einzulangaben der schalltechnischen Eigenschaften der Konstruktionen herangezogen werden. Das menschliche Gehör nimmt jedoch auch Frequenzen unterhalb von 100 Hz, also Frequenzen bis ca. 20 Hz wahr. Dieser darunterliegende Frequenzbereich wird nicht der Bedeutung gemäß in den Bemessungen berücksichtigt. International ist eine Tendenz zu erkennen, dass dieser tiefe Frequenzbereich immer mehr an Bedeutung gewinnt und in der Zukunft voraussichtlich auch in den normativen Prognosemodellen berücksichtigt wird. Diese tiefen Frequenzen können jedoch bei der Konzeption von Holzbauten eine enorme Herausforderung darstellen, da hier die Wirkmechanismen nur durch spezielle Maßnahmen hervorgerufen werden können. Maßnahmen wie die Verwendung von Vorsatzschalenkonstruktionen sind in diesen ausgesprochen tiefen Frequenzbereichen oftmals in der Funktionalität begrenzt, bzw. deren Umsetzung in der Praxis nur bedingt zielführend.

Für einen qualitativ hochwertigen Holzbau gilt es somit, neue Wege und Methoden zu entwickeln, die eine gute Schalldämmung besonders in diesen Frequenzbereichen sicherstellen, um den Holzbau auch für sensitive Nutzer attraktiv zu machen.

3.2. Lösungsansatz – Nutzung modaler Entkopplung

Globale Moden dominieren die Flankenschallübertragung in Gebäuden, speziell bei tiefen Frequenzen. Das Grundprinzip hierzu wurde in allgemeiner Form z.B. bei [23] diskutiert. Eine Interpretation des Effekts anhand von Brettsperrholzkonstruktionen ist in Abbildung 7 dargestellt. Eine Wand kann hierbei als ein Subsystem des gesamten Systems (benachbarte Räume) definiert werden. Moden bzw. Eigenschwingungen stellen natürliche Eigenschaften eines strukturmechanischen Systems dar. Jede dieser Wände bzw. Subsysteme weisen Moden auf. Werden diese miteinander verbunden, beeinflusst die Verbindung u.a. die Moden der einzelnen Subsysteme und dieses modale Verhalten der einzelnen Subsysteme verändert sich entsprechend der Randbedingungen. Lokale Moden können somit zu globalen Moden führen. Wird eines der Elemente bei der Frequenz einer globalen Mode angeregt, führt dies zu einer starken Schwingung des gesamten Systems und infolgedessen zu einer hohen Schallübertragung.

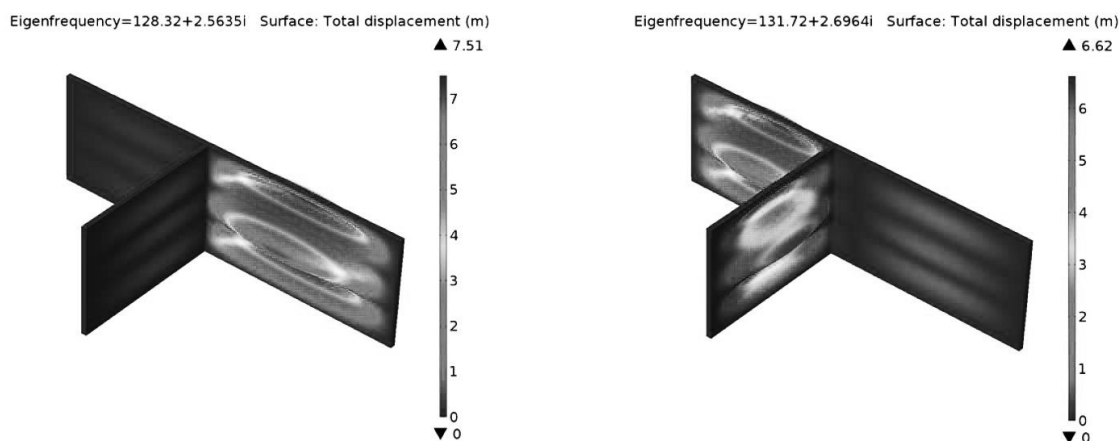


Abbildung 7: Prinzip der modalen Kopplung – «Lokale» Moden einer einzelnen Wand (links); «Globale» Moden der gesamten Konstruktion (rechts)

Dieser Effekt wurde in experimentellen und numerischen Untersuchungen umfassend analysiert (Abbildung 8). Weist nur eine der beteiligten Wände des untersuchten Übertragungspfad bei einer bestimmten Frequenz eine hohe Schwingfähigkeit (Mobilität) auf, zeigt sich die Tendenz, dass die Schnellepegeldifferenz deutlich zunimmt (W_1 - W_2 , in Terzbändern). Dies ist im Beispiel u.a. im Terzband um 50 Hz zu erkennen.

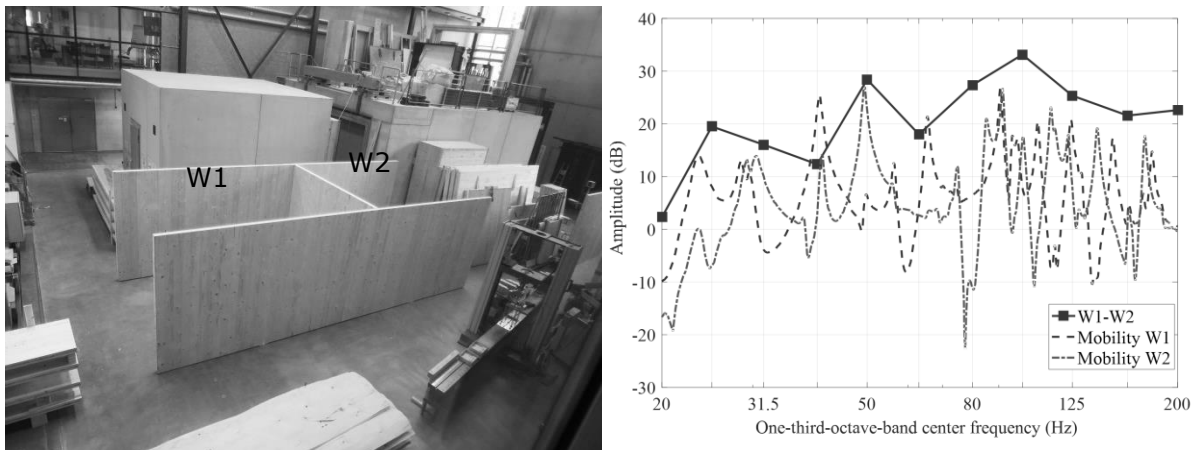


Abbildung 8: Messung der Mobilität und der Schnellepegeldifferenz einzelner Wände im Labor – Aufbau (links) und tieffrequente Messergebnisse (rechts)

Aktuell wird dieser Effekt bzw. dessen praktische Anwendung im Massivholzbau mit Brettsperrholz sehr umfassend untersucht. Numerische Berechnungen auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 2 ermöglichen hierbei umfangreiche Voruntersuchungen, welche eine Evaluierung des Potentials dieses Effektes ermöglichen. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 9 dargestellt. Ein dreidimensionales FE-Modell zweier vertikaler Räume ermöglicht eine Berechnung des resultierenden Trittschalls im unteren Raum, wenn die Decke durch Trittschall angeregt wird. Im Zuge einer Parameterstudie können Eingangsdaten wie geometrische Abmessungen, Materialparameter oder sonstige Randbedingungen variiert werden, um die Auswirkungen der Veränderungen zu ermitteln. Werden die Schichtaufbauten bzw. die Wanddicken der Brettsperrholzelemente verändert, beeinflusst dies auch die Flankenschalldämmung. Allgemein führt eine Reduktion der Wanddicke zu einer Reduktion der Masse der Wände, was direkt eine Reduktion der Schalldämmung zur Folge hat. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass eine optimale Abstimmung der Wandaufbauten und somit der resultierenden «lokalen» Moden bei gleichen oder geringeren Wandstärken zu einer deutlichen Reduktion des Trittschalls im tieffrequenten Bereich führen kann (siehe Tabelle 2, Variante 1 gilt als Referenz zu Variante 2).

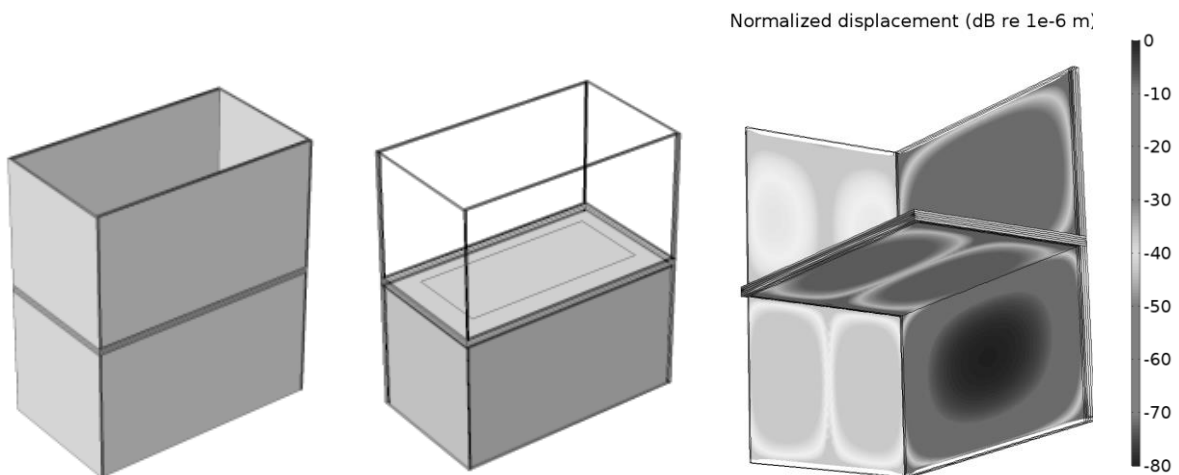


Abbildung 9: Numerische Berechnung des resultierenden Trittschallpegels im tieffrequenten Bereich bei Variation des Aufbaus der Brettsperrholzplatten; gesamtes numerisches Modell (links); Evaluierung des resultierenden Schallpegels im Raum (Mitte); Schwingungsverhalten im tieffrequenten Bereich (59,85 Hz) bei unterschiedlichen Aufbauten der Brettsperrholzplatten (rechts)

Tabelle 2: Aufbau der Brettsperrholzelemente für die modale Entkopplung

	Dicke (mm)				
	Decke	Variante 1		Variante 2	
		Flanke 1	Flanke 2	Flanke 1	Flanke 2
Lage 1	34	30	40	19	27
Lage 2	30	40	40	19	34
Lage 3	34	30	40	19	27
Lage 4	30				
Lage 5	34				
BSP Platte	162	100	120	57	88
Materialaufwand	162	382		307	
L_p (dB) (Mittelwert 20 Hz – 100 Hz)		0 (dB) (Referenz)		-10 (dB) Vgl. zu Variante 1	

Die praktische Anwendung dieser und anderer physikalischer Effekte wird aktuell umfassend am Labor untersucht. Weitere Details sind dazu sind beispielsweise in [24] angeführt.

4. Die Stoßstelle als Transformator von unterschiedlichen Wellentypen

4.1. Problemstellung

Der physikalische Effekt der Koinzidenz bzw. der Spuranpassung und dessen Lage im Frequenzspektrum stellt ein wesentliches Kriterium für die schalltechnische Leistungsfähigkeit einer Baukonstruktion dar. Brettsperrholz weist mehrere dieser Koinzidenzfrequenzen auf, welche zumeist im mittelfrequenten Bereich von ca. 200 Hz bis 500 Hz angesiedelt sind. Diese führen zu einer erhöhten Aufnahme und Abgabe von Schallenergie der Brettsperrholzplatte. Im Bereich der Direktschalldämmung sind nur wenige Möglichkeiten der direkten (primären) Beeinflussung dieses Effektes beispielsweise durch strukturelle Veränderung der Basisplatte vorhanden. Zumeist müssen hierbei sekundäre Maßnahmen, wie zusätzliche Dämmschichten oder Vorsatzschalen verwendet werden, um die hohe Schalenergieaufnahme und Abstrahlung zu vermindern. Im Bereich der Flankenschallübertragung ergeben sich dabei jedoch neue Möglichkeiten, da die Schallenergie vor der Abstrahlung und in den Nebenraum zunächst die Stoßstelle passieren muss. Untersuchungen zur Nutzung von physikalischen Effekten in der Stoßstelle zur Reduktion der Schallenergie besonders in diesem kritischen Frequenzbereich werden nachfolgend beschrieben.

4.2. Lösungsansatz – Gezielte Transformation von unterschiedlichen Wellentypen

Bei der Flankenschallübertragung nimmt ein BSP-Element zunächst Schallenergie auf, leitet diese Energie über die Stoßstelle weiter wo sie abgeschwächt wird. Die Restenergie führt im zweiten BSP-Element zu einem entsprechenden Schwingungsverhalten, welches abhängig von Koinzidenzfrequenz und des resultierenden Abstrahlgrads Schallenergie in den Nebenraum abstrahlt.

Neben dieser abschwächenden bzw. dämmenden Wirkung können in der Stoßstelle jedoch auch weitere physikalische Effekte auftauchen, wie z.B. die Transformation von Schwingungskomponenten einer Wellentypen (z.B. Biegewelle) in Komponenten eines anderen Wellentyps (z.B. Dehnwelle).

Die Schallabstrahlung einer schwingenden Fläche ist im Wesentlichen von der Schwingungskomponente normal zur Oberfläche abhängig. Die Struktur führt jedoch auch Schwingungen in Richtungen parallel zur Oberfläche aus, welche zumeist nicht zu einer (relevanten) Schallabstrahlung führen. Untersuchungen zeigten, dass in einer Stoßstelle eine Transformation dieser Komponenten entsteht, was auch einen Einfluss auf normative Messungen haben kann [25]. Dabei zeigte sich auch, dass die ansonsten zumeist vernachlässigten Übertragungspfade zweiter Ordnung (Übertragung über zwei Stoßstellen) auch bei der Schallabstrahlung eine Rolle spielen können. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 10 angeführt. Eine Konstruktion in H-Form wurde dabei numerisch und messtechnisch untersucht. Dabei wurde die Wand 1 angeregt und die Schwingungskomponenten in alle

drei Raumrichtungen ermittelt. Wie zu erwarten zeigt Wand 1 einen hohen Anteil an Normalkomponenten im Vergleich zum gesamten Schwingungsverhalten. Dies zeigt sich auch bei der Trennwand (Wand 3) in den Terzbändern bis 315 Hz, mit steigender Frequenz vermindert sich jedoch der Anteil der Normalkomponenten und erhöht sich somit der Anteil der Parallelkomponenten. Diese Parallelkomponenten werden zum größten Teil in der zweiten Stoßstelle zurückgewandelt, was in der Wand 5 wieder zu einem relativ hohen Anteil an Normalkomponenten führt, welche eine Schallabstrahlung in den Empfangsraum herbeiführen.

In praktischer Hinsicht ist das Ziel dieser Untersuchungen, durch spezielle Konstruktionshinweise der Stoßstelle bzw. der beteiligten Bauteile eine derartige Transformation von Normalkomponenten in Parallelkomponenten herzustellen, gleichzeitig eine Rücktransformation zu vermeiden. Dies kann dazu führen, dass die Schwingungsenergie im zweiten Bauteil beispielsweise in Form einer Dehnwelle zwar noch vorhanden ist, diese jedoch nicht zu einer Schallabstrahlung führt.

Aktuell wird am Labor für Bauphysik intensiv an den Grundlagen, wie auch an der praktischen Nutzung und Umsetzung dieses Effekts geforscht, beispielsweise in einer Konzeption eines entsprechenden Verbindungsmittels bzw. einer wirksamen Stoßausbildung. Diese weiterführenden Untersuchungen geben einen tiefen Einblick in die Vorgänge der Wellentransformation in der Stoßstelle, welche u.a. Material und Geometrieabhängig sein kann [26].

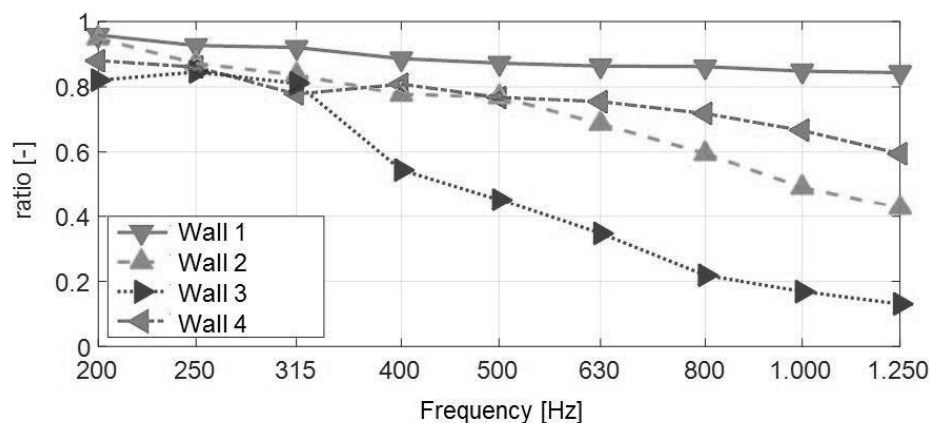
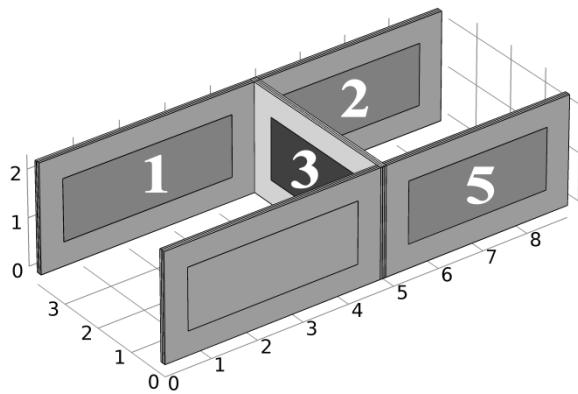


Abbildung 10: Berechnung und Messung des Effekts der Wellentransformation in Stoßstellen von Brettspertholz – numerischer und experimenteller Aufbau (oben); Anteil der Normalkomponente am gesamten Schwingungsverhalten der einzelnen Wände (unten)

5. Zusammenfassung

Es gibt eine Vielzahl von möglichen Kombinationen unterschiedlichen Arten, Anzahl, Abstände, Ausführungsarten von Verbindungsmitteln, sowie eine Vielzahl an möglichen Kombinationen aus unterschiedlichen Brettsperrholzplatten. Die Optimierung von Verbindungsmitteln bzw. der Stoßstellen auf Basis von messtechnischen Untersuchungen an notwendigen Mock-ups in realitätsnaher Größe sind daher sehr aufwendig, da die Aufbauten ein hohes Maß an Ressourcen fordert. Durch die Verwendung erweiterter, spezialisierter und vertrauenswürdiger Mess- und Berechnungsmethoden dann die hohe Anzahl an möglichen Kombinationen der Aufbauten in eine Berechnungsumgebung ausgelagert werden, was sehr umfangreiche Sensitivitäts- und Parameterstudien ermöglicht. Des Weiteren erlauben diese Methoden auch die Entwicklung neuartiger Ansätze zur Reduktion der Schallübertragung. Die zugrundeliegenden Studien können für die Vorentwicklung neuer Verbindungssysteme und Ausführungsarten von Stoßstellen eingesetzt werden. Aktuell wird am Labor für Bauphysik intensiv an den Grundlagen, wie auch an der praktischen Nutzung und Umsetzung entsprechender physikalischer Effekte geforscht. Dabei sollen für die Praxis nutzbare Konstruktionshinweise entwickelt werden, um diese und andere Effekte für zukünftige Bauvorhaben nutzbar zu machen. Ziel ist es, im Holzbau und speziell bei Brettsperrholzkonstruktionen eine hervorragende Schalldämmung über den gesamten, relevanten Frequenzbereich zu realisieren.

6. Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Forschungsarbeiten sind Teil des Projektes «Das akustische Verhalten von Wand- und Deckenverbindungen im Massivholzbau» der Doktoratsinitiative «DokIn' Holz». Der Autor bedankt sich für die hervorragende Betreuung bei DI Heinz Ferk und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Schanz und für die Finanzierung durch das österreichische Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, wie auch durch den österreichischen Fachverband der Holzindustrie. Des Weiteren dankt der Autor der Firma «KLH Massivholz GmbH» für die Bereitstellung von Materialien für messtechnische Untersuchungen.

7. Literatur

- [1] M. Crocker and A. Price, «Sound transmission using statistical energy analysis,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 9, pp. 469-486, 1969.
- [2] R. H. Lyon and R. Lyon, «Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and applications,» 1975.
- [3] M. Kohrmann, R. Völzl, G. Müller, U. Schanda, and M. Buchschmid, «Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben «VibWood»,» TU Munich / HS Rosenheim, 2014.
- [4] G. Müller, «VibWood-Planungshilfen zur schall-und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken,» in *4. HolzBauSpezial Akustik & Brandschutz 2013*, Bad Wörishofen, 2013.
- [5] U. Schanda, «VibWood: Planungshilfen zur schall-und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken bei tiefen Frequenzen,» in *6. HolzBauSpezial Bauphysik HBS 2015*, Bad Wörishofen, 2015.
- [6] A. Rabold, «Vibroakustik-Schalltechnische Planung als Teil des Bauwerkinformationsmodells,» in *HolzBauSpezial Akustik & Brandschutz 2013*, Bad Wörishofen, 2013.
- [7] A. Rabold, «Stoßstellendämm-Maße von Massivholzelemente für die SEA basierte Berechnung nach EN 12354,» presented at the DAGA 2015, Nürnberg, 2015.
- [8] T. Kruse, «Messtechnische Untersuchung zur Stoßstellendämmung und Ausbreitungsdämpfung von Brettsperrholzbauteilen,» Bachelor, Fakultät für Allgemeine Natur und Geisteswissenschaften, Hochschule Rosenheim, Rosenheim, 2015.
- [9] C. Winter, M. Buchschmid, S. Mecking, G. Müller, and U. Schanda, «Ein hybrider FEM/SEA Ansatz zur Prognose der Schallübertragung an Bauteilstößen,» presented at the DAGA 2014, Oldenburg, 2014.

- [10] S. Mecking, T. Kruse, and U. Schanda, «Messung und Berechnung der Körperschallübertragung am Bauteilstoß von Massivholzelementen,» HS Rosenheim 2014.
- [11] C. Hopkins, *Sound insulation*: Routledge, 2012.
- [12] J. Negreira, A. Sjöström, and D. Bard, «Low frequency vibroacoustic investigation of wooden T-junctions,» *Applied Acoustics*, vol. 105, pp. 1-12, 2016/04/01/ 2016.
- [13] H. Reichelt, «Stossstellendämmung im Holzbau: Beispiele aus der Praxis,» in *7. Europäischer Kongress EBH 2014*, Köln, 2014.
- [14] T. Bogensperger and G. Schickhofer, «Brettsperrholz - Forschung & Entwicklung, Nachweisverfahren, Einsatzmöglichkeiten und Transfer,» Institut für Holzbau, Technische Universität Graz, 2010.
- [15] M. Möser, *Messtechnik der Akustik*: Springer, 2010.
- [16] P. Zeller, *Handbuch Fahrzeugakustik*: Springer, 2009.
- [17] N. K. Mandal, «Structural intensity fields of naturally orthotropic plates,» *International Journal of Engineering Science*, 2010.
- [18] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, R. L. Taylor, and J. Zhu, *Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, The: Its Basis and Fundamentals*: Elsevier, Incorporated, 2013.
- [19] «EN ISO 10848-1: 2006: Acoustics-Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms. Part 1: Frame document,» *International Organization for Standardization*, 2006.
- [20] R. B. GmbH, «Flanksound Project - Lösungen zur Flankendämmung,» Rotho Blaas GmbH 2016.
- [21] A. Ågren and F. Ljunggren, «In situ measured flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators,» in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2013, pp. 5120-5129.
- [22] A. Timpte, «Vibration Reduction Indices of Cross Laminated Timber Structures,» Master, TU München / HS Rosenheim, Rosenheim, 2017.
- [23] C. Hopkins, «Structure-borne sound transmission between coupled plates,» PhD, Heriot-Watt University, 2000.
- [24] B. Buchegger, H. Ferk, and M. Schanz, «Flanking sound transmission in connected panels of cross-laminated-timber at low frequencies,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 140, pp. 3281-3281, 2016.
- [25] B. Buchegger, H. Ferk, and M. Schanz, «Wave Conversion in Coupled Plates of Cross Laminated Timber: A Case Study of the Effect and its Consequences,» presented at the DAGA, Aachen, Germany, 2016.
- [26] B. Buchegger, H. Ferk, and M. Schanz, «Effects of wave transformation in junctions of cross-laminated-timber,» presented at the World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria, 2016.