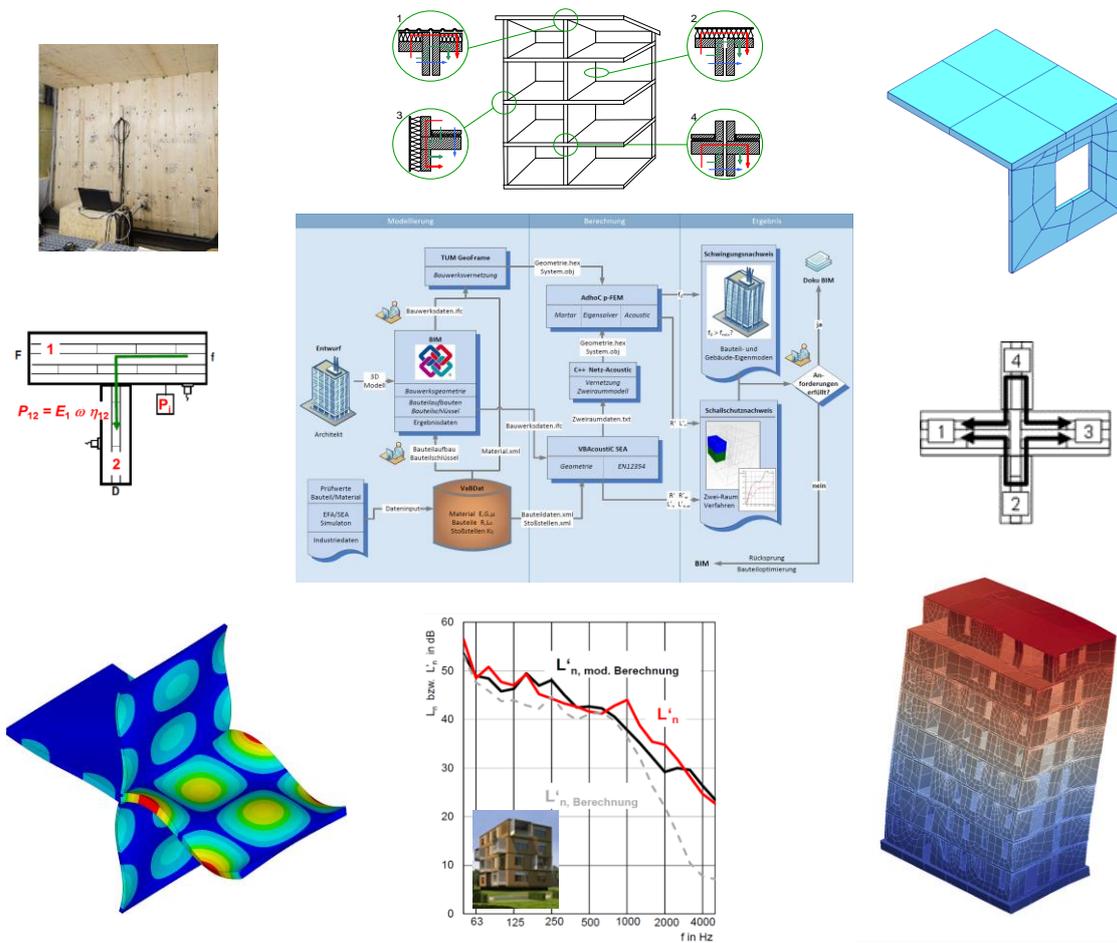


Dachbericht zum Forschungsvorhaben:

Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten

- Modellierung, numerische Simulation, Validierung -



München und Rosenheim, Mai 2018

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Der Dachbericht enthält die Zusammenfassung zu folgenden Teilprojekten / -berichten:

Teilprojekt 1 (DFG): Mortartechniken und Modellreduktion für vibroelastische Strukturen

DFG-Geschäftszeichen 671/13-2

Prof. Dr. Barbara Wohlmuth, Dr. Thomas Horger

Technische Universität München

Fakultät Mathematik, M2 - Zentrum Mathematik

Boltzmannstraße 3, D-85748 Garching

Teilprojekt 2 (DFG): BIM-gekoppelte vibroakustische Simulation

DFG-Geschäftszeichen 624/21-1 und 624/21-2

Prof. Dr. Ernst Rank, Dr. Stefan Kollmannsberger,

Felix Frischmann M.Sc., Alexander Paolini M.Sc.

Technische Universität München

Fakultät für Bau, Geo und Umwelt, Lehrstuhl für Computation in Engineering

Arcisstraße 21, D-80333 München

Teilprojekt 3 (AiF): Parameterentwicklung und SEA Modellierung

IGF-Vorhaben Nr. 17328 N und 18724 N

Prof. Dr. Ulrich Schanda, Simon Mecking M.Eng.,

Christoph Winter M.Sc., Tobias Kruse M.Eng.

Hochschule für angewandte Wissenschaften Rosenheim

Fakultät für angewandte Natur und Geisteswissenschaften, Labor für Schallmesstechnik LaSM

Hochschulstraße 1, D-83024 Rosenheim

Teilprojekt 4 (AiF): Bauteilprüfung, FEM Modellierung und Validierung

IGF-Vorhaben Nr. 17329 N und 18725 N

Prof. Dr. Andreas Rabold, Camille Châteauevieux-Hellwig, M.Sc., Markus Schramm, M.Eng.

ift Rosenheim

ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH

Theodor-Gietl-Straße 7-9, D-83026 Rosenheim

Teilprojekt 5 (AiF): Frequenzbereichsabhängige Modellbildung zur Prognose der Körperschallausbreitung in Holzbauten, IGF-Vorhaben Nr. 18726 N

Prof. Dr. Gerhard Müller, Dr. Martin Buchschmid, Christoph Winter M.Sc.

Technische Universität München

Fakultät für Bau, Geo und Umwelt, Lehrstuhl für Baumechanik

Arcisstraße 21, D-80333 München

Die IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH), Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhalt

1	Einleitung.....	4
1.1	Motivation und Zielsetzung	4
1.2	Methodische Vorgehensweise	5
2	Zusammenfassung der Ergebnisse in den Teilprojekten	7
2.1	Mortartechnik und Modellreduktion für vibroelastische Strukturen	7
2.2	BIM-gekoppelte vibroakustische Simulation	7
2.3	Parameterentwicklung und SEA-Modellierung	8
2.4	Bauteilprüfung FEM-Modellierung und Validierung	10
2.5	Frequenzabhängige Modellbildung zur Prognose der Körperschallausbreitung	11
3	Vernetzung der Teilbereiche in der praktischen Umsetzung.....	14
3.1	Übersicht des Berechnungsablaufs in der BIM-basierten Gebäudeplanung	14
3.2	Simulation gekoppelter Massivholzbauteile mit p-FEM und Mortar-Methode - Abgleich mit Schwingungsmessungen	15
3.2.1	Validierung konformer Simulationsmodelle für gekoppelte Bauteile	15
3.2.2	Entwicklung und Verifizierung der Mortar-Methode zur Abbildung viskoelastischer Zwischenschichten	17
3.2.3	Fazit	19
3.3	BIM basierte FEM - Modellierung eines Achtgeschoßers zur Berechnung der ersten Eigenmoden – Validierung gegenüber Messergebnissen.....	20
3.3.1	Anforderungen an das Bauwerksinformationsmodell und an die Anbindung des Simulationsmodells.....	20
3.3.2	Bauteilorientierte Vernetzung.....	21
3.3.3	Validierung des Planungsprozesses an einem mehrgeschossigen Massivholzgebäude	22
3.3.4	Fazit	24
3.4	SEA-basierte Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung für Mehrgeschosser in Holzbauweise anhand VBAcoustic und VaBDat	25
3.4.1	Berechnungsmodell	25
3.4.2	Planungsdaten	29
3.4.3	Planungs- und Ausführungsbeispiele	32
3.4.4	Fazit	38
3.5	Web-basierte Anwendung für die Identifikation der Frequenzbereichsgrenzen auf Basis der physikalischen Eigenschaften der Struktur	39
3.5.1	Unterteilung des Frequenzbereichs	39
3.5.2	Web-basierte Anwendung „Vibroacoustics of Plates“	40
4	Zusammenfassung	43
5	Literatur.....	45

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Holzhäuser zeigen Pioniercharakter in Bezug auf Energieeinsparung und Nachhaltigkeit. Sie bestechen durch ihre Kombination von nachhaltiger Bauweise mit anspruchsvoller Ästhetik und moderner Architektur. Auf Grund dieser Vorteile nimmt die Anzahl der Holzbauten auch in der Geschossbauweise des urbanen Bereichs kontinuierlich zu. Gerade im Geschosswohnungsbau bieten sich moderne vorgefertigte Massivholzelemente für eine baukonstruktiv kosteneffiziente Erstellung der Gebäude an.

Verglichen mit Gebäuden in Mauerwerks- und Betonbauweise stellt jedoch die Planung eines Bauobjektes in Holzbauweise für den Architekten und die Fachplaner eine deutlich größere Herausforderung dar. Die Gründe hierfür liegen unter anderem im Mangel von bewährten Konstruktionen und Konstruktionswerkzeugen für den Schallschutz und die Gebrauchstauglichkeit (Schwingungsnachweis). Es besteht erheblicher Handlungsbedarf, zumal Holzbauten wesentliche Chancen hinsichtlich einer Verbesserung der (Lebenszeit)-CO₂-Bilanz bieten.

Die Folge des Mangels an geeigneter Konstruktionsunterstützung wird im Planungsprozess offensichtlich. Um die Anforderungen an den Schallschutz und an die Gebrauchstauglichkeit sicher erfüllen zu können, werden die Bauteile häufig durch Ersatzmodelle und vereinfachte konservative Ansätze überdimensioniert und dadurch unwirtschaftlich.

Geeignete computergestützte Planungswerkzeuge, die eine Simulation der genannten bauphysikalischen und konstruktiven Eigenschaften bereits im frühen Planungsentwurf für das gesamte Bauwerk und nicht nur für einzelne Komponenten ermöglichen, können den Planungsaufwand drastisch reduzieren und die Qualität entscheidend erhöhen. Damit wird die Wettbewerbsfähigkeit von Holzbauten gefördert. Notwendig hierzu ist eine geometrische, physikalische und mathematische Modellbildung sowie deren Validierung sowohl bzgl. einzelner Komponenten, der Kopplung von Bauteilen als auch bzgl. des gesamten Bauwerks. Die Computersimulation ist schließlich in einen modellorientierten Planungsprozess einzubetten, der eine praxismgerechte Verwendung in den Anwendungsfeldern Schall- und Schwingungsschutz im Holzbau erlaubt.

Zur Illustration dieses Ansatzes wird in Abbildung 1 der vibroakustische Planungsprozess im Kontext des gesamten Planungsablaufs vom Entwurf bis zur Werksplanung gezeigt. Ausgangspunkt des Prozesses ist der architektonische Entwurf, der in ein Bauwerksinformationsmodell (BIM) überführt wird. Im BIM werden neben der bauteilorientierten räumlichen Geometrie des Gebäudes insbesondere dessen mechanische und bauphysikalische Attribute gespeichert. Dieses Informationsmodell kann nicht nur für die hier betrachtete schalltechnische Planung, sondern auch für vielfältige andere Planungsaufgaben verwendet werden.

Die Umsetzung des in Abbildung 1 dargestellten Gesamtplanungsablaufs erfordert einen **Planungsprozess**, der die numerische Simulation und den Nachweis vibroakustischer Gebäudeeigenschaften eng an ein umfassendes Bauwerksinformationsmodell (BIM) koppelt. Dadurch wird dem Fachplaner die Untersuchung der vibroakustischen Eigenschaften des Bauteils sowie des Gesamtgebäudes bereits in einem frühen Planungsstadium ermöglicht. In Kombination mit der Methode der Statistischen Energieanalyse (SEA), die in ihrer vereinfachten Form nach DIN EN ISO 12354 für die Anwendung im Holzbau angepasst werden muss, ist hierzu die Erweiterung vorhandener Verfahren der Finite-Elemente-Methode (FEM) hinsichtlich einer geometrisch-mechanischen und vibroakustisch-konsistenten Kopplung von Bauteilen, sowie die Ableitung des volumenorientierten Gesamtmodells aus dem Bauwerksinformationsmodell erforderlich.

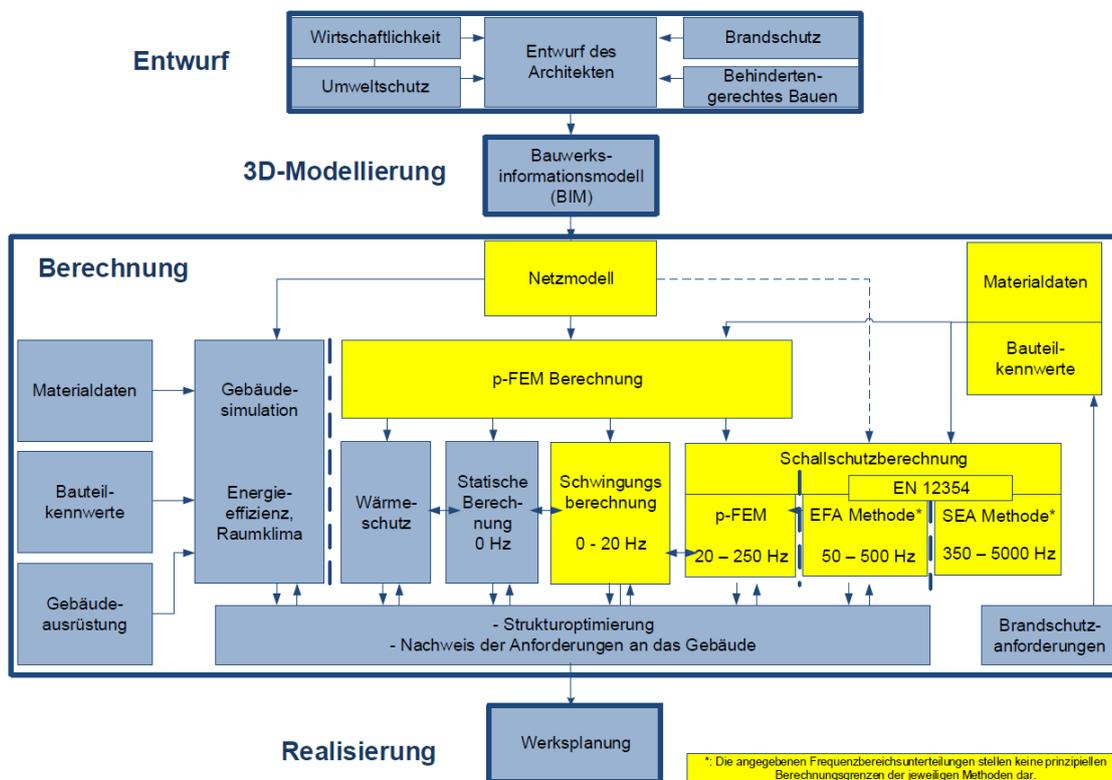


Abbildung 1 Übersicht des Gesamtplanungsablaufs für ein Bauwerk in Geschößbauweise. Für den vibroakustischen Planungsprozess relevante Bereiche sind gelb hinterlegt.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Für den angestrebten Planungsprozess wurde in der Projektbearbeitung eine Vorgehensweise mit folgenden Schwerpunkten umgesetzt:

- Aus dem bauteilorientierten Bauwerksinformationsmodell wird für die vibroakustische Simulation auf Basis der Finite-Elemente-Verfahren zunächst ein **Netzmodell** abgeleitet. Dieses Volumennetz aus (dünnen) Hexaederelementen wird je Bauteil oder Bauteilgruppe (Decken, Wände etc.) unter Verwendung von **Finiten Elementen hoher Ordnung** generiert, die ein sehr großes Längen/Dickenverhältnis erlauben und es damit ermöglichen, die dünnwandigen Strukturen mit einer geringen Zahl von Volumenelementen zu modellieren, ohne dabei an Genauigkeit zu verlieren.
- Besondere Aufmerksamkeit wird bei der Vernetzung den **Stoßstellen** zwischen den Bauteilen sowohl hinsichtlich der geometrischen als auch der mechanisch-akustischen Modellbildung gewidmet. Da die Bauteile einzeln vernetzt werden, „passen“ die Netze an diesen Stoßstellen nicht zwingend aneinander. Um dieses verallgemeinerte Netzmodell verwenden zu können, werden **Mortar-Techniken** für einen inkompatiblen Netzübergang verwendet, mit denen nicht nur bisher untersuchte starre, sondern ebenso unterschiedlich **weiche Kopplungen** (Elastische Lagerungen) berücksichtigt werden können. Das Finite-Element-Modell wird für die Berechnung der Eigenmoden und

Eigenfrequenzen des Gesamtgebäudes und der Trenndecken sowie die vibroakustische Berechnung im Bereich tiefer Frequenzen eingesetzt.

- Für die Berechnung im mittleren und oberen Frequenzbereich wird die aus der **SEA Methode** abgeleiteten Ansätze nach DIN EN ISO 12354 eingesetzt. Die vereinfachten Berechnungsansätze nach DIN EN ISO 12354 wurden hierzu, um die im Holzbau relevanten Übertragungswege, ergänzt und angepasst.
- Sowohl die FEM als auch die SEA Methode ist bezüglich Ihres Einsatzes auf einen bestimmten Frequenzbereich eingeschränkt. Eine Aussage über den spektralen Gültigkeitsbereich der jeweiligen Methode wird mit Hilfe der Energieflussanalyse (**EFA Methode**) ermittelt.

Für die Durchführbarkeit des so beschriebenen Planungsprozesses sind die als Eingangsdaten erforderlichen Material- und Bauteildaten von entscheidender Bedeutung. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse als Planungsdaten in einer **Datenbank** (VaBDat) zusammengestellt.

Zur **Validierung** der Vorgehensweise wurden Messergebnisse aus realisierten Mehrgeschossern in Massivholzbauweise verwendet, die durch Baumessungen innerhalb des Projektes gewonnen wurden oder aus älteren Bauvorhaben bereits vorhanden waren. Das Gesamtprojekt wurde zur Bearbeitung in 5 Teilprojekte aufgeteilt. Eine Übersicht der Teilprojekt-Inhalte und der -Verknüpfungen wird in Abbildung 2 anhand der Aufgabenverteilung im Gesamtprojekt gegeben. Die bearbeiteten Inhalte werden in Abschnitt 2 zusammengefasst und anhand ihrer Vernetzung untereinander für die praktische Umsetzung in Abschnitt 3 dargestellt.

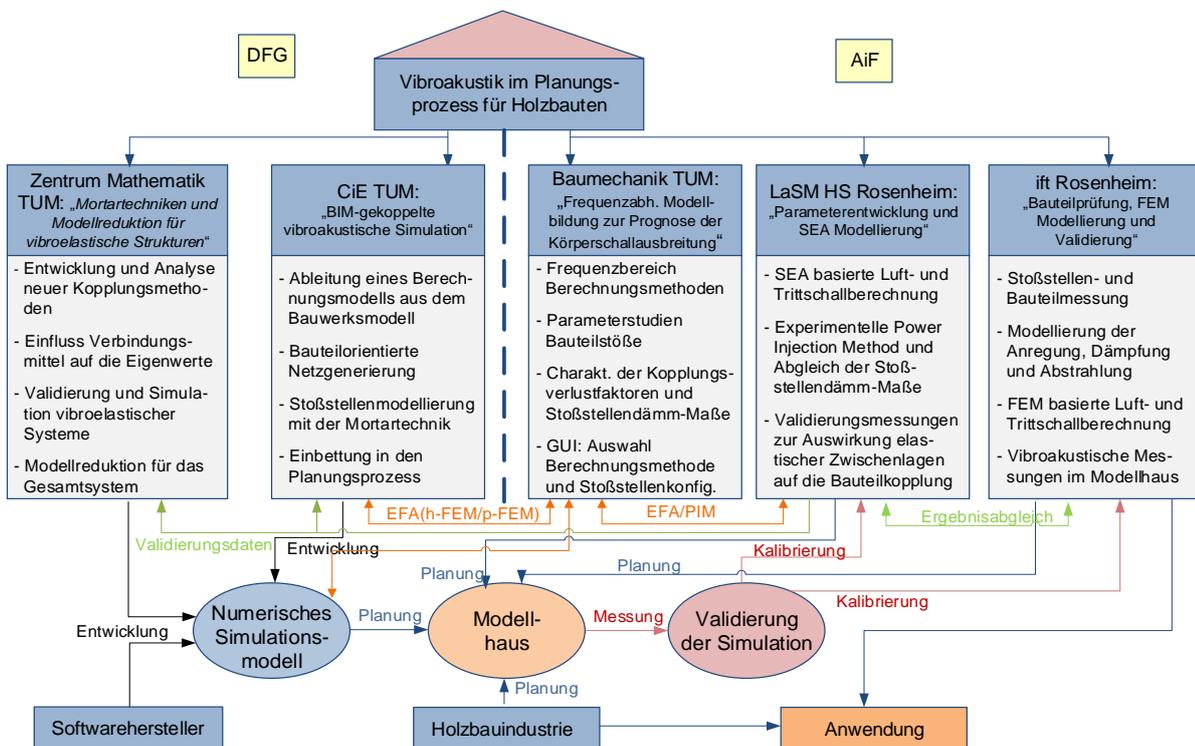


Abbildung 2 Die Aufgabenverteilung der Projektpartner im Gesamtprojekt

2 Zusammenfassung der Ergebnisse in den Teilprojekten

Die nachfolgende Zusammenfassung der Ergebnisse ergibt einen Überblick der in den einzelnen Projektberichten [1],[2],[3],[4],[5] ausführlich beschriebenen Ergebnisse.

2.1 Mortartechnik und Modellreduktion für vibroelastische Strukturen

In diesem Teilprojekt wurden numerische Verfahren entwickelt, die eine flexible und effiziente Diskretisierung zur Simulation von Eigenmoden und Eigenwerten bei Massivholzgebäuden erlauben. Ausgangssituation sind Mortar Finite Elemente Techniken, reduzierte Basen Methodiken und Dimensionsreduktionstechniken. Mortar Methoden bieten große Vorteile bei der Vernetzung von komplexen Geometrien, da diese zunächst in einzelne einfach strukturierte Bauteile zerlegt werden können. In einem zweiten Schritt erfolgt eine modulare unabhängige Vernetzung der einzelnen Bauteilgeometrien. Dabei sind keinerlei Einschränkungen an die Oberflächennetze gegeben. Erst in einem dritten Schritt werden schwache Kopplungsbedingungen direkt in die Finite Elemente Variationsformulierung eingearbeitet. In vielen Fällen reduzieren sich die Transferbedingungen zwischen den Bauteilen auf einfache Stetigkeitsbedingungen, nicht jedoch in unserem Fall. Das Vorhandensein einer dünnen dämpfenden Elastomerschicht muss bei herkömmlichen Methoden voll im Volumen aufgelöst werden, nicht jedoch bei der hier verwendeten Methode. Statt eines volumenbasierten Austausches wird ein rein oberflächenbasierter Informationsaustausch zwischen den Bauteilen verwendet. Dadurch kann die Komplexität der verwendeten Netze signifikant reduziert werden und eine kostenintensive Gittererzeugung kann weitgehend vermieden werden. Ausgehend von dem dimensionsreduzierten Modell wurden nur weitere Reduktionstechniken angewandt um den Gesamtaufwand zu senken. Dazu gehören reduzierte Basis Techniken, die sich gerade dann bewähren, wenn hochaufgelöste Szenarien mit unterschiedlichen Geometrie- und Materialparametern simuliert werden müssen. Ausgehend von einer Trainingsphase wird eine Basis von signifikant kleinerer Dimension erzeugt, die jedoch trotzdem in der Lage ist, die parameterabhängigen Lösungen mit hinreichender Güte zu approximieren. Unterstützt werden diese Techniken zudem von Ansätzen, die aus dem Bereich der Gebietszerlegungsmethoden stammen. Hierzu wird unterschieden zwischen sogenannten Bubblemoden und Componentmoden. Während die Bubblemoden Träger haben, die sich auf ein modulares Bauteil beschränken, stellen die Componentmoden die Verbindung zwischen zwei angrenzenden Bauteilen dar. Diese Vorgehensweise erlaubt nun eine flexible und effiziente Zerlegung komplexer mehrgeschossiger Massivholzgebäude in wenige Bauteile mit einfacher Geometrie. Die Anzahl der benötigten Moden wird über adaptive Algorithmen gesteuert, die basierend auf Fehlerindikatoren und greedy Verfeinerungsstrategien den inkrementellen Aufbau der reduzierten Basen steuern und kontrollieren.

2.2 BIM-gekoppelte vibroakustische Simulation

In diesem Teilprojekt wurde ein Verfahren zur Schwingungsanalyse von Massivholzgebäuden entwickelt, das sich nahtlos in den computergestützten Planungsprozess einfügt [2]. Darin wird ein recheneffizientes hexaedrisches FE-Modell automatisch aus einem **Bauwerksinformationsmodell** erzeugt. Die Verwendung von Volumenelementen ermöglicht die korrekte Abbildung räumlicher Verformungszustände. Stoßstellen, gegebenenfalls einschließlich einer Elastomerschicht, können somit realitätsnah modelliert werden [6].

Die einzelnen Bauteile werden bei der Erzeugung des Simulationsmodells getrennt voneinander vernetzt, um auch geometrisch komplexe Gebäude automatisch vernetzen zu können und Netzverfeinerungen an Bauteilstößen zu vermeiden [7]. Allerdings entsteht hierdurch ein nicht-konformes Netz, in dem Bauteilverbindungen zunächst nicht berücksichtigt sind. Für die Koppelung der Komponenten kommt die

Mortar-Methode zum Einsatz. Im Rahmen des Projektes wurde sie so weiterentwickelt, dass auch nachgiebige Verbindungen hinreichend genau abgebildet werden können [8,9]. Durch dieses Vorgehen kann die Berechnung auf Grundlage eines groben Netzes durchgeführt werden, wobei eine genaue Lösung mit einer relativ geringen Anzahl von Freiheitsgraden durch den Einsatz der p-Version der FEM erreicht wird. Diese erlaubt es, selbst sehr dünnwandige Bauteile mit hoher Effizienz durch Volumenelemente darzustellen [10].

Die entwickelte Methodik zur Modellierung und Simulation von gesamten Massivholzgebäuden oder Teilen davon wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern detailliert geprüft: Zunächst wurden Simulationsmodelle für **gekoppelte Massivholzbaueteile** in zwei Stufen verifiziert und validiert. Erstens wurde ein konformes FE-Modell hoher Ordnung für eine verschraubte Massivholzkonstruktion mithilfe von Schwingungsmessungen validiert, in einem Fall mit einer Elastomerschicht zwischen den Bauteilen und im anderen Fall ohne. Dabei erwiesen sich die Materialparameter für das Holz gemäß DIN-Norm [22],[23] und die aus dem Datenblatt abgeleiteten Elastomerparameter als sehr gut geeignet [6]. Zweitens wurden Mortar-basierte Simulationsmodelle für gekoppelte Bauteile zur Durchführung numerischer Frequenzganganalysen unter Berücksichtigung der Dämpfungswirkung verifiziert, indem sie mit konformen Modellen verglichen wurden [9].

Anschließend wurde die Einbettung der Schwingungsanalyse in die computergestützte Planung auf Grundlage der Ergebnisse der Teilmodelluntersuchungen an einem **mehrgeschossigen Massivholzgebäude** validiert [7]. Hierzu wurde aus dem Bauwerksinformationsmodell ein hexaedrisches FE-Modell abgeleitet. Die tiefsten Gebäudeeigenfrequenzen wurden berechnet und mit Messergebnissen verglichen. Unter der Annahme starrer Anschlüsse und eines festen Bodens mit einem Bettungsmodul von 100 MN/m^2 ist die relative Abweichung der beiden tiefsten berechneten Eigenfrequenzen kleiner als 6 %.

Außerdem wurde der Einfluss hierarchischer Ansatzfunktionen hoher Ordnung auf den Rechenaufwand für dynamische Analysen untersucht. Hierzu wurden die h- und p-Version der FEM an einem repräsentativen Beispiel miteinander verglichen. Der **Methodenvergleich** wurde sowohl für die Bestimmung der tiefsten Eigenfrequenzen bis 150 Hz [6] als auch für Körperschallprognosen mithilfe der Energieflussanalyse im mittleren und hohen bauakustisch relevanten Frequenzbereich bis 3000 Hz durchgeführt [11],[12]. In allen Fällen wurde die größte Recheneffizienz mit Ansatzfunktionen hoher Ordnung erreicht.

Die Verwendung eines parametrischen Bauwerksinformationsmodells in Kombination mit einem validierten, automatisch erzeugten und effizienten Simulationsmodell erlaubt es, in kurzer Zeit zahlreiche Konstruktionsvarianten zu studieren, um vibroakustisch optimierte Ergebnisse zu erzielen. Mit dieser Vorgehensweise kann eine neue Qualität der schwingungstechnischen und bauakustischen Bewertung von Massivholzgebäuden erreicht werden.

2.3 Parameterentwicklung und SEA-Modellierung

Ziel des Teilprojektes war die Anwendbarkeit praxisnaher Prognosemodelle zu untersuchen, die sich anhand des Bauwerksinformationsmodells in den Planungsablauf einbinden lassen.

In diesem Teilprojekt wurden Übersichten zu Konstruktionen in der Massivholzbauweise zusammengestellt. Für die Flankenübertragung in der Schallschutzplanung wurden Stoßstellendämm-Maße aus eigenen Messungen und von anderen Instituten zusammengetragen und kategorisiert [13],[14]. Es zeigte sich, dass insbesondere bei tiefen Frequenzen die Art des Prüfstandes aufgrund der unterschiedlichen Randverluste einen Einfluss auf die Unsicherheit bei der Ermittlung von Stoßstellendämm-Maßen hat.

In den **Labormessungen** wurden Messdaten zur Ermittlung von Materialparametern, zur Analyse der Körperschallübertragung zwischen praxisnahen Bauteilanschlüssen und zur Validierung der Prognosemodelle durchgeführt. Die mittels der Finite-Elemente Methode prognostizierten Eigenmoden und Eigenfrequenzen von Holzmassivbauteilen in Teilprojekt 2 [2] und 5 [5] wurden mit den experimentellen Ergebnissen in diesem Teilprojekt validiert. Dazu wurden Betriebsschwinganalysen an einzelnen und gekoppelten Bauteilen aus Brettsperrholz durchgeführt. Es wurden T- und L-förmige Bauteilanschlüsse mit und ohne Elastomerzwischenlagen gemessen. Dabei wurden auch die Relativbewegungen der Bauteile nahe der Stoßstelle unter 200 Hz bei Verwendung einer Elastomerzwischenlage gemessen. Neben der tieffrequenten Schwingungsanalyse wurde für den mittel- und hochfrequenten Frequenzbereich die Power Injection Methode zur Ermittlung der Energieflüsse angewendet. Aus den Ergebnissen konnten Energieeinflusskoeffizienten und Verlustfaktoren für die Verifizierung der prognostizierten Ergebnisse aus der Energieflussanalyse in Teilprojekt 5 und der Statistischen Energieanalyse in diesem Teilprojekt berechnet werden. Im Projektverlauf konnte die Unsicherheit der experimentellen Leistungsbestimmung durch eine Optimierung der mechanischen Verbindung zwischen Schwingerreger und Prüfkörper reduziert werden. Bei der Statistischen Energieanalyse werden diffuse Schallfelder vorausgesetzt. Die Diffusität des Körperschallfeldes konnte durch eine hohe örtliche Abtastung der Oberflächenschnelle der Bauteile beschrieben werden. Zu höheren Frequenzen wurde eine Ausbreitungsdämpfung über den zur Schallquelle distanzabhängigen Pegelabfall bestimmt. Die Unsicherheit bei der experimentellen Energiebestimmung in Abhängigkeit der Messpunktanzahl wurde mithilfe der Monte-Carlo Methode anhand einer Fallstudie in der Nachauswertung der empirischen Daten bestimmt. Die Reduktion der Körperschallübertragung durch den Einsatz von Elastomerlagern und elastisch gelagerten Verbindungsmittel konnte nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass die Wahl der Bauteilkopplung, wie z. B. Stahlkonsole oder direkte Verschraubung, starken Einfluss auf das resultierende Stoßstellendämm-Maß hat. Für die **Schallschutzprognose auf Basis der Statistischen Energieanalyse** wurde eine kommerzielle Software VAOne® eingesetzt. Aus den Kopplungsverlustfaktoren aus dem Modell können Stoßstellendämm-Maße für die Schallschutzprognose der DIN EN ISO 12354 bestimmt werden. Bei der Beschreibung der in diesem Teilprojekt verwendeten Brettsperrholz Bauteile als SEA-Subsystem zeigte sich, dass bereits im mittleren Frequenzbereich der Schubeinfluss einen signifikanten Einfluss auf die modalen Eigenschaften hat und die Beschreibung als *akustisch dünne Platte* nicht mehr ausreichend ist. Mit der Software können auch Platten mit der Theorie von Mindlin berechnet werden, welche den Schubeinfluss berücksichtigt. Die Anregbarkeit der Platte im Modell konnte mit einer mittleren Eingangadmittanz aus der Messung validiert werden. In einem Methodenvergleich mit der Energieflussanalyse aus Teilprojekt 5 am Beispiel eines L-förmigen Bauteilstoßes konnten die Modellergebnisse verifiziert werden. Der Vergleich von Energieeinflusskoeffizienten zeigte auch die zu erwartende Diskrepanz der Methoden zu tiefen Frequenzen. Im tieffrequenten Bereich sind die Voraussetzungen der Statistischen Energieanalyse nicht erfüllt. Mithilfe der Software können auch Abstrahlgrade orthotroper Platten, wie z.B. Brettsperrholz, berechnet werden. In der DIN EN ISO 12354-1 wird nur ein Verfahren für isotrope Platten beschrieben. An Berechnungs- und experimentellen Beispielen konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung dieser orthotropen Eigenschaften die Prognoseunsicherheit reduziert. Für weiterführende Arbeiten zum Einsatz der Statistischen Energieanalyse im Holzbau stehen Daten aus den Labormessungen zur Verfügung. Diese können zur Berücksichtigung von elastischen Zwischenschichten bei der Anwendung der Statistischen Energieanalyse genutzt werden.

Für die Optimierung der Schallschutzplanung in der Massivholzbauweise auf Basis der Statistischen Energieanalyse wurde eine Bauteil- und Messdatendatenbank mit optionaler Schnittstelle zu Bauwerksinformationsmodellen entwickelt. Die **Datenbank „VaBDat“** ist unter www.VaBDat.de erreichbar und stellt dem Schallschutzplaner holzbauspezifische Kennwerte für die Schallschutzplanung nach der

DIN EN ISO 12354 zur Verfügung. Die Forschungsergebnisse des ift Rosenheims und an der Hochschule Rosenheim aus diesem Projekt sind dort verfügbar. Neben Messergebnissen können auch Ergebnisse aus der Statistischen Energieanalyse und Energieflussanalyse in Form von Kopplungsverlustfaktoren hinterlegt werden. Am ift Rosenheim wurde im Teilprojekt 4 [3] das Prognosetool „VBAcoustic“ für die Schallschutzplanung entwickelt, welches auf die Daten der Datenbank zugreifen kann. Die automatisierte Schwingungsprognose für den Schwingungsnachweis eines mehrgeschossigen Gesamtgebäudes wurde an der TU München weiterentwickelt. Für diese Berechnungen kann auf die Datenbank zugegriffen werden. Die Datenbank stellt exemplarisch die Datenbasis für eine Schallschutzprognose in der Massivholzbauweise in Zusammenhang mit Bauwerksinformationsmodellen dar. Für den Zugriff auf die Daten werden Kürzel verwendet, welche aus der Beschreibung der Bausituation abgeleitet werden können. In weiterführenden Arbeiten kann die Schnittstelle zwischen der bauakustischen Planung und Bauwerksinformationsmodellen weiter ausgebaut werden. Die Sammlung weiterer Planungsdaten für die Datenbank sowie die Untersuchung und Berücksichtigung von Vorsatzschalen vor Massivholzelementen in Form von Installationsebenen oder abgehängten Decken ist erforderlich.

2.4 Bauteilprüfung, FEM-Modellierung und Validierung

Ziel des Teilprojektes war die Anwendbarkeit praxisnaher Prognosemodelle zu untersuchen, die sich anhand des Bauwerksinformationsmodells in den Planungsablauf einbinden lassen. Zunächst wurden hierzu Labormessungen an Bauteilen und Bauteilstößen durchgeführt, um Planungsdaten für die im Teilprojekt 3 [4] aufgebaute Datenbank „VaBDat“ zu ermitteln. Weitere Labormessungen zur Untersuchung der Übertragungswege dienten als Grundlage für die Erweiterung der Prognosemodelle. Die Prognosemodelle konnten anhand dieser Erkenntnisse für die Anwendung im Holzbau angepasst und abschließend durch den Vergleich mit Ergebnissen aus Baumessungen validiert werden.

Im Rahmen der **Labormessungen** erfolgten Stoßstellenmessungen für die vertikale und die horizontale Übertragung flankierender Bauteile von Trenndecken und Trennwänden. Hierbei wurde der Einfluss des Masseverhältnisses zwischen Trenn- und Flankenbauteil, sowie die Ausführung des Bauteilstoßes detaillierter untersucht. Die ermittelten Stoßstellendämm-Maße wurden sowohl frequenzabhängig für die Bauteildatenbank VaBDat, als auch als Einzahlwerte für praxisnahe Planungshilfen im Tabellenverfahren zur Verfügung gestellt. Für die Planungswerte konnten neben den eigenen Laborprüfwerten auch eine ergänzende Datensammlung anderer Prüfinstitute verwendet werden, die im Rahmen einer begleitenden Studienarbeit [13], [14] erfolgte.

Zusätzlich durchgeführte Messungen der Flankendämm-Maße ermöglichten zum einen die Validierung der gemessenen Stoßstellendämm-Maße durch einen Abgleich der Messergebnisse mit den berechneten Flankendämm-Maßen, zum anderen eine genauere Untersuchung der Übertragungsmechanismen bei der Flankenübertragung bei Trittschallanregung. Hierbei wurde der für den Leichtbau nicht zu vernachlässigende Weg DfF differenzierter untersucht und Planungsdaten für den Eingang in die Prognosemodelle abgeleitet. Zur Weiterentwicklung der **Prognosemodelle** wurde sowohl die SEA-basierte Berechnung als auch die Berechnung auf Basis der FEM berücksichtigt. Das SEA-basierte Berechnungsmodell nach DIN EN ISO 12354 wurde für die frequenzabhängige Berechnung und die Berechnung mit Einzahlwerten umgesetzt. Mit der Excel-Anwendung „VBAcoustic“ steht ein einfach handhabbares Prognosetool für Demonstrationszwecke zur Verfügung, das ohne weitere Installationen anwendbar und gut erweiterbar ist. Um eine mögliche Anbindung eines Prognosetools an das Bauwerksinformationsmodell zu zeigen, wurde auch die Option der Datenübernahme anhand einer IFC-Schnittstelle implementiert.

Für die Luft- und Trittschallberechnung auf Basis der Finiten-Elemente-Methode wurden in das verwendete FEM-Programm AdhoC Akustikelemente implementiert, um einen Vergleich zwischen der vollständig gekoppelten Berechnung (Senderraum-Trennbauteil-Empfangsraum) und der schwach gekoppelten Berechnung durchführen zu können. Hierzu erfolgte die Verifizierung der Berechnung anhand der analytischen Lösung einer Platte und eines Rechteckraums. Zusätzlich wurde die bisher verwendete schwache Kopplung mit getrennter FEM-Berechnung auch auf die Luftschallberechnung angewendet. Hier zeigte sich, dass auch die Luftschallberechnung mit dem deutlich effizienteren schwach gekoppelten Berechnungssystem möglich ist. Die FEM basierte Berechnung wurde im Teilprojekt 2 [2] zur Anwendung gebracht, um die ersten Eigenmoden und Eigenfrequenzen von Mehrgeschossern für den Schwingungsnachweis bei Windanregung zu berechnen. Die Berechnungsergebnisse konnten zur Validierung mit Ergebnissen einer Baumesung in einem Achtgeschoss verglichen werden.

Im Rahmen des Projektes wurden **Baumesungen** in vier Bauvorhaben durchgeführt, um die Ergebnisse für die Validierung der Prognosemodelle verwenden zu können. Die Ergebnisse zweier weiterer Bauvorhaben, die bereits im Vorfeld des Projektes gemessen wurden, konnten ebenfalls verwendet werden. Neben dem Bau-Schalldämm-Maß und dem Norm-Trittschallpegel wurden in einem Bauvorhaben auch die Stoßstellendämm-Maße und im o.g. Achtgeschoss auch die ersten Eigenfrequenzen des Gebäudes bestimmt. Somit stand eine gute Datenbasis für die Validierung zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Validierung zeigten sowohl für die frequenzabhängige Berechnung als auch für die Berechnung mit Einzahlwerten eine gute Anwendbarkeit der SEA-basierten Berechnung nach DIN EN ISO 12354 [18] in ihrer für den Holzbau modifizierten Form. Durch die Verwendung der Eingangswerte auf Basis von Labormessdaten konnte auch im Frequenzbereich unterhalb der üblichen Anwendungsgrenze eine ausreichende Genauigkeit erzielt werden.

Die durchgeführten Arbeiten ermöglichen somit für Mehrgeschosser in Massivholzbauweise eine praxisnahe Prognose der Luft- und Trittschalldämmung anhand des Prognosetools „VBAcoustic“, welches zur Demonstration der Vorgehensweise erstellt wurde. Eine Anbindung an das Bauwerksinformationsmodell ist möglich und kann noch weiter ausgebaut werden.

2.5 Frequenzabhängige Modellbildung zur Prognose der Körperschallausbreitung

Für einen Einsatz leichter Massivholzkonstruktionen im Geschosswohnungsbau sind die methodischen Grundlagen für die Planung des erforderlichen Schwingungs-, Luft- und Trittschallschutzes weiterzuentwickeln. Ziel dieses Teilprojekts war es, die Körperschallübertragung im erweiterten bauakustisch relevanten Frequenzbereich zu prognostizieren und die Anzahl an Labormessungen dadurch in Zukunft reduzieren zu können. Hierfür ist insbesondere die Vorhersage der Schallübertragung an Bauteilstößen notwendig. Um verlässliche Prognosemethoden zu entwickeln, wurde der Energiefluss zwischen Brettsperrholzelementen untersucht.

Im tiefen Frequenzbereich ist die Finite Elemente Methode (FEM) für schwingungstechnische und vibroakustische Prognosen geeignet. Für zunehmende Frequenzen nimmt die modale Dichte zu, wodurch die klassische FEM aufgrund der Sensitivität der Ergebnisse an Grenzen stößt und die Anwendung statistischer Methoden erforderlich wird. Dabei ist die „klassische“ SEA auf die Wellentransmission zwischen plattenartigen Strukturen beschränkt. Nachdem der Elastizitätsmodul von Holz quer zur Faser vergleichsweise gering ist, treten bereits bei relativ niedrigen Frequenzen Moden in Dickenrichtung der Platten auf [15]. Über

Volumenelemente können diese Effekte in einem FE-Modell abgebildet werden. Nachdem sowohl die SEA als auch die FEM in ihrer Anwendbarkeit im Frequenzbereich eingeschränkt sind, werden im Rahmen einer hybriden Methode, der Energieflussanalyse (EFA), Mittelungsmethoden der SEA [16] bei der Auswertung der FEM eingesetzt [17].

Für die Durchführung der EFA wird eine mit FE modellierte Struktur gemäß ihrer Unterteilung in Bauteile in Subsysteme aufgeteilt. Nachdem jedes Subsystem separat durch eine harmonische Oberflächenlast, die auf einzelnen Elemente aufgebracht wird, angeregt wird, kann die Verschiebungslösung des FE-Modells berechnet werden. In der Nachauswertung werden die eingebrachte Leistung sowie die Subsystemenergien berechnet und über Zeit und Ort gemittelt, um der mit der Frequenz zunehmenden Sensitivität der Ergebnisse gerecht zu werden. Optional werden die Größen zusätzlich über Frequenzbänder gemittelt, um die geltenden Gleichungen für ein gemittelttes Ensemble gekoppelter Subsysteme im eingeschwungenen Zustand zu erhalten. Indem man den Quotienten aus Subsystemenergie und der zugehörigen eingebrachten Leistung berechnet, erhält man die Energieeinflusskoeffizienten, die die normierte Energie beschreibt, die durch eine Struktur in das jeweilige Subsystem infolge einer bestimmte Belastung fließt. Durch die Invertierung der Matrix erhält man Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren. Sind dabei die SEA-Kriterien erfüllt, können diese als Eingangsdaten für ein SEA-Modell verwendet werden. Ferner kann dann daraus das Stoßstellendämm-Maß gemäß DIN EN ISO 12354 [18] ermittelt werden.

Mittels der EFA können entweder die Energieeinflusskoeffizienten für eine spezifische Belastung oder - für den Fall, dass die Belastung nicht bekannt ist - für eine sogenannte Rain on the Roof (RotR) Anregung berechnet werden. Letztere ist eine örtlich unkorrelierte Belastung an zufällig gewählten Orten auf der Platte mit dem Ziel alle Moden gleichmäßig anzuregen. Indem man über mehrere Realisationen von RotR mittelt, erhält man eine robuste Prognose des Energieflusses in Bezug auf die Belastung. In [19] wird eine Vorgehensweise präsentiert. Ziel ist es ein Minimum an Realisationen zu ermitteln, um die Energieeinflusskoeffizienten innerhalb eines bestimmten Konfidenzintervalls zu prognostizieren. Dies entspricht der Abschätzung des wahren Mittelwerts mit einer bestimmten Genauigkeit. Außerdem hilft RotR den Einfluss der starken Kopplung bei tiefen Frequenzen zu reduzieren und damit negative Kopplungsverlustfaktoren zu vermeiden. Damit verbessert sich die Prognose der zugehörigen Kopplungsverlustfaktoren, was durch eine niedrigere Konditionszahl angezeigt wird. Der Einfluss eines nicht zufälligen Phasenversatzes sinkt mit zunehmender Frequenz, da das räumliche Verhalten mit zunehmender Frequenz geringere örtliche Korrelationen aufweist.

Die EFA basiert auf einem FE-Modell, das über einen weiten Frequenzbereich hinweg direkt gelöst wird. Daher müssen verschiedene Modellierungsaspekte berücksichtigt werden. Empfehlungen für die Konfiguration werden entweder in Bezug auf die untersuchte Struktur oder ausschließlich abhängig von den physikalischen Eigenschaften gegeben. Für die Netzfeinheit konnte eine Faustregel für die maximale Elementlänge in Abhängigkeit der Biegewellenlänge ermittelt werden. Außerdem hat sich eine logarithmisch äquidistante Schrittweite im Frequenzbereich und die numerische Interpolation mittels der Trapezregel als effizient ergeben. Für einen großen modalen Überlappungsfaktor kann die Anzahl der Frequenzschritte pro Band deutlich reduziert werden, während die Vernetzung verfeinert werden muss und die Verwendung von Volumenelementen ab der resonanten Anregung der ersten Scherdickenresonanz zwingend erforderlich ist. Für Brettsperrholz tritt diese bei vergleichsweise niedrigen Frequenzen auf, da der Elastizitätsmodul von Holz senkrecht zur Faser etwa ein Dreißigstel des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung ist. Berücksichtigt man die Effekte in Dickenrichtung, ergibt sich beispielsweise für eine Bauteildicke von 16 cm ab 3 kHz ein deutlich veränderter Verlauf des Kopplungsverlustfaktors [15].

Ableiche mit Messungen wurden in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 3 durchgeführt und können dem zugehörigen Schlussbericht [4] entnommen werden. Die Vergleiche mit analytischen, wellenbasierten Lösungen der SEA bestätigen, dass die klassische SEA auf plattenartige Strukturen mit einer ausreichenden Anzahl von ca. fünf Moden pro Band und einem modalen Überlappungsfaktor größer eins limitiert ist. Für eine Anregung in Plattenebene reduziert sich der Bereich der Anwendbarkeit, da nur Moden in Plattenebene zum Energietransport beitragen und daher die untere Frequenzgrenze zu fünf Moden in Plattenebene pro Band verschoben wird. In der Praxis wird die Körperschallübertragung mit Hilfe des Stoßstellendämm-Maßes gemäß [18] prognostiziert. Dieses wurde im Rahmen der TP 3 und 4 messtechnisch ermittelt und für die Prognose mit Hilfe von VBAcoustic eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.4). Dieses Vorgehen basiert auf einer vereinfachten Variante der SEA, bei der dünne, halbunendliche Platten angenommen werden, die nur Biegewellen enthalten [20]. Die Annahme einer reinen Biegewellenübertragung reduziert die Obergrenze der Anwendbarkeit, während das halbunendliche Verhalten nur oberhalb einer bestimmten Frequenzgrenze erfüllt ist. Im Fall von Brettsperrholz ist die Mindlin-Plattentheorie bereits für niedrige Frequenzen erforderlich, um den Schubeinfluss berücksichtigen zu können. Damit schwindet der Bereich der Anwendbarkeit teilweise vollständig, nachdem die Obergrenze unterhalb der Untergrenze auftauchen kann. Daher werden alternative Berechnungsvarianten vorgeschlagen.

Der Einfluss der Verbindungsstärke ist auf unterschiedliche Art und Weise untersucht worden. (i) Zunächst wird eine elastische Zwischenlage zwischen zwei Bauteile eingebaut, die innerhalb der meisten Terzbänder zu einem deutlich reduzierten Energiefluss zwischen den beiden Bauteilen führt. Wenn die Zwischenlage das nachgiebige Verhalten einer verschraubten Verbindung abbilden soll, gilt das FE-Modell nur unterhalb der ersten Scherdickenresonanz der elastischen Zwischenlage. Die erste Scherdickenresonanz stellt einen modellierungsbedingten Artefakt dar, der bei einer verschraubten Verbindung nicht auftritt. (ii) Zweitens erhält die elastische Zwischenlage zusätzlich hysteretische Dämpfungseigenschaften. Dadurch wird der Energiefluss in die angrenzenden Subsysteme reduziert. Dies ist besonders bei hohen Frequenzen der Fall, da dort die Dickenresonanzen eliminiert werden, sowie bei tiefen Frequenzen aufgrund der großen, elastischen Verformungen der Zwischenlage bei nicht-resonanter Anregung von deren Dickenmoden. Damit bilden die Dämpfungsverlustfaktoren nicht nur die interne Dämpfung sondern auch die Kopplungsdämpfung ab. Oberhalb der Frequenzgrenze von fünf Moden pro Band und unterhalb der Dickenresonanzen der elastischen Zwischenlage weisen die Kopplungsverlustfaktoren verglichen mit einer konservativen Kopplung einen weitgehend identischen Verlauf auf. (iii) Drittens tritt über einen weiten Frequenzbereich eine starke Kopplung zwischen zwei Subsystemen auf, die die kontinuierliche Wand eines T-Stoßes darstellen. Daher wird eine alternative Aufteilung vorgestellt, die nur zu einem Wand-Subsystem führt, wobei die reduzierte Auflösung im Ortsbereich zu genaueren nicht negativen Kopplungsverlustfaktoren führt. (iv) Viertens führt die Trennung der Decke eines X-Stoßes zu einer deutlichen Entkopplung über den kompletten Frequenzbereich abgesehen von einem Terzband, obwohl die Decken indirekt über die untere und obere Wand verbunden sind. (v) Fünftens fließt umso weniger Energie in die einzelnen Bauteile desto mehr Bauteile verbunden sind.

Eine detailliere Zusammenfassung der Untersuchungen in Bezug auf die unterschiedlichen Frequenzbereiche findet sich im Schlussbericht [5]. Es wird vorgeschlagen, den Frequenzbereich in drei unterschiedliche Bereiche aufzuteilen, die unterschiedliche Modellierungstechniken und Auswertegrößen bieten. Die webbasierte Anwendung „Vibroacoustics of Plates“ mit graphischer Eingabe wurde für die Identifikation der Frequenzbereichsgrenzen auf Basis der physikalischen Eigenschaften der Struktur erstellt. Die interaktive Anwendung ist primär für Platten mit symmetrischem, kreuzweisen Aufbau, wie zum Beispiel Brettsperrholz entwickelt, und eignet sich auch für homogene, orthotrope oder isotrope Platten. Eine detaillierte Beschreibung folgt in Abschnitt 3.5.

3 Vernetzung der Teilbereiche in der praktischen Umsetzung

3.1 Übersicht des Berechnungsablaufs in der BIM-basierten Gebäudeplanung

Die Anbindung der vibroakustischen Berechnung an das Bauwerksinformationsmodell erfolgt sowohl für die bauakustische Berechnung der Trennbauteile als auch für die Schwingungsanalyse des Gesamtgebäudes. Eine Übersicht des Berechnungsablaufs wird in Abbildung 3 gezeigt.

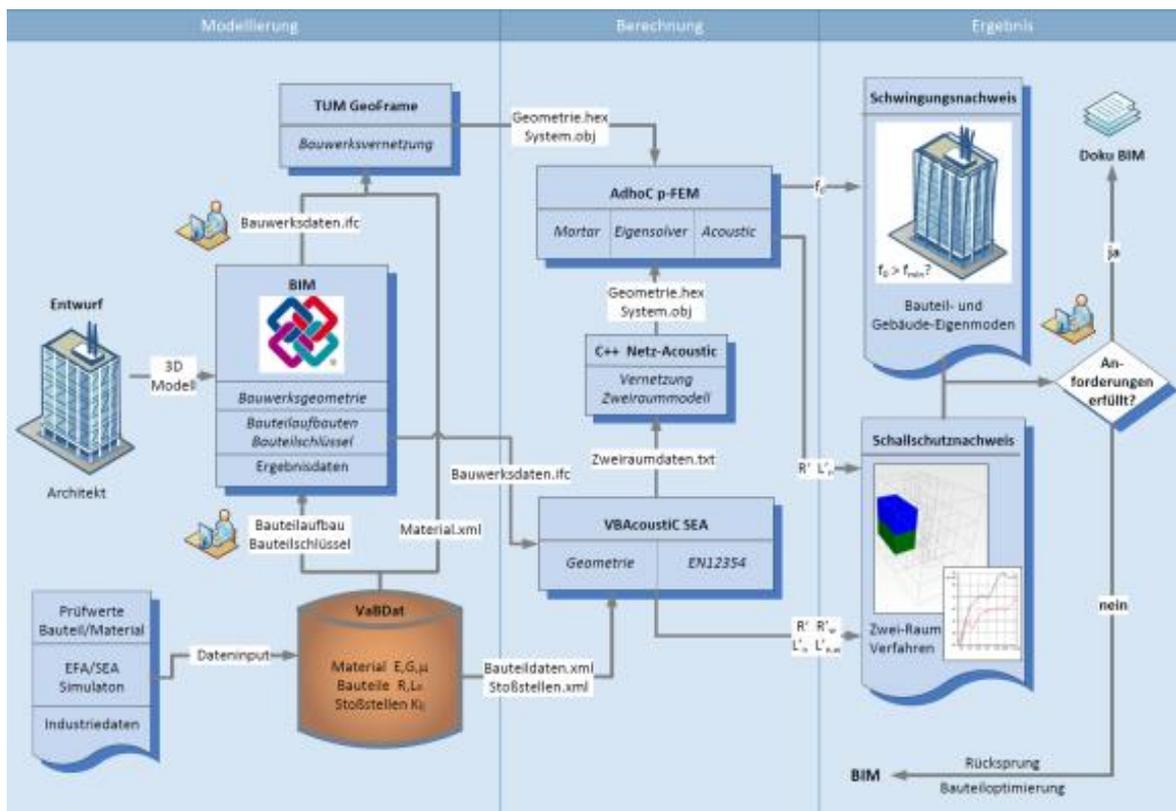


Abbildung 3 Übersicht des im Projekt angestrebten Berechnungsablaufs für den Planungsprozess von Mehrgeschossern

Für die Berechnung der Bauwerksschwingungen wird die IFC-Datei des Gebäudemodells zur Vernetzung in TUM GeoFrame eingelesen und an das FEM-Programm AdhoC zur Eigenwertberechnung weitergegeben [2]. Um eine effiziente Bauwerks-Vernetzung mit nichtkonformen Netzen zu ermöglichen, wurde hierzu die Mortar Methode für die FEM Berechnung verwendet [1]. Anwendungen zu beiden Punkten werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 gezeigt.

Die bauakustische Berechnung erfolgt anhand der SEA-basierten Methode nach DIN EN ISO 12354, die im Excel-Tool VBAcoustic [3] umgesetzt wurde. Die Geometriedaten des Trennbauteils und der flankierenden Bauteile, sowie deren Bauteilschlüssel werden hierzu aus der IFC-Datei ausgelesen. Die erforderlichen Bauteil- und Stoßstellendaten werden aus der Bauteildatenbank VaBDat [4] eingelesen. Die Berechnung des

Bau-Schalldämm-Maßes und des Norm-Trittschallpegels kann, wie in Abschnitt 3.4 gezeigt wird, sowohl frequenzabhängig als auch mit Einzahlwerten durchgeführt werden.

Für die FEM-basierte Berechnung von R' und L'_n im Frequenzbereich von 31,5 Hz bis 250 Hz können die Geometriedaten der Bauteile zur Vernetzung (C++ Netz-Acoustic) und FEM Berechnung (AdhoC) weitergeleitet werden. Eine Identifizierung der am besten geeigneten Prognosemethoden für den jeweiligen Frequenzbereich kann nach Abschnitt 3.5 erfolgen [5].

3.2 Simulation gekoppelter Massivholzbauteile mit p-FEM und Mortar-Methode - Abgleich mit Schwingungsmessungen

Die entwickelten Simulationsmodelle für gekoppelte Massivholzbauteile wurden in zwei Stufen verifiziert und validiert. Erstens wurde ein konformes FE-Modell hoher Ordnung für eine verschraubte Massivholzkonstruktion mithilfe von Schwingungsmessungen validiert [6]. Zweitens wurden Mortar-basierte Simulationsmodelle für gekoppelte Bauteile zur Durchführung harmonischer Analysen verifiziert, indem sie mit konformen Modellen verglichen wurden [9].

3.2.1 Validierung konformer Simulationsmodelle für gekoppelte Bauteile

Die Validierung konformer FE-Modelle hoher Ordnung für gekoppelte Massivholzbauteile erfolgte an einer typischen Decken-Wandkonstruktion entsprechend Abbildung 4 [6]. Die Bauteile der untersuchten Struktur, die aus Brettsperrholz-Elementen bestehen, sind durch Schrauben miteinander verbunden und am Wandfuß sowie am Deckenrand gegenüber dem Wandanschluss gelenkig gelagert. Zwei Varianten wurden betrachtet: In einem Fall befindet sich zwischen den Bauteilen eine 1,25 cm dicke Elastomerschicht und im anderen Fall nicht.

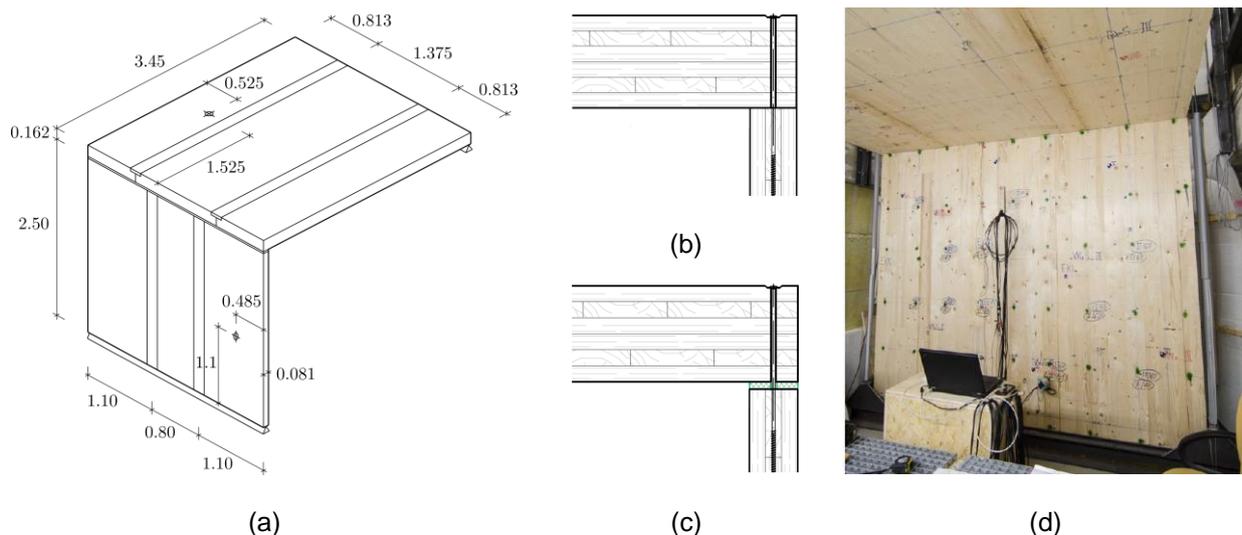


Abbildung 4 Untersuchte Massivholzkonstruktion: (a) Abmessungen und Anregungspositionen [m], (b) Anschluss ohne Elastomer, (c) Anschluss mit Elastomer, (d) Messaufbau [43]

Das Simulationsmodell besteht aus Hexaederelementen mit hierarchischen Ansatzfunktionen [10]. Die Polynomgrade wurden in Abhängigkeit der Elementabmessungen zwischen 2 und 4 gewählt. Wie in Abbildung 5 erkennbar ist, können die Elemente bei Verwendung von Ansatzfunktionen hoher Ordnung relativ große Seitenverhältnisse aufweisen, sodass die Struktur mit nur 747 Elementen modelliert werden kann und die Anzahl der Unbekannten nicht größer als $2,45 \times 10^4$ ist.

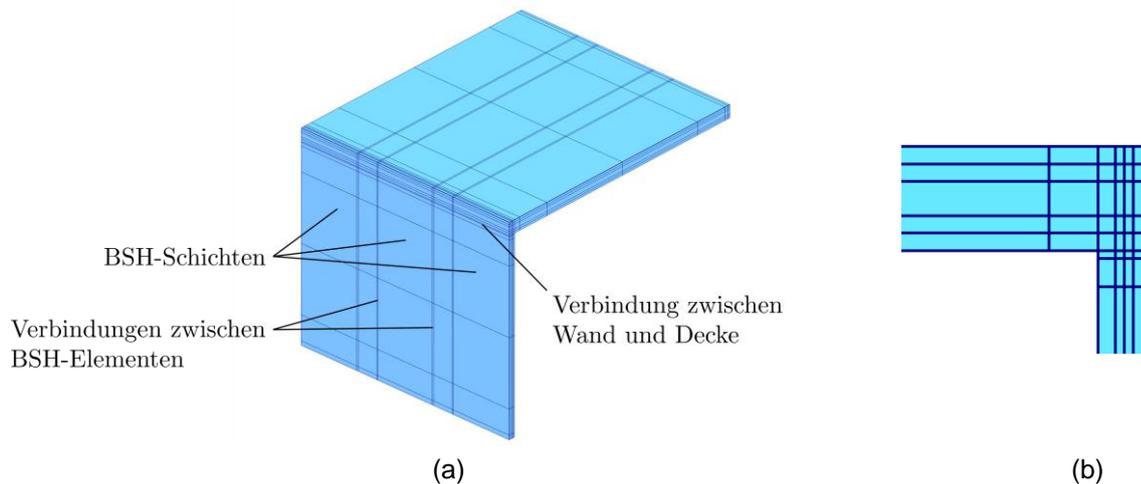
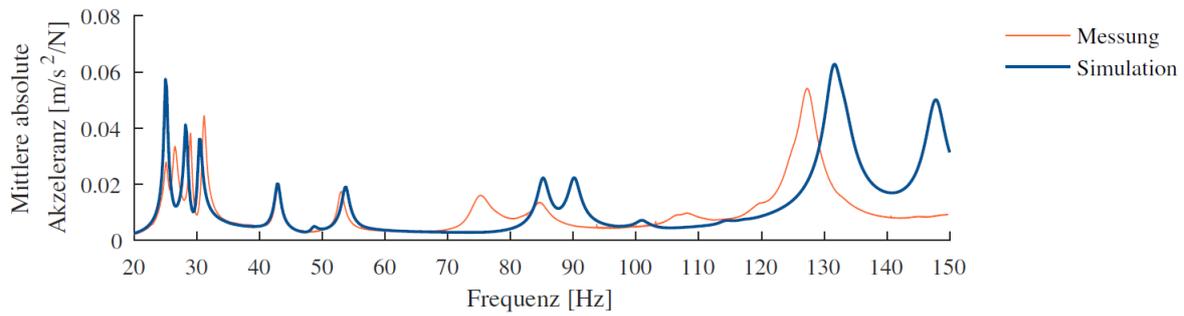


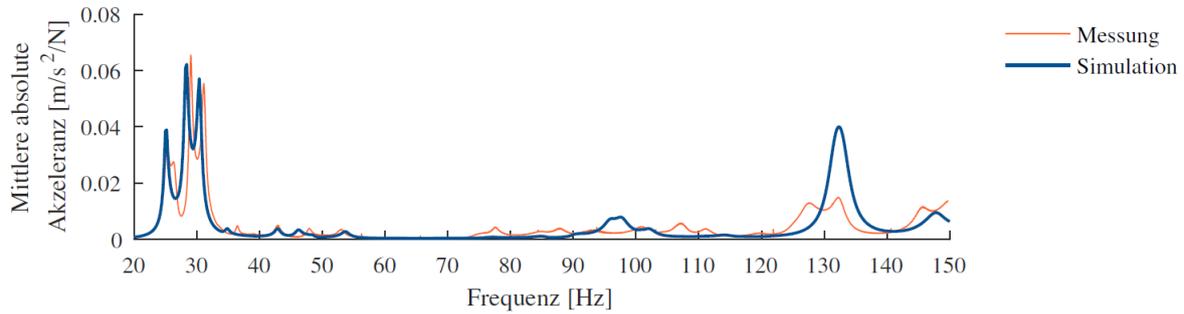
Abbildung 5 Konformes FE-Netz: (a) Gesamtansicht, (b) Anschlussdetail [43]

Die einzelnen Brettschichtlagen der Brettsperrholz-Elemente werden im Modell jeweils durch eine Schicht finiter Elemente abgebildet, wobei die zugehörigen orthotropen Materialparameter auf der Grundlage von [4],[21],[22],[23],[24] bestimmt wurden. Die Verbindung zwischen den Bauteilen wird durch eine Schicht finiter Elemente berücksichtigt, die 1,25 cm dick ist und ein isotropes Materialverhalten besitzt.

Die korrekte Modellierung des Bauteilanschlusses mit und ohne Elastomer wurde durch den Vergleich zwischen den FE-Lösungen und den Messergebnissen aus Teilprojekt 3 sowie durch die Variation des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl der Verbindungsschicht im FE-Modell untersucht. Dabei wurden sowohl die Eigenfrequenzen als auch die Frequenzgänge der Akzeleranzen bis 150 Hz betrachtet (Abbildung 6). Zur Quantifizierung wurde das quadratische Mittel ε_f der relativen Abweichungen der berechneten Eigenfrequenzen von den gemessenen Eigenfrequenzen bestimmt. Hierdurch konnten geeignete Wertebereiche für die Materialparameter der Verbindungsschicht identifiziert werden. Zudem wurden die Materialparameter für den Fall mit Elastomer mittels des in [6],[25] beschriebenen Verfahrens aus dem Datenblatt des Elastomers abgeleitet. Diese erwiesen sich mit einem ε_f von 2,8 % als sehr gut geeignet.



(a)



(b)

Abbildung 6 Absolutwert der Akzeleranz senkrecht zur Bauteilebene unter Deckenanregung der Decken-Wandkonstruktion ohne Elastomerschicht, gemittelt über alle Messpunkte (a) der Decke und (b) der Wand [43]

3.2.2 Entwicklung und Verifizierung der Mortar-Methode zur Abbildung viskoelastischer Zwischenschichten

Für eine effiziente Modellierung von Strukturen aus gekoppelten Bauteilen wurde eine neue Variante der Mortar-Methode entwickelt. Eine Elastomerschicht zwischen den Bauteilen wird dabei in dimensionsreduzierter Form in der Mortar-Formulierung mithilfe einer neuen Kopplungsbedingung abgebildet, die in Gleichung (1) definiert ist. Hierfür wird die schwache Form der Impulsbilanz an der Schnittfläche Γ zwischen dem Slave- und dem Elastomergebiet aufgestellt (Abbildung 7):

$$\int_{\Gamma} [(\hat{\lambda} - \hat{\mathbf{q}}_L)^T \delta \hat{\mathbf{u}}_S] = 0 \quad (1)$$

wobei die Spannungen $\hat{\lambda}$ auf der Slave-Seite und $\hat{\mathbf{q}}_L$ auf der Elastomerseite an den virtuellen Verschiebungen der Slave Seite $\delta \hat{\mathbf{u}}_S$ Arbeit leisten.

Zur Verringerung des Berechnungsaufwands werden die Spannungen $\hat{\mathbf{q}}_L$ nicht als Unbekannte behandelt, sondern als Funktion der Verschiebungen der Slave- und Master-Seite $\hat{\mathbf{u}}_S$ und $\hat{\mathbf{u}}_M$ beschrieben. Dies wird ermöglicht, indem ein linearer Verschiebungsansatz in Dickenrichtung des Elastomers verwendet wird. Während in der ersten Projektphase eine Mortar-Formulierung für elastische Zwischenschichten ohne Dämpfung ausgearbeitet worden war [8], wurde sie nun durch die Verwendung eines komplexen Elastizitätsmoduls auf viskoelastische Schichten erweitert [9]. Hiermit wird die Dämpfungswirkung des

Elastomers berücksichtigt, die einen erheblichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Gesamtstruktur haben kann, sodass numerische Frequenzganganalysen mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden können.

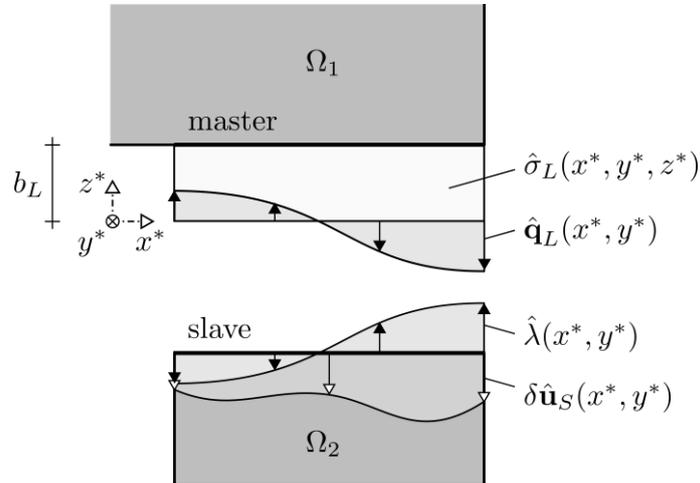


Abbildung 7 Schnittfläche zwischen dem Slave- und Elastomergebiet [9]

Die Genauigkeit der modifizierten Mortar-Methode wurde in zwei numerischen Beispielen untersucht, die typische Massivholzkonstruktionen darstellen. Das erste Beispiel entspricht dem Decken-Wandanschluss mit Elastomerschicht aus [6] gemäß Abbildung 4, das zweite Beispiel ist ein Gebäudeteil, bestehend aus mehreren Massivholzkomponenten (Abbildung 8).

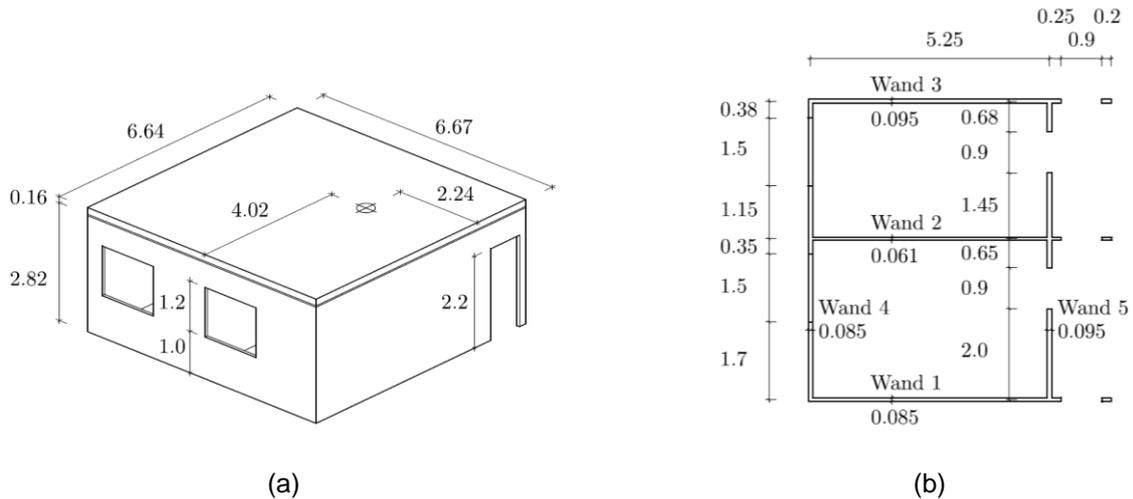
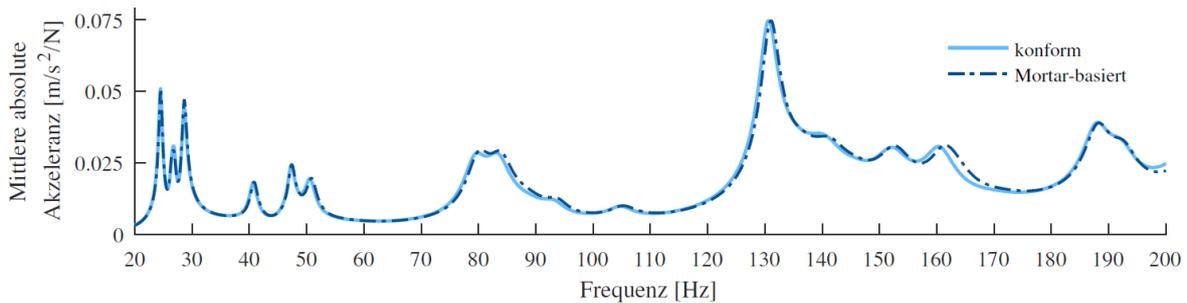


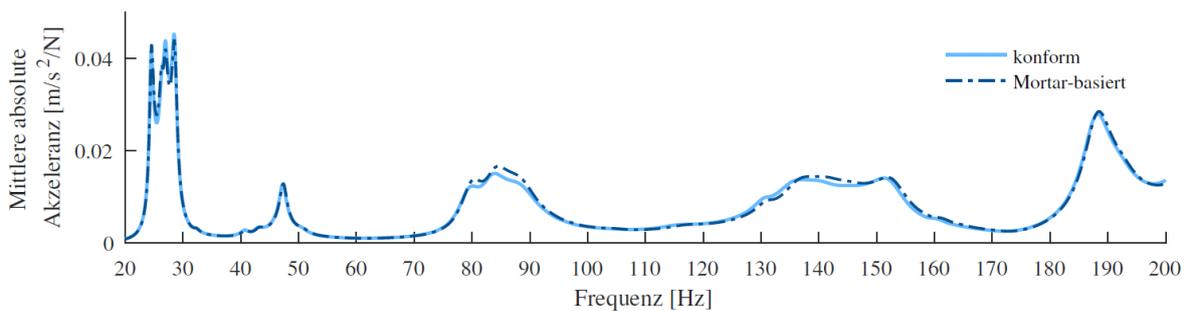
Abbildung 8 Untersuchter Gebäudeteil: (a) 3D Ansicht, (b) Grundriss [m] [9]

In beiden Fällen wurden ein konformes und ein Mortar-basiertes FE-Modell miteinander verglichen, und zwar anhand der Absolutwerte der Akzeleranzen unter Deckenanregung, gemittelt über die Auswertungspunkte der

einzelnen Bauteile. Die Ergebnisse, die in Abbildung 9 beispielhaft für den Decken-Wandanschluss dargestellt sind, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem konformen und nicht-konformen Modell. Außerdem wurden die Akzeleranzen über Frequenzbereiche mit den Obergrenzen 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz und 200 Hz gemittelt und jeweils die relative Abweichung des frequenzgemittelten Werts im nicht-konformen Fall von demjenigen im konformen Fall berechnet. Für die direkt angeregten Bauteile sind die relativen Abweichungen nicht größer als 3,6 % und für die indirekt angeregten Bauteile kleiner als 7,9 % [9].



(a)



(b)

Abbildung 9 Absolutwert der Akzeleranz unter Deckenanregung der Decken-Wandkonstruktion mit Elastomerschicht, gemittelt über alle Auswertungspunkte (a) der Decke und (b) der Wand [9]

3.2.3 Fazit

Sowohl die Vergleiche zwischen den Schwingungsmessungen und -simulationen unter Verwendung konformer Modelle als auch diejenigen zwischen den konformen und Mortar-basierten Modellen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. Da durch die modifizierte Mortar-Methode die Netzgenerierung deutlich vereinfacht wird und Netzverfeinerungen vermieden werden, können komplexe Massivholzkonstruktionen einschließlich Elastomerschichten mit relativ geringem Modellierungs- und Rechenaufwand schwingungstechnisch analysiert werden.

3.3 BIM basierte FEM - Modellierung eines Achtgeschoßers zur Berechnung der ersten Eigenmoden – Validierung gegenüber Messergebnissen

Für die Untersuchung mehrgeschossiger Massivholzgebäude wurde ein Verfahren zur BIM gestützten baodynamischen Schwingungsanalyse mit Hexaederelementen höherer Ordnung unter Verwendung der Mortar-Methode entwickelt und validiert [7]. Hierzu wurde das lehrstuhleigene Pre-Processing Framework TUM.GeoFrame [26] erweitert: Es greift zuerst auf die in einer IFC-Datei gespeicherten Daten des Bauwerksinformationsmodells zu und ermöglicht die Auswahl der relevanten IFC-Objekte (IFC: Industry Foundation Classes) [27,28]. Daraufhin werden die Bauteile des Gebäudes in einem automatisierten, mehrstufigen Verfahren unabhängig voneinander vernetzt. Die nicht-konforme Vernetzung des Gebäudes wird ermöglicht, indem die Anschlüsse der Bauteile mit der Mortar-Methode abgebildet werden [8,9]. Hierdurch können auch komplexe Bauwerke automatisch vernetzt und Netzverfeinerungen an Stoßstellen vermieden werden. Die Eingangsdateien für die FE-Berechnung werden schließlich aus dem Netz, den Materialdaten, den Eigenschaften der Bauteilanschlüsse und den Angaben der Randbedingungen erzeugt. Eine große Recheneffizienz wird durch den Einsatz finiter Elemente höherer Ordnung in Kombination mit einer relativ groben Vernetzung erreicht [10]. Die Anforderungen des Verfahrens und die bauteilorientierte Vernetzung werden im Folgenden anhand eines Decken-Wandanschlusses genauer beschrieben (Abbildung 10). Anschließend wird die Anwendbarkeit des Verfahrens an einem mehrgeschossigen Massivholzgebäude demonstriert.

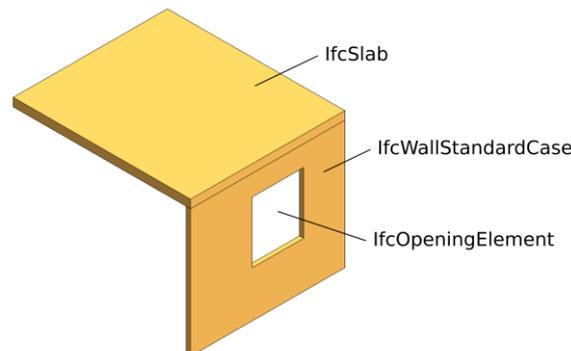


Abbildung 10 Mit IFC-Objekten beschriebener Decken-Wandanschluss

3.3.1 Anforderungen an das Bauwerksinformationsmodell und an die Anbindung des Simulationsmodells

Das Bauwerksinformationsmodell sollte mindestens diejenigen Bauteile samt Öffnungen abbilden, die durch ihre Steifigkeit und Masse das Schwingungsverhalten des Gebäudes beeinflussen. Dabei sind die Geometrie und der Schichtaufbau der Bauteile einschließlich der Materialien anzugeben. Bauteildaten und Materialwerte können beispielsweise aus der Datenbank VaBDat (www.vabdat.de) ausgelesen werden. Außerdem sind die Stoßstellen zwischen Bauteilen mit hoher Genauigkeit geometrisch zu modellieren, damit die Mortar-Verbindungen korrekt erzeugt werden können. Sowohl Überlappungen als auch zu große Abstände sind zu vermeiden.

Mit dem IFC-Datenmodell ist es möglich, die Geometrie eines Elements wie einer Wand oder einer Öffnung auf unterschiedliche Weise zu beschreiben, beispielsweise mittels Boundary Representation (BRep) oder Constructive Solid Geometry (CSG) [29]. Die im IFC-Datenmodell möglichen geometrischen Darstellungsschemata sind deshalb bei der Vernetzung, die im Folgenden beschrieben wird, zu berücksichtigen.

3.3.2 Bauteilorientierte Vernetzung

Um aus den eingelesenen und ausgewählten IFC-Objekten ein Hexaedernetz zu erzeugen, wird zuerst ein BRep-Volumenmodell des zu untersuchenden Bauwerks erstellt. Dafür werden nicht nur die unterschiedlichen Darstellungsformen der IFC-Elemente in das einheitliche interne BRep-Format umgewandelt, sondern auch die Beziehungen zwischen den Elementen durch die Ausführung von booleschen Operationen berücksichtigt. Im vorliegenden Demonstrationsbeispiel wird zum einen die geometrische Darstellung der Decke und der Wand in das BRep-Format überführt und zum anderen die Öffnung in die explizite Beschreibung der Wand eingefügt (Abbildung 11a).

Ausgehend vom Volumenmodell eines Bauwerks kann grundsätzlich ein konformes Hexaedernetz gemäß [30,31] erzeugt werden, indem erst das Modell unter Berücksichtigung der Bauteilverbindungen nach einem vorgegebenen Schema zerlegt wird und anschließend die Teilkörper aufeinander abgestimmt vernetzt werden. Konform heißt hier, dass sich Hexaederelemente nur an vollständigen Berandungsflächen, ganzen Kanten oder einzelnen Knoten berühren dürfen. Das Verfahren ist jedoch auf bestimmte Bauwerksgeometrien beschränkt und führt an Stoßstellen zu einer großen Anzahl von Elementen, wodurch ein hoher Rechenaufwand entsteht. Es wurde deshalb ein alternatives Vorgehen entwickelt, bei dem die Bauteile getrennt voneinander vernetzt und anschließend mithilfe der Mortar-Methode verbunden werden [8,9]. Hierzu wird zunächst die Mittelfläche jedes Bauteils bestimmt (Abbildung 11b) und eine Vierecks-Freivernetzung durchgeführt. Das nicht-konforme Hexaedernetz wird schließlich aus den vernetzten 2D-Regionen durch Extrusion erzeugt, wobei die Extrusionslängen den Bauteildicken entsprechen (Abbildung 11c).

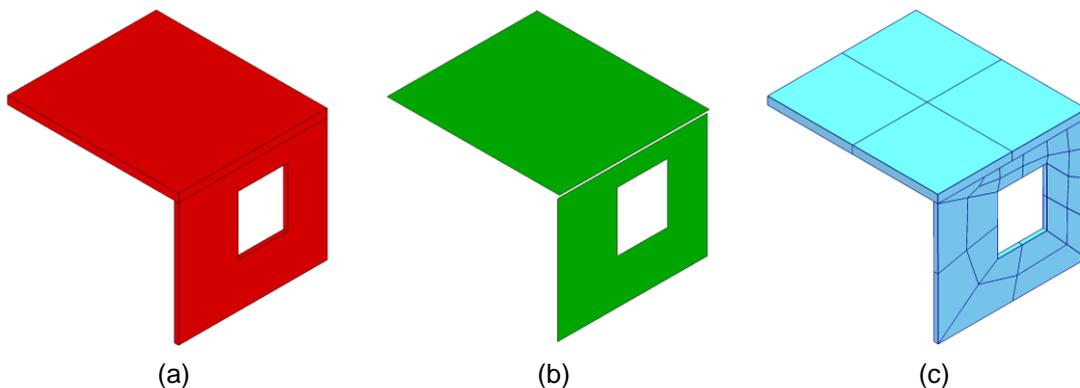


Abbildung 11 Geometrische Modelle und FE-Netz des Decken-Wandanschlusses: (a) BRep-Volumenmodell, (b) BRep-Mittelflächenmodell, (c) nicht-konformes Hexaedernetz

Ausgehend von Bauwerksinformationsmodellen können somit volumetrische FE-Modelle erzeugt werden, um Eigenfrequenzbestimmungen sowie Schwingungs- und Körperschallprognosen für Gebäudeteile und gesamte Gebäude durchzuführen. Im Folgenden wird die Ableitung des Simulationsmodells für ein mehrgeschossiges Massivholzgebäude und dessen Validierung mit Messergebnissen gezeigt.

3.3.3 Validierung des Planungsprozesses an einem mehrgeschossigen Massivholzgebäude

Die Anwendbarkeit des beschriebenen Planungsprozesses wurde an einem achtgeschossigen Gebäude in Massivholzbauweise demonstriert, das in Bad Aibling steht und in Abbildung 12 dargestellt ist [7]. Die Höhe des Gebäudes beträgt 23,9 m und seine Grundfläche ist $10 \times 20,4 \text{ m}^2$ groß. Die Anschlüsse zwischen den Massivholzbauteilen enthalten keine Elastomere. Außerdem gibt es einen Treppenhaukern aus 25 cm dicken Stahlbetonwänden, an welche die Massivholzbauteile über Winkelverbindungen angeschlossen sind.



Abbildung 12 Untersuchtes Massivholzgebäude

Die tiefsten Eigenfrequenzen des Gebäudes wurden in zwei voneinander unabhängigen Messungen bestimmt [32,33]. In beiden Untersuchungen wurde eine Biegeeigenmode mit Verschiebungen in Richtung der kürzeren Gebäudeabmessung (x-Richtung) bei 2,34 Hz [32] bzw. 2,29 Hz [33] erfasst. Außerdem wurden im Bereich zwischen 3,0 Hz und 3,4 Hz sowohl Schwingungen in x-Richtung als auch in Richtung der längeren Gebäudeabmessung (y-Richtung) gemessen. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die zweite Eigenmode, wie in [33] beschrieben, bei 3,05 Hz liegt und Verschiebungen in x- und y-Richtung aufweist.

Das Bauwerksinformationsmodell des Gebäudes wurde nach dem Einlesen und Filtern der IFC-Objekte in ein BRep-Volumenmodell umgewandelt. Aus diesem wurde daraufhin ein BRep-Flächenmodell erzeugt, das schließlich zur Erstellung eines Hexaedernetzes vernetzt und extrudiert wurde (Abbildung 13). Die Schichten eines Bauteils sind zur Verringerung des Rechenaufwands nicht einzeln im FE-Modell abgebildet, sondern werden durch eine Schicht mit homogenisierten Materialparametern repräsentiert [34,35]. Die Bauteilanschlüsse wurden mithilfe der Mortar-Methode modelliert. Das erzeugte Netz umfasst 9286 Elemente. Bei einem Polynomgrad von 3 für die Ansatzfunktionen umfasst das zu lösende Gleichungssystem etwa $4,6 \times 10^5$ Unbekannte.

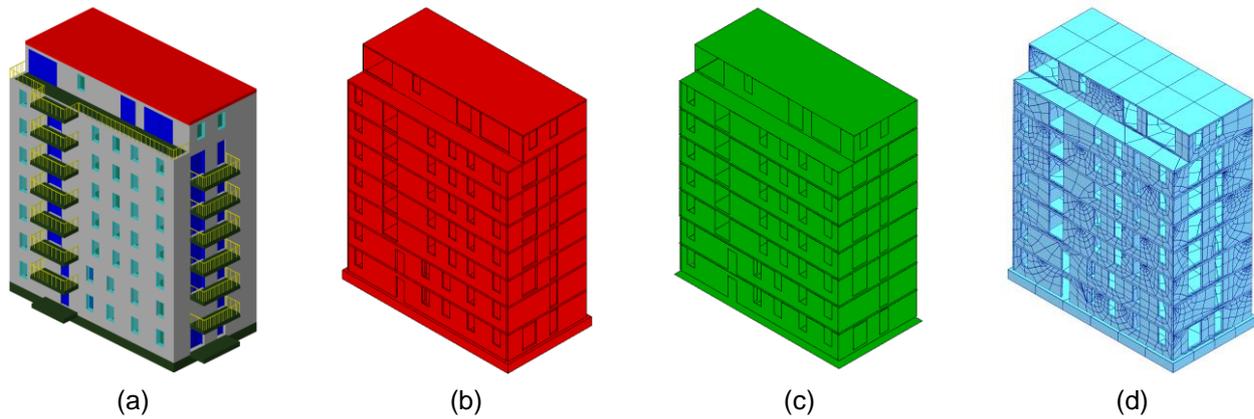


Abbildung 13 Geometrische Modelle und FE-Netz des Gebäudes: (a) Bauwerksinformationsmodell, (b) BRep-Volumenmodell, (c) BRep-Mittelflächenmodell, (d) nicht-konformes Hexaedernetz

Da die Parameterwerte eines FE-Modells in der Praxis immer Unsicherheiten aufweisen, wurden der dynamische Bettungsmodul, die Festigkeitsklassen des Holzes und des Stahlbetons sowie der Elastizitätsmodul der Zwischenschichten in den Mortar-Verbindungen der Holzbauteile variiert. Die mit einem Polynomgrad von 3 berechneten Eigenfrequenzen sowie deren relative Abweichungen von den gemessenen Eigenfrequenzen gemäß [33] sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Berechnete Gebäudeeigenfrequenzen

		Parametervariante						
		1	2	3	4	5	6	7
Dynamischer Bettungsmodul	MN/m ³	100	50	10 ⁹	100	100	100	100
Festigkeitsklasse des Stahlbetons	-	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37
Festigkeitsklasse des Holzes	-	C24	C24	C24	C24	C30	C24	C24
Elastizitätsmodul der Mortar-Zwischenschichten	N/mm ²	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	150	20
Erste Eigenfrequenz	Hz	2,16	1,88	3,06	2,16	2,16	2,05	1,79
Zweite Eigenfrequenz	Hz	3,11	2,79	3,85	3,12	3,10	2,96	2,69
Relative Abweichung der ersten Eigenfrequenz	%	5,8	18,0	33,5	5,5	5,7	10,7	21,8
Relative Abweichung der zweiten Eigenfrequenz	%	1,9	8,5	26,2	2,3	1,5	2,9	11,8

Bei der Ermittlung der relativen Abweichungen wurden die erste berechnete Eigenfrequenz der ersten gemessenen Eigenfrequenz und die zweite berechnete Eigenfrequenz der zweiten gemessenen Eigenfrequenz zugeordnet. Die im Fall der Parametervariante 1 berechneten Eigenformen sind in Abbildung 14 dargestellt. Bei der Parameterstudie wurde der dynamische Bettungsmodul, wie in Tabelle 1 dargestellt, auf 100 MN/m³ und 50 MN/m³ gesetzt. Diese Werte stellen gemäß [36] den oberen und unteren Grenzwert zur Abbildung eines festen Bodens, wie z.B. kiesigem Grobsand, dar. Eine Variation des Bettungsmoduls innerhalb dieses Bereichs kann

offenbar zu einer erheblichen Änderung der Gebäudeeigenfrequenzen führen. Die größte Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wurde bei einem Bettungsmodul von 100 MN/m^3 erreicht. In diesem Fall wurden die Eigenfrequenzen mit einer relativen Abweichung von unter 6 % bestimmt. Ferner führte die Annahme eines starren Untergrunds zu deutlich höheren berechneten als gemessenen Eigenfrequenzen. Die Änderung der Festigkeitsklasse des Betons von C30/37 auf C35/45 gemäß [37] oder des Holzes von C24 auf C30 entsprechend [23,24] wirkte sich hingegen nur geringfügig auf das Ergebnis aus. Weiterhin wurde der Elastizitätsmodul der Schichten in den Mortar-Verbindungen zwischen den Holzbauteilen untereinander sowie zwischen den Holzbauteilen und dem Stahlbetonkern variiert, um den Einfluss der Anschlusssteifigkeiten zu erfassen. Verglichen mit starren Anschlüssen führten nachgiebige Verbindungen der Holzbauteile zu signifikant geringeren Gebäudeeigenfrequenzen [7].

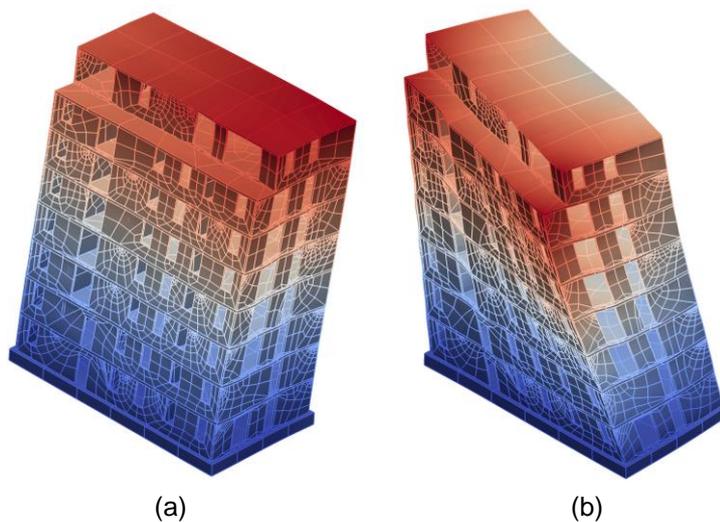


Abbildung 14 Eigenformen im Fall der Parametervariante 1: (a) 2,16 Hz, (b) 3,11 Hz

3.3.4 Fazit

Ein Verfahren wurde entwickelt, mit dem hexaedrische FE-Modelle höherer Ordnung automatisch aus Bauwerksinformationsmodellen erzeugt werden können [7]. Nachgiebige Bauteilanschlüsse können dabei mit Hilfe der viskoelastischen Zwischenschichten der Mortar-Verbindungen modelliert werden [8,9]. Die realitätsnahe Abbildung eines Anschlusses zwischen einer Massivholzdecke und -wand im Frequenzbereich von 20 Hz bis 150 Hz wurde im vorliegenden Projekt nachgewiesen [6]. Zusätzliche Untersuchungen, gegebenenfalls mit erhöhter Detailtiefe, sind jedoch notwendig, weil zahlreiche weitere Anschlussvarianten existieren und die Steifigkeit der Bauteilverbindungen die Eigenfrequenzen von Massivholzkonstruktionen stark beeinflussen.

Mit dem Simulationsmodell ist es möglich, Parameterstudien zur Analyse des Schwingungsverhaltens von Massivholzgebäuden oder Teilen davon effizient durchzuführen. Da Konstruktionen auf diese Weise optimiert werden können und der Modellierungsaufwand durch das BIM gestützte Verfahren erheblich verringert wird, können bei der Planung und Erstellung von Massivholzgebäuden die Qualität erhöht sowie Zeit und Kosten eingespart werden.

3.4 SEA-basierte Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung für Mehrgeschosser in Holzbauweise anhand VBAcoustic und VaBDat

Die SEA-basierte Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung nach DIN EN ISO 12354 [18] bietet sich für die bauakustische Berechnung im Gesamtplanungsprozess eines Mehrgeschosser in Massivholzbauweise an, da sie im vereinfachten Modell auch in das Nachweisverfahren der DIN 4109 [38] für Massivbauten eingeflossen ist. Neben diesem einfachen Einzahlwert-Modell, ist es nach [18] auch möglich eine detailliertere frequenzabhängige Berechnung durchzuführen. Das detaillierte Verfahren bietet die Möglichkeit Zusatzmaßnahmen, wie z.B. brandschutztechnisch erforderliche Zusatzbeplankungen in die Prognose aufzunehmen und die Stoßstelle differenzierter zu betrachten. Um die Flankenübertragung im Holzbau vollständig erfassen zu können, ist jedoch eine Erweiterung des vorhandenen Modells nach [18] erforderlich.

3.4.1 Berechnungsmodell

Die allgemeine Berechnung der Luftschalldämmung R' und des Norm-Trittschallpegels L'_n für ein Trennbauteil inklusive aller Nebenwege berücksichtigt neben der direkten Übertragung des Trennbauteils auch die Übertragung der flankierenden Bauteile:

$$R' = -10 \lg \left(10^{-R_{Dd}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{-R_{ij}/10} \right) \quad (2)$$

$$L'_n = 10 \lg \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (3)$$

Die Luftschalldämmung beinhaltet neben dem Schalldämm-Maß R_{Dd} des Trennbauteils (Decke oder Wand) die die Flankendämm-Maße R_{ij} für die Wege $ij = Ff, Df$ und Fd (s. Abbildung 15). Für die Trittschallübertragung sind neben dem Norm-Trittschallpegel der Decke $L_{n,d}$ die Flankenübertragungen $L_{n,ij}$ auf dem Weg $ij = Df$ und (im Holzbau) DFf zu berücksichtigen. Die Berechnung kann sowohl frequenzabhängig als auch mit Einzahlwerten erfolgen.

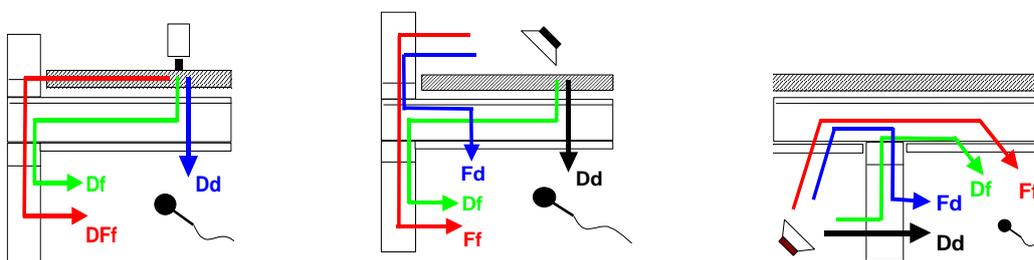


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Beiträge zur Schallübertragung im Holzbau: Bild links Trittschallübertragung; Bild in der Mitte und rechts Luftschallübertragung. Direkte Schallübertragung (Weg Dd) und Beiträge der Flankenübertragung auf den Übertragungswegen Ff, Df, Fd und DFf

3.4.1.1 Einzahlwert Berechnungsmodell für den Holzbau

Für das Einzahlwert-Modell wird das bewertete Flankendämm-Maß $R_{ij,w}$ aus den Schalldämm-Maßen der Decke und der flankierenden Wände ($R_{i,w}$ und $R_{j,w}$), sowie den Verbesserungen durch Vorsatzschalen $\Delta R_{ij,w}$ und dem Stoßstellendämm-Maß K_{ij} für den jeweiligen Übertragungsweg ij berechnet und auf die Trennfläche S_S und die gemeinsame Kantenlänge l_f bezogen.

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (4)$$

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} - \Delta R_{ij,w} - K_{ij} - 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (5)$$

Für die Trittschallberechnung von Holzdecken mit Einzahlwerten können die Eingangsdaten auch aus Labormessungen der Flankenübertragung $L_{n,ij,lab,w}$ berechnet werden, wie sie für die Ermittlung der Korrektursummanden K_1 und K_2 in [40] durchgeführt wurden (bezogen auf $l_{lab} = 20$ m und $S_{S,lab} = 20$ m²). Hierbei können zusätzliche Verbesserungen durch Vorsatzschalen $\Delta R_{ij,w}$ und Elastomere im Deckenstoß ΔK_{ij} berücksichtigt werden.

$$L_{n,Df,w} = L_{n,Df,lab,w} - \Delta K_{ij} - \Delta R_{j,w} - 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (6)$$

$$L_{n,DFf,w} = L_{n,DFf,lab,w} - \Delta K_{ij} - \Delta R_{ij,w} - 10 \lg \frac{S_S}{l_0 l_f} \quad (7)$$

Liegen keine Labordaten für den Weg Df vor, kann $L_{n,Df,w}$ aus K_1 [40], [38] wie folgt berechnet werden:

$$L_{n,Df,lab,w} = 10 \lg(10^{0,1(L_{n,w} + K_1)} - 10^{0,1L_{n,w}}) \quad (8)$$

Für den Weg DFf kann der Laborwert für die unterschiedlichen Situationen aus [40], [38] verwendet werden.

Die bewerteten Flankendämm-Maße bei Luftschallanregung werden für flankierende Holzständerwände (vertikale Übertragung) und flankierende Holzbalkendecken (horizontale Übertragung) aus der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ berechnet, die für verschiedene Ausführungen dem Bauteilkatalog entnommen werden kann.

$$R_{Ff,w} = D_{n,f,w} + 10 \lg \left(\frac{S_S}{10 \text{ m}^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{4,50 \text{ m}}{l_f} \right) \quad (9)$$

Werden zusätzliche Vorsatzschalen montiert, so kann das Flankendämm-Maß um die Verbesserung $\Delta R_{Ff,w}$ erhöht werden. Flankierende Massivholzwände und -decken werden nach Gleichung (4) berechnet.

3.4.1.2 Frequenzabhängiges Berechnungsmodell für den Holzbau

Die frequenzabhängige Berechnung lässt sowohl eine genauere Berücksichtigung der Konstruktion, als auch der Übertragungspfade zu. Während in der zugrundeliegenden SEA-Theorie alle Übertragungspfade der beteiligten Bauteile mit ihren einzelnen Bauteilschichten (Subsysteme) berücksichtigt werden, reduziert der frequenzabhängige Ansatz nach [18] die Anzahl der Übertragungswege jedoch drastisch. In Abbildung 16 wird dies für die Trittschallübertragung einer Decke gezeigt.



Abbildung 16: Flankenübertragungspfade für die Trittschallanregung von Decken bei der Unterteilung in die einzelnen Subsysteme für die vollständige SEA Betrachtung (links) bzw. die vereinfachte Berücksichtigung des Übertragungswegs D_f nach [18] (rechts).

Die Auswirkung dieser Vereinfachung bei der Anwendung des Berechnungsmodells im Massivholzbau wird im Folgenden für die Trittschallberechnung einer Trenndecke gezeigt. Hierzu wird für die direkte Übertragung der Messwert L_n der Decke unter Laborbedingungen verwendet und auf die Bausituation anhand der vereinfachten Körperschallnachhallzeit-Korrektur nach Gleichung (10) umgerechnet.

$$L_{n,d} = L_{n,situ} = L_n + 10 \log \left(\frac{\eta_{tot,lab}}{\eta_{tot,situ}} \right) \quad (10)$$

$$\eta_{tot,situ} = \eta_{int} + \frac{m'}{300\sqrt{f}} \quad \eta_{tot,lab} = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (11)$$

Für die Flankenübertragung auf dem Weg $ij = D_f$ wird neben $L_{n,situ}$ das Schalldämm-Maß der Decke ohne Estrichaufbau ($R_{i,situ}$ bzw. $R_{d,situ}$) und der unteren flankierenden Wand ($R_{j,situ}$ bzw. $R_{f,situ}$) benötigt, sowie die Schnellepegeldifferenz auf dem Weg D_f , die aus dem Stoßstellendämm-Maß K_{ij} berechnet werden kann.

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \quad (12)$$

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = K_{ij} - 10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}} \quad (13)$$

Das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} sowie $R_{i,situ}$ und $R_{j,situ}$ können hierzu nach [18] berechnet, oder aus Messwerten ermittelt werden.

Zum Vergleich der Berechnung mit Messergebnissen, wird in Abbildung 17, links zunächst das Ergebnis für eine Massivholzdecke mit abgehängter Unterdecke ohne Estrichaufbau gezeigt.

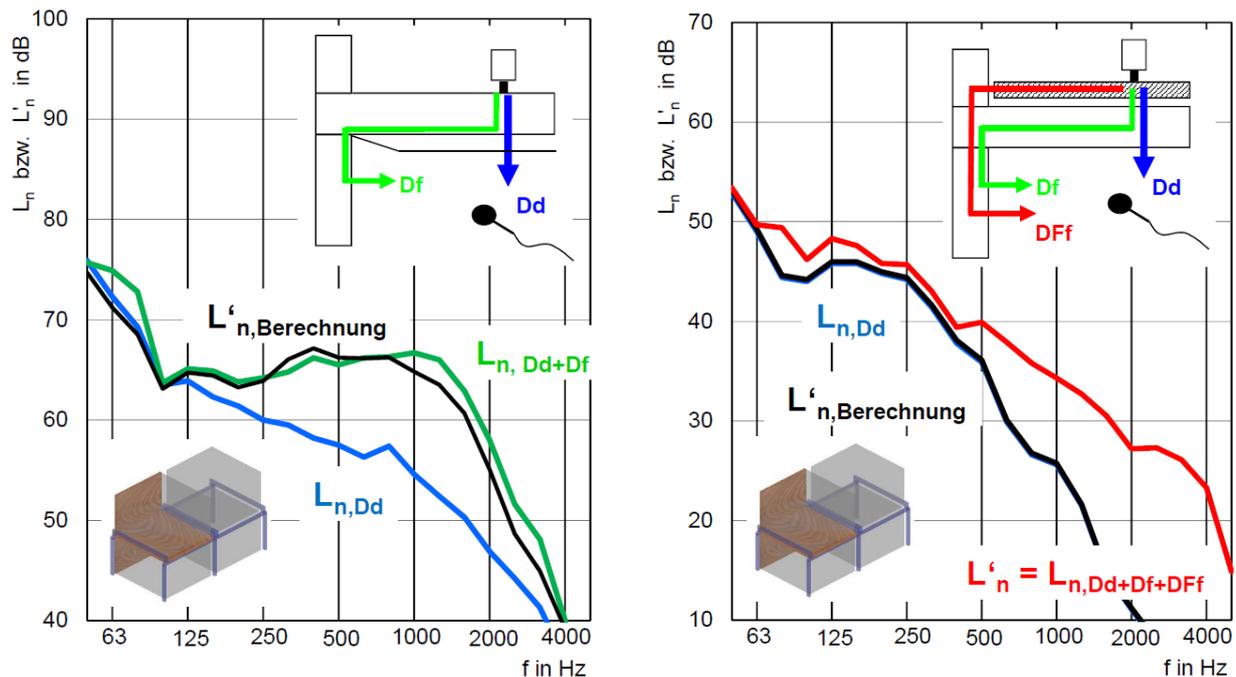


Abbildung 17: Vergleich zwischen Messung und Berechnung nach DIN EN ISO 12354-2 für einen T-Stoß unter Laborbedingungen. Links: Deckenaufbau aus 140 mm Brettschichtholz und 150 mm Unterdecke (Abschottung). Rechts: 140 mm Brettschichtholz, 120 mm Splittschüttung, 40 mm Trittschalldämmplatte, 50 mm Zementestrich. Flankierende Wand: 80 mm Holzwerkstoffplatte (OSB).

Für die Berechnung wurde der Messwert L_n der Decke verwendet und alle anderen Eingangsgrößen nach [18] ermittelt. Die Messung des Norm-Trittschallpegels inklusive Flankenübertragung L'_n wurde unter Laborbedingungen an einem T-Stoß durchgeführt, um die Einflüsse der Übertragungswege möglichst genau ermitteln zu können. Hierzu waren die Decke und die flankierenden Wände des T-Stoßes bauüblich miteinander verbunden. Die restlichen Wände von Sende- und Empfangsraum hatten keinen Kontakt zur Prüfdecke. Durch die als Abschottung ausgebildete Unterdecke konnte die direkte Übertragung stark reduziert werden, wodurch die Flankenübertragung auf dem Weg Df dominierte. Die gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung in Abbildung 17, links zeigt die prinzipielle Anwendbarkeit der Berechnung auf den Massivholzbau und die gute Prognose für den Weg Df.

Abbildung 17, rechts zeigt den Vergleich für eine Massivholzdecke mit Rohdeckenbeschwerung und schwimmendem Estrich, der mit derselben Vorgehensweise durchgeführt wurde. Hier zeigt sich keine befriedigende Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Die Differenz zwischen der Messung der Decke ohne Nebenwege und der Decke mit flankierender Wand kann nicht auf den Übertragungsweg Df zurückgeführt werden, da die Rohdeckenbeschwerung sowohl auf die direkte Übertragung als auch auf die Übertragung auf dem Weg Df gleichermaßen wirkt.

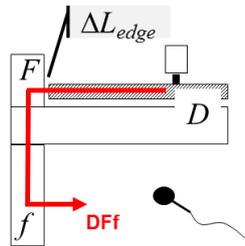
Zusätzliche Untersuchungen mit sukzessiver Unterdrückung der Übertragungswege zeigten, dass die wichtigste Flankenübertragung bei diesem Deckenaufbau über den Estrichrand und Randdämmstreifen in die obere flankierende Wand erfolgt. Um eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung zu erreichen, ist somit die Berücksichtigung dieses Übertragungswegs (Weg DFf) erforderlich.

3.4.2 Planungsdaten

Für die bauakustische Berechnung anhand der dargestellten Modelle sind umfangreiche Eingangsdaten erforderlich. Zur Ermittlung dieser Eingangsdaten wurden im Rahmen des Projektes Messprogramme ausgearbeitet und durchgeprüft. Nachfolgend wird die Ermittlung der Planungsdaten für den Übertragungsweg DFf (Abschnitt 3.4.2.1) beschrieben, sowie eine Zusammenstellung der Planungsdaten für Stoßstellendämm-Maße (Abschnitt 3.4.2.2) gezeigt und die Verwaltung der Planungsdaten in der online-Datenbank VaBdat beschrieben (Abschnitt 3.4.2.3).

3.4.2.1 Planungsdaten für den Übertragungsweg DFf

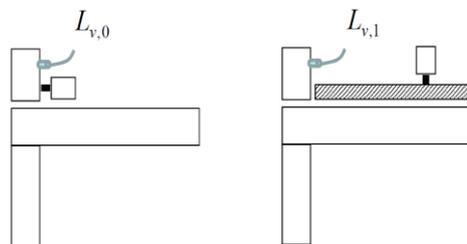
Aus der zuvor beschriebenen Berechnung der Trittschallübertragung auf dem Weg DFf ergibt sich als zusätzlich erforderliche Eingangsgröße der Berechnung die Trittschallminderung über den Estrichrand ΔL_{edge} (siehe Abbildung 18 und Gleichung (14))



$$L_{n,DFf} = L_{n,F} - \Delta L_{edge} + \frac{R_F - R_f}{2} - D_{v, Ff} - 10 \lg \sqrt{\frac{S_F}{S_f}} \quad (14)$$

Abbildung 18: Übertragung auf dem Weg DFf

Die Messung der so definierten Trittschallminderung über den Estrichrand erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise für die Bestimmung der Trittschallminderung eines Estrichaufbaus auf der Rohdecke. Hierzu wird zunächst der Schnellepegel auf der direkt angeregten oberen Wand (Bauteil F ohne festen Kontakt zur Decke) ermittelt. In der zweiten Messung erfolgt die Anregung auf dem Estrichaufbau bei unveränderten Messpunkten auf der Wand (siehe Abbildung 19). Die Trittschallminderung über den Estrichrand ergibt sich dann aus der Differenz der Schnellepegel:



$$\Delta L_{edge} = L_{v,0} - L_{v,1} \quad (15)$$

Abbildung 19: Messung der Trittschallminderung über den Estrichrand

Die Messergebnisse der Trittschallminderung für unterschiedliche Randdämmstreifen und Trittschalldämmplatten werden in Abbildung 20, links gezeigt. Für die Berechnung des Übertragungsweges DFf wurde ein Mittelwert für Zementestrichaufbauten gebildet (Abbildung 20, rechts). Für Trockenestrichaufbauten sind zusätzliche lokale Effekte (lokale Admittanz) im Kontaktpunkt zwischen Hammer und Estrichaufbau zu berücksichtigen [41].

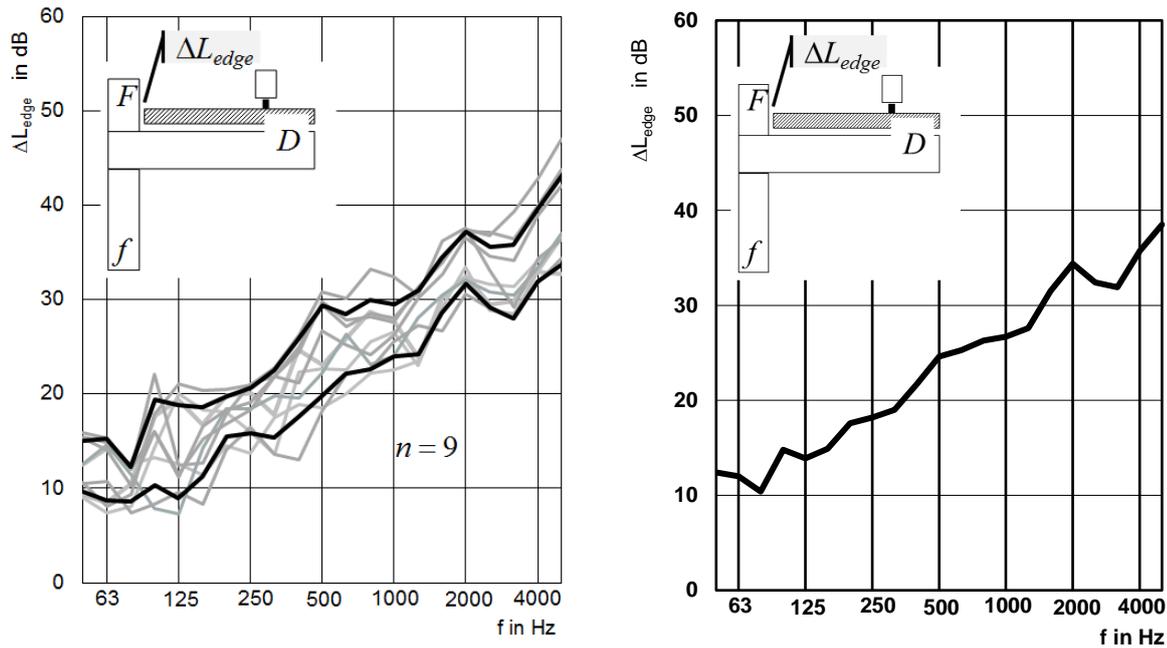


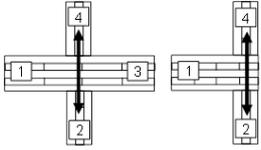
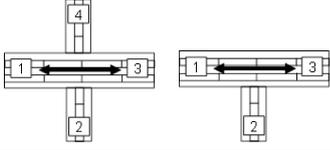
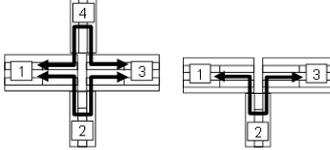
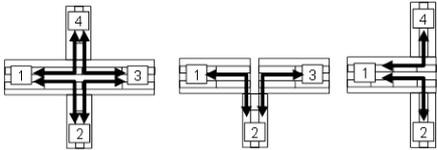
Abbildung 20: Messdaten für die Trittschallminderung über den Estrichrand ΔL_{edge} für verschiedene Trittschalldämmplatten und Randdämmstreifen (links) sowie der für die Berechnung mit Zementestrichaufbauten angesetzte Mittelwert (rechts).

3.4.2.2 Planungsdaten für Stoßstellendämm-Maße

Die Ermittlung von Planungsdaten für Stoßstellendämm-Maßen von Massivholzstößen war eine zentrale Aufgabenstellung bei den experimentellen Untersuchungen. Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Mittelwerte der Stoßstellendämm-Maße für verschiedene Decken-Wand-Stöße.

Neben den hierzu im Projekt ermittelten Stoßstellendämm-Maßen konnten in einer projektbegleitenden Arbeit [13], [14] Messdaten vergleichbarer Aufbauten aus verschiedenen europäischen Instituten zusammengetragen und verglichen werden. Die Stoßstellendämm-Maße wurden sowohl frequenzabhängig als auch als Einzahlwerte in der Bauteildatenbank VaBDat hinterlegt.

Tabelle 2: Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für den Bauteilstoß Decke / Wand von Massivholzelementen ($t = 80 - 200 \text{ mm}$), Stoß verschraubt oder mit Winkeln montiert

Stoßstellentyp	Übertragungsrichtung	Stoßstellendämm-Maß
	„vertikale Übertragung“ Weg Ff Wand durch Decke unterbrochen	$K_{Ff} = 21 \text{ dB}$
	„horizontale Übertragung“ Weg Ff Decke durchlaufend	$K_{Ff} = 3 \text{ dB}$
	„horizontale Übertragung“ Weg Ff Decke getrennt	$K_{Ff} = 12 + 10 \lg(m'_2/m'_1)$
	„gemischte Übertragung“ Weg Df und Fd	$K_{Fd} = 14 \text{ dB}$ $K_{Df} = 14 \text{ dB}$

3.4.2.3 Planungsdaten in der online-Datenbank VaBdat

Bei der praktischen Anwendung der Modelle für die Luft- und Trittschallberechnung fehlen dem Planer insbesondere in der Massivholz-Bauweise häufig die notwendigen Eingangsgrößen, um die Eigenschaften üblicher Bauprodukte, Bauteile und Stoßstellen zu beschreiben.

Die webbasierte Datenbank www.vabdat.de bietet dem Fachplaner die Möglichkeit, diese Eingangsgrößen über die kategorisierte Bausituation abzufragen und in den Programmen zur Schallschutz- und Schwingungsprognose weiter zu verwenden.

Die Datenbank unterscheidet drei Ebenen. In der ersten Ebene sind Kenngrößen enthalten zu Bauprodukten/-stoffen, wie z.B. richtungsabhängige E-Moduln, Koinzidenzgrenzfrequenzen, interne Verlustfaktoren von Plattenmaterialien oder dynamische Steifigkeiten von Trittschall-dämmungen.

In der zweiten Ebene werden aus Bauprodukt-Kombinationen Bauteile zusammengesetzt.

Den Bauteilen können konstruktive Details, wie z.B. die Art der Verbindung zwischen den Schichten, und schalltechnische Kennzahlen, wie z.B. frequenzabhängige Schalldämm-Maße R und Norm-Trittschallpegel L_n , zugeordnet werden.

Zuletzt werden in einer dritten Ebene Stoßstellen aus Bauteilen-Kombinationen gebildet und mit Kennzahlen, wie frequenzabhängige Schnellepegeldifferenzen $D_{v,ij}$ und Stoßstellendämm-Maßen K_{ij} , versehen.

Der aktuelle Datenbestand zu Stoßstellen stammt überwiegend aus Messungen (Holzmassivbau) des Forschungsprojektes, aber auch aus einer Zusammenstellung von Ergebnissen anderer Institute. Sowohl die Kennwerte für die Bauteile als auch für die Flankenübertragung können zukünftig z.T. durch vollständig berechnete Werte aus EFA/SEA Simulationen nach Teilprojekt 5 ergänzt werden [5].

Stoßstellen aus dem Holzleichtbau sind noch nicht enthalten. Zur einheitlichen Beschreibung der Bauprodukte, Bauteile und Stöße werden Kürzel verwendet, die im Hilfe-Bereich der Homepage beschrieben sind.

Eine Erweiterung des Datenbestandes durch Ergebnisse weiterer Institute oder durch die Industrie ist für eine breite Abdeckung von Bausituationen sinnvoll. Die sachgerechte Anwendung der Informationen ist Aufgabe des Anwenders.

VaBdat bietet Schnittstellen für den Bauteilexport zu VBAcoustic, das als Planungstool für die Luft- und Trittschallberechnung nach DIN EN ISO 12354 entwickelt wurde (siehe Abschnitt 3.4.1). Daneben können die Materialdaten aus VaBdat auch bei der Prognose von Gebäudeschwingungen verwendet werden, wie sie im Teilprojekt 2 anhand von TUM Geoframe und AdhoC für einen Achtgeschosser in Holzbauweise durchgeführt wurden (siehe Abschnitt 3.3). Als weitere Variante besteht die Möglichkeit die Daten direkt als XML-Datei zu exportieren (siehe Abbildung 21) und z.B. in eigenen Tabellenkalkulationsprogrammen zu verwenden.

The screenshot shows the VaBdat web interface. On the left, a table lists components with columns for ID, Kürzel, Dicke in m, Einsatzort, Bauweise, and Export. On the right, an XML snippet shows the structure for a component, including details like name, thickness, mass, source, and manufacturer.

Id	Kürzel	Dicke in m	Einsatzort	Bauweise	Export
65	B_bBST00_bOSB15_bGF12	0.107	Innenwand	breitstapel (BST)	XML
92	B_bCB19	0.019	Sonstiges	timber frame construction (TFC)	XML
86	B_bCLT100	0.1	Innenwand	cross laminated timber (CLT)	XML

```

- <response>
- <Bauteil>
- <Stammdaten>
  <id>73</id>
  <name>B_sCE50_ipMF7_bCLT160</name>
  <dicke>0.25</dicke>
  <flaechenMasse>197</flaechenMasse>
  <quelle>if Rosenheim</quelle>
  <quellenart>Forschungsbericht Vibroakustik</quellenart>
  <quellenreferenznummer>1a_A_03/05</quellenreferenznummer>
  <kuerzel>B_sCE50_ipMF7_bCLT160</kuerzel>
  <einsatzort>Trenndecke</einsatzort>
  <bauweise>cross laminated timber (CLT)</bauweise>
  <hersteller>if Rosenheim</hersteller>
- <Stammdaten>
- <BauteilKennzahl>
  <institution>HS Rosenheim</institution>
  <jahrDatenerhebung>2015</jahrDatenerhebung>
  <herkunftsort>keine Angabe</herkunftsort>
- <BauteilKennzahl>
- <BauteilBauprodukt>
  <bauprodukt_id>1</bauprodukt_id>
  <bauprodukt_name>Zementestrich</bauprodukt_name>
  <bauprodukt_kuerzel>M_sCE50</bauprodukt_kuerzel>
  <schicht>1</schicht>
- <BauteilBauprodukt>
  
```

Abbildung 21: Zugriff auf die Bauteilliste der Datenbank über die Homepage (links) und Ausschnitt einer XML-Exportdatei eines Bauteils (rechts).

3.4.3 Planungs- und Ausführungsbeispiele

Die Anwendung der dargestellten Berechnungsmodelle mit den hierzu ermittelten Eingangsdaten wird nachfolgend für verschiedene Situationen dargestellt. Für die Berechnung der Luft- und Trittschallübertragung wurde das Planungstool VBAcoustic entwickelt, das in Abschnitt 3.4.1 vorgestellt wird. Eine Anwendung für die frequenzabhängige Berechnung wird in Abschnitt 3.4.3.2 gezeigt. Die Berechnung mit Einzahlwerten und der Abgleich mit fünf Bauvorhaben wird in Abschnitt 3.4.3.3 beschrieben.

3.4.3.1 Luft- und Trittschallberechnung mit VBAcoustic

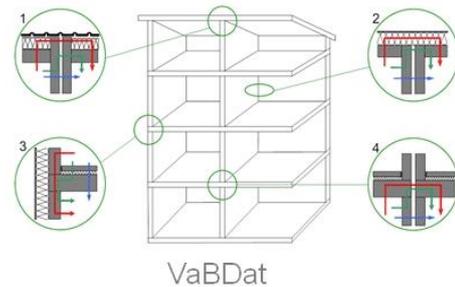
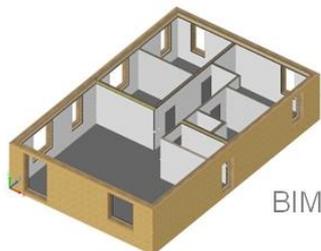
VBAcoustic ist ein Excel-basiertes Berechnungstool, das eine praxisnahe Prognose für das Luftschalldämmmaß und den Norm-Trittschallpegel nach [18] ermöglicht. VBAcoustic ist jedoch nicht für die kommerzielle Anwendung gedacht, sondern als Demonstrator, um die prinzipielle Vorgehensweise zu zeigen und nachvollziehbar zu machen. Die Begrüßungsoberfläche mit dem anvisierten Ablaufschema der Berechnung wird in Abbildung 22 gezeigt.

Willkommen bei:



VBAcoustic ist eine nichtkommerzielle Anwendung, die im Rahmen eines Forschungsprojektes zu Demonstrationszwecken entstanden ist. Sie ermöglicht die bauakustische Berechnung von Trennbauanteilen auf Basis der Berechnungsmodelle nach DIN 4109 und DIN EN ISO 12354. Die Bauteilausführung und -geometrie kann hierzu aus dem Bauwerksinformationsmodell im ifc – Format und der Bauteildatenbank VabDat eingelesen werden.

Die anhand dieser Berechnungshilfe durchgeführten Prognosen stellen keinen Nachweis im Sinne der DIN 4109 dar. Der Nutzer ist verpflichtet, das Ergebnis - insbesondere in Bezug auf den konkreten Einzelfall des Bauvorhabens - zu überprüfen. Es erfolgt keine Plausibilitätsprüfung der Eingaben. Die Programmierer schließen eine Haftung für die Berechnung aus.



VaBDat

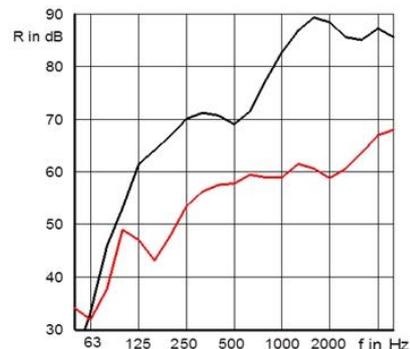


Abbildung 22: Begrüßungsbild zur Luft- und Trittschallprognose mit Hilfe von VBAcoustic, BIM und VaBDat

Die Berechnung ist sowohl frequenzabhängig als auch mit Einzahlwerten nach den im Abschnitt 3.4.1 dargestellten Zusammenhängen durchführbar. Die frequenzabhängige Variante ermöglicht die Berechnung der Nachhallzeit-Korrektur, um die Laborsituation auf eine reelle Bausituation übertragen zu können. Für diese In Situ Korrektur kann sowohl eine detaillierte, wie auch eine vereinfachte Korrektur für den Holzbau durchgeführt werden. Bei der detaillierten Korrektur werden mit Hilfe der Stoßstellendämm-Maße K_{ij} aller vorhandenen Stoßstellen, d.h. auch der Stoßstellen zwischen den einzelnen flankierenden Elementen, die Randverluste η_{Rand} berechnet. Hinzu kommen noch interne Verluste η_{int} und Verluste infolge von Abstrahlung $\eta_{\text{Abstrahlung}}$.

Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Daten von Labormessungen bzw. Planungsdaten aus VaBdat und DIN EN ISO 12354 [18] für das Trennbauteil und die Stoßstellen. Die Stoßstellendämm-Maße K_j werden:

- für den Massivbau nach [18], Anhang E, und
- für den Holzmassivbau nach [18], Anhang F, berechnet,
- aus Messdaten aus VaBdat importiert (siehe [4]) oder
- als beliebige eigene Werte eingetragen.

Da die Weiterentwicklung der Anwendung nicht mit dem Projektende abgeschlossen ist, wird nachfolgend der aktuelle Stand der Arbeit beschrieben.

Die Benutzeroberfläche von VBAcoustic teilt sich in drei Bereiche (siehe Abbildung 21). Der Anwender wird zunächst zur Programmsteuerung im rechten Teil der Oberfläche geführt, in dem die allgemeinen Voreinstellungen erfolgen. VBAcoustic kann sowohl für den Massivbau wie auch für den Holz- und Leichtbau mit der frequenzabhängigen Berechnung oder der Berechnung mit Einzahlwerten angewendet werden. Je nach Situation ergeben sich zwei mögliche Berechnungen:

- Horizontal (Luftschall): Das trennende Element ist üblicherweise eine Trennwand und es wird das Bauschalldämm-Maß R' bzw. R'_w berechnet.
- Vertikal (Luftschall + Trittschall): das trennende Element ist üblicherweise eine Decke und es werden das Bauschalldämm-Maß R' bzw. R'_w und der Trittschallpegel L'_n bzw. $L'_{n,w}$ berechnet.

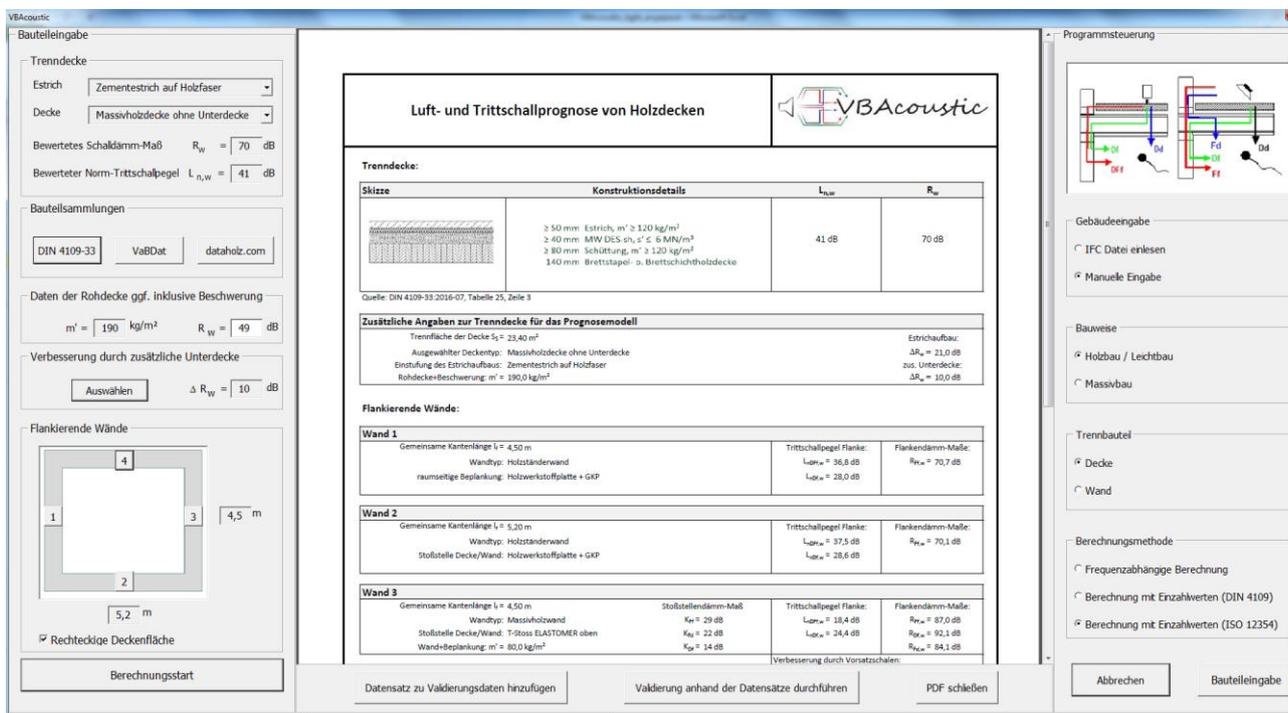


Abbildung 23: Oberfläche von VBAcoustic

Im linken Bereich der Benutzeroberfläche werden die Angaben zum trennenden Element und zu den einzelnen flankierenden Bauteilen eingetragen. Die Eingangsdaten für das trennende Element können hierbei entweder Prüfberichten entnommen oder aus DIN 4109-33 und VaBdat ausgewählt werden. Hinzu kommen noch

Informationen zur Bauteilgeometrie, die aus einem BIM anhand einer IFC-Datei importiert werden oder über eine Eingabemaske abgefragt werden können.

Der mittlere Bereich zeigt nach erfolgreicher Berechnung ein Datenblatt mit den Ergebnissen. Neben dem Schalldämm-Maß bzw. Trittschallpegel des trennenden Bauteils werden auch die Flankenschalldämm-Maße der einzelnen Übertragungswege angegeben um Schwachstellen zu identifizieren bzw. die gewählten Werte für K_1 und K_2 , wenn die Berechnung nach [38] erfolgt ist.

Die aktuelle Version von VBAcoustic stellt den Stand der Arbeit zum Projektabschluss dar. Folgende Punkte werden derzeit in weiterführenden Arbeiten behandelt:

- Zusammenführung der derzeit noch getrennt laufenden frequenzabhängigen Berechnung und der Einzahlberechnung in ein gemeinsames Planungstool.
- Integrieren der Berechnung für Trennwände
- Zusammenstellung von Schulungsunterlagen mit Ausführungsbeispielen für Planer und Hersteller.

Weiterführende Projekte mit folgenden Schwerpunkten sind geplant:

- Weiterentwicklung der BIM-Schnittstelle im IFC Standard¹ und des XML-Imports aus VaBDat
- Erstellen einer BIM-Schnittstelle zur Modeldarstellung und zum Import von Geometriedaten
- Entwickeln eines IFC-Standards zur Kommunikation zwischen BIM, VaBDat und VBAcoustic

3.4.3.2 Vergleich zwischen Messung und frequenzabhängiger Berechnung

Das beschriebene Modell für die frequenzabhängige (modifizierte) Berechnung mit Berücksichtigung der Übertragung auf dem Weg DFf wird in Abbildung 24, links zunächst auf den T-Stoß unter Laborverhältnissen angewendet. Der Decken- und Wandaufbau ist der selbe wie in Abbildung 17.

Abbildung 24, rechts zeigt den Vergleich für eine Baumesung in einem Massivholz-Mehrgeschoßer für den dort beschriebenen Aufbau der Trenndecke und der flankierenden Innenwände (Außenwände mit zusätzlicher Dämmebene). Durch die modifizierte Berechnung wird eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung bei den mittleren und hohen Frequenzen erreicht.

Die Vergleiche zeigen auch im unteren Frequenzbereich eine gute Übereinstimmung, obwohl die SEA-basierte Berechnung hier eher ungeeignet ist. Da bei tiefen Frequenzen jedoch die direkte Übertragung der Decke dominiert (siehe Messkurven mit und ohne Nebenwege im linken Diagramm) hat die berechnete Flankenübertragung dort kaum Einfluss. Das Berechnungsergebnis wird von den frequenzabhängigen Norm-Trittschallpegeln der Decke ohne Nebenwege bestimmt, die in das Prognosemodell als Labor-Messwerte eingehen

¹ Folgende IFC-Standards können derzeit eingelesen werden: ifcwallstandardcase, ifcwall, ifcbeam, ifcslab, ifcslabstandardcase, ifcplate.

Eingangsdaten:

- L_n des Deckenaufbaus (Labordaten)
- R der Decke ohne Estrichaufbau (Labordaten)
- R der flankierenden Wände nach [18]
- K_{ij} der Stoßstellen nach [18]
- ΔL_{edge} aus Messdaten
- L_n der oberen flankierenden Wand nach [18]



- Decke:
- 60 mm Zementestrich
 - 40 mm Trittschalldämmplatte
 - 90 mm Splittschüttung
 - 200 mm Brettschichtholz
- Flankierende Wand:
- 18 mm Gipsfaser
 - 18 mm Gipsfaser
 - 80 mm Massivholzelement
 - 18 mm Gipsfaser
 - 18 mm Gipsfaser

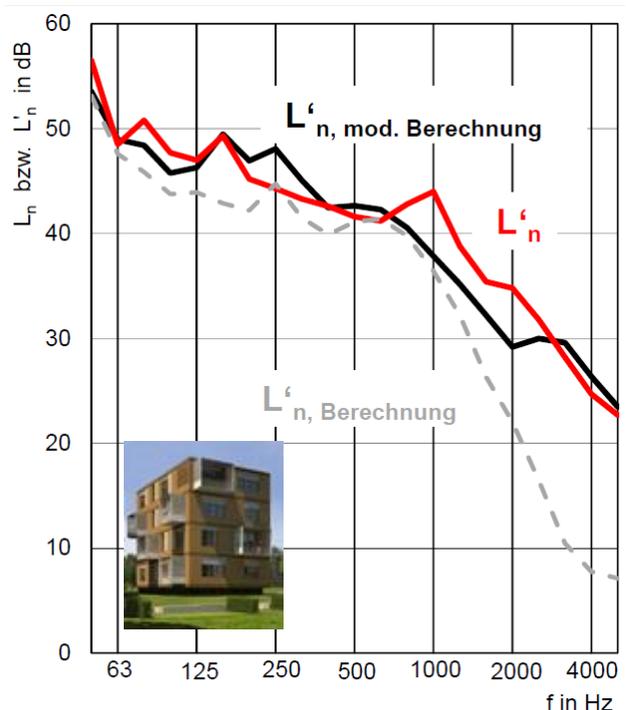
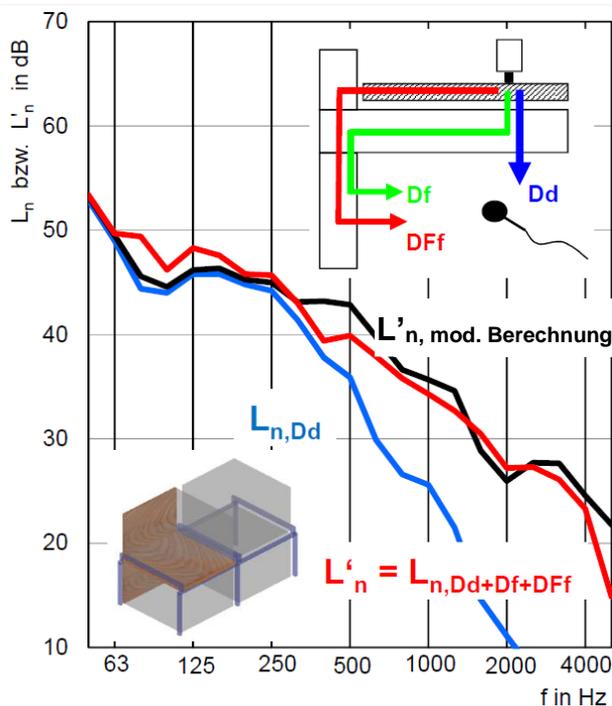


Abbildung 24: Vergleich zwischen Messung und modifizierter Berechnung.

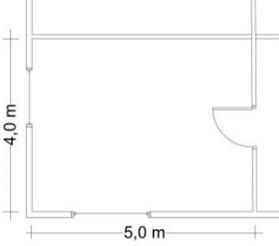
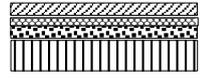
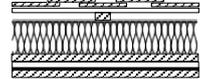
Links: T-Stoß unter Laborbedingungen
 Decke ohne Nebenwege: $L_{n,w} = 37,0$ dB
 Decke mit flankierender Wand: $L'_{n,w} = 39,9$ dB
 modifizierte Berechnung mit Dff: $L'_{n,w} = 40,2$ dB.

Rechts: Bauvorhaben in Massivholzbauweise
 Wohnungstrenndecke (Baumessung): $L'_{n,w} = 42,8$ dB
 Berechnung nach DIN EN ISO 12354: $L'_{n,w} = 38,1$ dB
 modifizierte Berechnung mit Dff: $L'_{n,w} = 41,7$ dB

3.4.3.3 Planung am Ausführungsbeispiel mit Einzahlwerten

Als Ausführungsbeispiel wird eine Massivholzdecke mit schwimmendem Zementestrich und einer Rohdeckenbeschwerung aus Splitt gewählt. Die flankierenden Massivholz-Außenwände sollen ihre Sichtholz-Oberfläche behalten. Die Innenwände werden als beidseitig beplankte Massivholzwände ausgeführt. Die Eingangsdaten werden in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Eingangsdaten für die Berechnung (Dickenangaben in mm)

Grundriss/ Anforderungen	Decke	Außenwand	Innenwand
	 <p>50 Zementestrich 40 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 80 Splitt, $m' = 120 \text{ kg/m}^2$ 160 Brettschichtholz</p>	 <p>Schalung Lattung 160 Dämmung 80 Brettsperrholz</p>	 <p>12,5 GKB 80 Brettsperrholz 12,5 GKB</p>
$S_S = 20 \text{ m}^2$ erf. $R'_w \geq 54 \text{ dB}$ zul. $L'_{n,w} \leq 50 \text{ dB}$	$R_w = 70 \text{ dB}$ $L_{n,w} = 41 \text{ dB}$ $R_{D,w} = 50 \text{ dB}^{(1)}$	$l_f = 9,0 \text{ m}$ $R_{f,w} = 32 \text{ dB}^{(1)}$ $K_1 = 4 \text{ dB}^{(2)}$ $L_{n,DFf,lab,w} = 45 \text{ dB}^{(2)}$	$l_f = 9,0 \text{ m}$ $R_{f,w} = 36 \text{ dB}^{(1)}$ $K_1 = 4 \text{ dB}^{(2)}$ $L_{n,DFf,lab,w} = 45 \text{ dB}^{(2)}$

1) Schalldämm-Maß des Massivholzelements (bei der Decke inkl. Splitt) für die Berechnung nach (4)

2) Planungsdaten für die Trittschallprognose nach Gleichung (14) bis (8) entnommen aus DIN 4109-2 [38]

Die Ergebnisse für die Berechnung mit den Eingangsdaten aus Tabelle 3 sowie einer optimierten Ausführung mit zusätzlichem Elastomerlager im Deckenstoß (unterhalb der oberen Wand) werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Berechnungsergebnisse für das Ausführungsbeispiel

	Decke	Außenwand	Innenwand
Berechnung mit Eingangsdaten aus Tabelle 3	$L'_{n,w} + u_{\text{prog}} = 47,6 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} + u_{\text{prog}} > \text{zul. } L'_{n,w}$ \Rightarrow Anforderung nicht erfüllt!	$L_{n,Df,w} = 39,3 \text{ dB}$ $L_{n,DFf,w} = 41,5 \text{ dB}$	$L_{n,Df,w} = 39,3 \text{ dB}$ $L_{n,DFf,w} = 41,5 \text{ dB}$
	$R'_w - u_{\text{prog}} = 53,7 \text{ dB} - 2 \text{ dB}$ $R'_w - u_{\text{prog}} < \text{erf. } R'_w$ \Rightarrow Anforderung nicht erfüllt!	$R_{Ff,w} = 58,1 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 59,1 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 79,4 \text{ dB}$	$R_{Ff,w} = 62,2 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 61,2 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 81,5 \text{ dB}$
Berechnung mit Zusatzmaßnahme Stoß Decke / Wand:	$L'_{n,w} + u_{\text{prog}} = 45,3 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} + u_{\text{prog}} < \text{zul. } L'_{n,w}$ \Rightarrow Anforderung erfüllt!	$L_{n,Df,w} = 39,3 \text{ dB}$ $L_{n,DFf,w} = 33,5 \text{ dB}$	$L_{n,Df,w} = 39,3 \text{ dB}$ $L_{n,DFf,w} = 33,5 \text{ dB}$
Elastomer oben $\Delta K_{ij} = 8 \text{ dB}$	$R'_w - u_{\text{prog}} = 61,1 \text{ dB} - 2 \text{ dB}$ $R'_w - u_{\text{prog}} > \text{erf. } R'_w$ \Rightarrow Anforderung erfüllt!	$R_{Ff,w} = 66,1 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 67,1 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 79,4 \text{ dB}$	$R_{Ff,w} = 70,2 \text{ dB}$ $R_{Fd,w} = 69,2 \text{ dB}$ $R_{Df,w} = 81,5 \text{ dB}$

Wie Tabelle 4 zeigt, werden die Anforderungen nach DIN 4109 in der ursprünglichen Ausführungsplanung nicht erreicht. Ursache ist die zu starke Flankenübertragung der Massivholzwände. Wird als Zusatzmaßnahme ein Elastomer mit einem $\Delta K_{ij} = 8 \text{ dB}$ unter der oberen Außenwand angeordnet, können die Anforderungen eingehalten werden. Da die dargestellte Berechnung von den Vorgaben der DIN 4109 abweicht, muss der Nachweis für die Trenndecke über eine Baumessung erfolgen. Ausführungsmöglichkeiten von Trenndecken in Mehrgeschossern und verschiedene Zusatzmaßnahmen für die flankierenden Wände werden in Tabelle 5 für fünf Bauvorhaben gezeigt.

Tabelle 5: Vergleich von Prognose und Messung für 5 Mehrgeschosser

BV	Decke	Wände	Zusatzmaßnahmen	Prognose	Baumessung
1	50 Zementestrich 30 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 80 Kalksplitt 180 Kastenelement +Tilger	Holz- ständer	Keine	$R'_w = 62,9 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 45,4 \text{ dB}$	$R'_w = 63 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 45 \text{ dB}$
2	80 Zementestrich 50 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 85 Kalksplitt 200 Brettsperrholz	100 MH	Elastomer oben+unten	$R'_w = 63,8 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 42,5 \text{ dB}$	$R'_w = 66 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 45 \text{ dB}$
3	65 Zementestrich 40 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 90 Kalksplitt 100 Brettschichtholz	100 MH 12,5GKB	Elastomer oben	$R'_w = 61,3 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 45,8 \text{ dB}$	$R'_w = 63 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 45 \text{ dB}$
4	60 Zementestrich 40 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 15 Holzfaserplatte 447 Holz-Beton-Verbund	$\geq 100 \text{ MH}$	Vorsatzschalen		$R'_w = \text{-- dB}$ $L'_{n,w} = 44 \text{ dB}$
5	60 Zementestrich 40 MFT, $s' = 6 \text{ MN/m}^3$ 90 Kalksplitt 200 Brettschichtholz	2x18 GF $\geq 100 \text{ MH}$ 2x18 GF	K ₂ 60 Kapselung	$R'_w = 60,9 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 44,0 \text{ dB}$	$R'_w = 59 \text{ dB}$ $L'_{n,w} = 43 \text{ dB}$

3.4.4 Fazit

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnten neue Planungsdaten für die Massivholzbauweise zusammengestellt werden und die prinzipielle Anwendbarkeit des Berechnungsmodells nach DIN EN ISO 12354 gezeigt werden.

Die Berechnung kann sowohl frequenzabhängig als auch mit Einzahlwerten erfolgen. In beiden Fällen ist es sinnvoll, rechnergestützte Umsetzungen zu verwenden, die die Besonderheiten im Holzbau berücksichtigen. Hierzu wurde das Planungstool VBAcoustic vorgestellt, das für die Eingangsdaten der Berechnung auf die Datenbank VaBdat zugreifen kann.

Der Vergleich der Prognose auf Basis von Eingangsdaten aus Labormessungen mit den Messwerten in ausgeführten Bauvorhaben zeigt eine gute Übereinstimmung. Wie die Ergebnisse der Baumessungen belegen, konnte durch die verschiedenen Zusatzmaßnahmen in allen Fällen ein hochwertiger Schallschutz erreicht werden.

3.5 Web-basierte Anwendung für die Identifikation der Frequenzbereichsgrenzen auf Basis der physikalischen Eigenschaften der Struktur

In Abhängigkeit des Frequenzbereichs eignen sich unterschiedliche Modellierungstechniken und Auswertegrößen. Es wurde eine interaktive Anwendung "Vibroacoustics of Plates" erstellt und online zur Verfügung gestellt, um die Frequenzbereichsgrenzen für Strukturen abhängig von ihren physikalischen Eigenschaften zu identifizieren.

3.5.1 Unterteilung des Frequenzbereichs

In [5] wurden verschiedene Stoßtypen - meist bestehend aus Brettsperrholz-Platten - untersucht. Zusammenfassend gilt, dass eine geeignete Methode, das korrekte Modell und passende Auswertegrößen in Abhängigkeit des Frequenzbereichs für die schwingungs- und schalltechnische Prognose der Bauteileigenschaften und der Flankenübertragung ausgewählt werden müssen. Dies führt zu einer Unterteilung des Frequenzbereichs. Grundlage dafür ist das frequenzabhängige Schwingungsverhalten der Bauteile, welches von deren physikalischen Eigenschaften abhängt. Der Frequenzbereich soll in einen tiefen, einen mittleren und einen hohen Frequenzbereich unterteilt werden. Die Bereiche decken den erweiterten bauakustisch relevanten Frequenzbereich ab.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde die EFA auf Grundlage von Volumen- und Schalenelementen mit der SEA - basierend auf Wellentypen von plattenartigen Strukturen oder ausschließlich Biegewellen annehmend - verglichen. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ordnet Tabelle 6 die zwei Methoden und deren Modelle den drei Frequenzbereichen zu.

Tabelle 6: Gültigkeit von EFA und SEA im Frequenzbereich: Die Frequenzgrenzen sind durch den modalen Überlappungsfaktor M, die Moden pro Band N sowie die erste Scherresonanz in Dickenrichtung gegeben [5][42].

Frequenzbereiche				
Tief	$M \approx 1, N \approx 5$	Mittel	1. Scherdickenresonanz	Hoch
SEA für plattenartige Strukturen				
EFA auf Basis von Schalenelementmodellen				
EFA auf Basis von Volumenelementmodellen				

Während die EFA auf der Grundlage von Volumenelementen in jedem Frequenzbereich einsetzbar ist, ist das Schalenelementmodell auf plattenartige Strukturen limitiert. Nachdem der Elastizitätsmodul von Holz quer zur Faser ein Dreißigstel des Elastizitätsmoduls parallel zur Faser beträgt, treten bereits bei vergleichsweise niedrigen Frequenzen Dickenresonanzen, d.h. Schwingformen in Dickenrichtung der Platten, auf, die ausschließlich mit Volumenelementen abgebildet werden können [15].

Diese obere Frequenzgrenze gilt auch für die SEA, sofern nur Wellentypen von plattenartigen Strukturen berücksichtigt werden, d.h. Scher- und Longitudinalwellen in Plattenebene sowie Biegewellen. Zusätzlich setzt die SEA ungefähr fünf Moden pro Band N voraus sowie einen modalen Überlappungsfaktor M von Eins. Die Einhaltung dieser Kriterien deutet die Erfüllung der SEA Annahmen an.

Wenn die energetische Grenzfrequenz der dünnen, schubstarrten Kirchhoff-Platte oberhalb der Frequenzgrenze von fünf Moden pro Band liegt, könnte darin die Energieübertragung mit der vereinfachten SEA prognostiziert werden, indem man jedes plattenartige Bauteil nur als Biegewellensubsystem abbildet. Die Gültigkeit dieser Annahme hängt von den Randbedingungen und der Belastung ab. Für typische Brettsperrholz-Strukturen tritt die Grenzfrequenz der Kirchhoff-Plattentheorie unterhalb der Grenzfrequenz von fünf Moden pro Band auf. Dies widerspricht der Anwendung des Prognosemodells der DIN EN 12354-1 [2000], die auf der vereinfachten SEA basiert und Stoßstellen mit Hilfe des Stoßstellendämm-Maßes charakterisiert [20].

Ferner können den in Tabelle 6 abgegrenzten Frequenzbereichen die Gültigkeitsbereiche verschiedener Auswertegrößen – wie z.B. von Energieeinflusskoeffizienten oder Kopplungsverlustfaktoren – sowie die Anwendbarkeit ingenieurmäßiger Abschätzungen wie die des Stoßstellendämm-Maßes zugeordnet werden [5][42].

Für ein korrektes Modell ist im Fall der EFA eine dem Frequenzbereich und den dort herrschenden minimalen Wellenlängen angepasste Elementseitenlänge erforderlich. In [5] wurden hierzu umfangreiche Studien durchgeführt, die eine Abschätzung der maximalen Elementseitenlänge für Elemente mit quadratischen Formfunktionen ermöglichen. Demnach soll die effektive Biegewellenlänge, die Schubweichheit und Rotationsträgheit berücksichtigt, mit mindestens vier Elementen diskretisiert werden. Dieser Zusammenhang ist in der Anwendung „Vibroacoustics of Plates“ hinterlegt.

3.5.2 Web-basierte Anwendung „Vibroacoustics of Plates“

Die interaktive, web-basierte Anwendung „Vibroacoustics of Plates“ wurde im Rahmen des Forschungsprojekts erstellt, um die Frequenzbereichsgrenzen für eine Struktur in Abhängigkeit ihrer physikalischen Eigenschaften identifizieren zu können. Die Anwendung wird auf der Homepage des Lehrstuhls für Bauchmechanik <https://www.bm.bgu.tum.de> zur Verfügung gestellt. Sie kann auch direkt über <http://go.tum.de/632541> erreicht werden.

Die Anwendung „Vibroacoustics of Plates“ enthält zwei grundlegende Funktionen:

Erstens können die Materialeigenschaften von Platten mit orthotropen Lagen gemäß der in [42] beschriebenen Vorgehensweise auf Basis von [34],[35],[43] über die Dicke homogenisiert werden. Voraussetzung ist ein symmetrischer, kreuzweiser Aufbau bzgl. der Mittelebene wie es für Brettsperrholz-Platten der Fall ist.

Zweitens können die dynamischen Eigenschaften von isotropen und orthotropen Platten sowie von deren Wellentypen berechnet werden. Dazu gehören:

- Geschwindigkeiten von Biegewellen, effektiven Biegewellen, Scherwellen in Plattenebene, Scherwellen mit Ausbreitung senkrecht zur Platte, Scherwellen (korrigiert) mit Verschiebungen senkrecht zur Plattenebene, Quasi-Longitudinalwellen (in Plattenebene) und Longitudinalwellen senkrecht zur Plattenebene sowie Gruppengeschwindigkeiten von Biegewellen und effektiven Biegewellen.
- Grenzfrequenz sowie energetische Grenzfrequenz der (dünnen) Kirchhoff-Platte sowie die ersten Scher- und Longitudinaldickenresonanzen.
- Die ersten vier Eigenfrequenzen einer vierseitig Navier-gelagerten Kirchhoff Platte.

- Moden pro Terzband von effektiven Biegemoden, Schermoden in Plattenebene und Quasi-Longitudinalmoden.
- Modale Dichte von effektiven Biegemoden, Schermoden in Plattenebene und Quasi-Longitudinalmoden.
- Modaler Überlappungsfaktor von effektiven Biegemoden, Schermoden in Plattenebene und Quasi-Longitudinalmoden.
- Abschätzung der maximalen Elementseitenlänge für quadratische Formfunktionen auf Basis der effektiven Biegewellenlänge.

Für die Prognose der Körperschallübertragung können auf dieser Basis eine geeignete Methode, ein korrektes Modell (vgl. Tabelle 6) sowie sinnvolle Auswertungsgrößen gewählt werden [5] [42], um eine spezifische Struktur innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs zu untersuchen.

Die Bedienung der Anwendung, die in Abbildung 25 dargestellt ist, kann in drei Schritte aufgeteilt werden:

1. Es werden physikalische Eigenschaften einer homogenen Platte oder einer einzelnen Lage auf der linken Seite eingegeben (Standardwerte sind gegeben). Anschließend drückt man „Apply“.
2. Im Fall einer kreuzweise geschichteten Platte werden die Materialeigenschaften über die Dicke homogenisiert. Dabei werden nach dem Drücken von „Apply“ die Eingangswerte der einzelnen Lage mit den homogenisierten Materialparametern der kompletten Platte überschrieben. Die Eingangsdaten der einzelnen Lage können jederzeit überprüft werden, indem man auf die Schaltfläche „Show Input“ drückt.
3. Auf der rechten Seite können die oben gelisteten Ergebnisse untersucht werden. Dabei kann zum Beispiel mit der Zoom Funktion gearbeitet werden. Außerdem können die Graphen als .png abgespeichert werden.

Vibroacoustics of Plates

The application "Vibroacoustics of Plates" can be classified in two steps:

1. Insert the physical properties of a homogenous plate or of a single layer in the case of a layered plate (default values are given) on the left and press 'Apply'.

Notice that in the case of a layered plate, a symmetric cross section with an odd number of layers and a crosswise layout is assumed (cf. scheme). Therefore, the thicknesses of the top to the center layer have to be inserted. The material properties are homogenized through the thickness. Thus, the input data of the single layer is overwritten by homogenized material parameters of the plate after pressing 'Apply'. The input data of the single layers can be checked by pressing the button 'Show Input'.

2. On the right, dynamic properties of the plate and of its wave types are plotted. These can be studied using e.g. the zoom function and saved as .png.

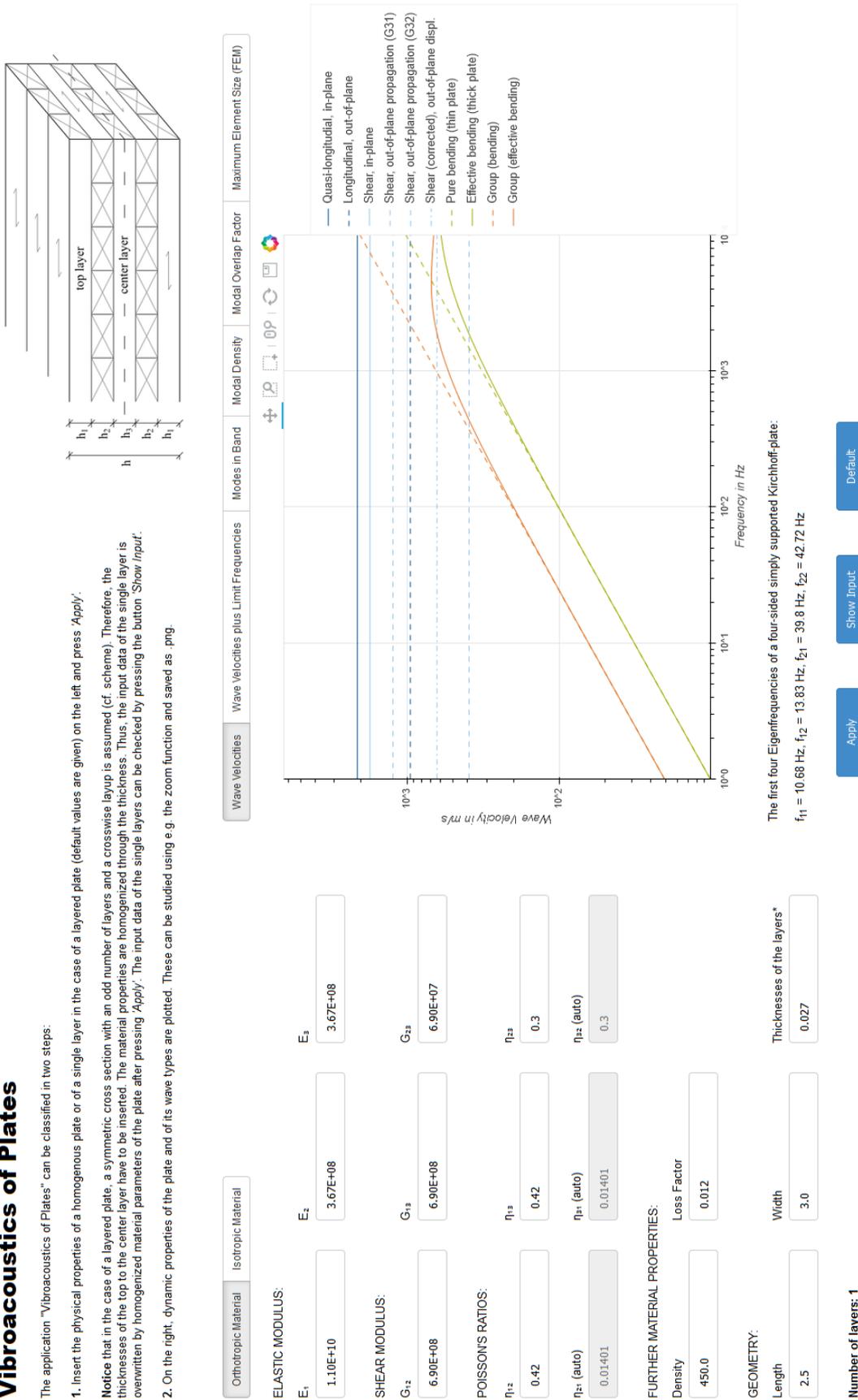


Abbildung 25 Web-basierte Anwendung „Vibroacoustics of Plates“: Homogenisierung von Materialparametern und Berechnung von Eigenschaften der Platten und deren Wellentypen.

4 Zusammenfassung

Die angestrebte Zielsetzung eines Planungsprozesses, der die numerische Simulation und den Nachweis vibroakustischer Gebäudeeigenschaften eng an ein umfassendes Bauwerksinformationsmodell koppelt, erforderte im Rahmen des Projektes Weiterentwicklungen der verwendeten Methoden in unterschiedlichen Bereichen.

Im Grundlagen-Bereich der Finiten-Elemente-Methode wurde ein mathematisches Modell zur Erweiterung der Mortar-Methoden verwendet, um sowohl nichtkonforme Netzverbindungen im Bauteilstoß als auch zusätzliche Elastomerlager in der Stoßstelle berücksichtigen zu können. Hierzu werden hexaedrische FE-Modelle höherer Ordnung automatisch aus Bauwerksinformationsmodellen erzeugt und nachgiebige Bauteilanschlüsse mit Hilfe der viskoelastischen Zwischenschichten der Mortar-Verbindungen modelliert. Da durch die modifizierte Mortar-Methode in Verbindung mit p-FEM-Elementen die Netzgenerierung deutlich vereinfacht wird und Netzverfeinerungen im Bauteilstoß vermieden werden, können nun auch komplexe Bauwerksmodelle mit relativ geringem Modellierungs- und Rechenaufwand schwingungstechnisch analysiert werden. Um die Anwendung der Methode für Mehrgeschosser in Massivholzbauweise zu zeigen und eine erste Validierung am Gesamtmodell durchzuführen, wurde ein Achtgeschosser anhand des BIM gestützten Verfahrens modelliert und die berechneten Eigenfrequenzen des Gesamtgebäudes mit Messwerten im ausgeführten Gebäude verglichen.

Für die Luft- und Trittschallberechnung auf Basis der Finiten-Elemente-Methode wurde die bisher nur für die Trittschallberechnung verwendete schwache Kopplung mit getrennter FEM-Berechnung auf die Luftschallberechnung angewendet. Hier zeigte sich, dass auch die Luftschallberechnung mit dem deutlich effizienteren schwach gekoppelten Berechnungssystem möglich ist.

Im Bereich der Statistischen Energieanalyse wurde ein praxisnaher Ansatz nach DIN EN ISO 12354 verwendet, der die Luft- und Trittschallberechnung inklusive Flankenübertragung für homogene Massivbauteile (Stahlbetondecken, Mauerwerkswände) ermöglicht. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnten die prinzipielle Anwendbarkeit des Berechnungsmodells für die Massivholzbauweise gezeigt werden. Für Deckenaufbauten mit schwimmendem Estrich und flankierenden Holzbauwänden, wurde ein zusätzlicher Übertragungsweg (Weg DFf) in das Berechnungsmodell integriert, wodurch die Übereinstimmung zwischen der Berechnung auf Basis von Labormessungen und der Messung im ausgeführten Gebäude deutlich verbessert werden konnte.

Die SEA-basierte Berechnung kann sowohl frequenzabhängig als auch mit Einzahlwerten erfolgen. In beiden Fällen ist es sinnvoll rechnergestützte Umsetzungen zu verwenden, die die Besonderheiten im Holzbau berücksichtigen. Hierzu wurde das Planungstool VBAcoustic als Excel-Anwendung entwickelt, das für die Eingangsdaten der Berechnung auf die im Projekt entstandene Datenbank VaBdat zugreifen kann.

Da sowohl die SEA-basierten als auch die Finite Element Methoden in ihrer Anwendbarkeit im Frequenzbereich eingeschränkt sind, erfolgten zusätzliche Modellierungen anhand der EFA, die eine Identifizierung der am besten geeigneten Prognosemethoden für den jeweiligen Frequenzbereich ermöglicht. Die EFA ist im kompletten erweiterten bauakustisch relevanten Frequenzbereich einsetzbar. Sie schließt die Lücken in Frequenzbereichen, wo sowohl die FEM ohne geeignetes Postprocessing als auch die SEA - aufgrund der niedrigen Anzahl an Moden und einem zu geringen modalen Überlappungsfaktor oder aufgrund der Begrenzung auf Wellentypen plattenartiger Strukturen bzw. auf reine Biegewellensubsysteme – für die Prognose der Körperschallübertragung ausscheiden.

Im experimentellen Bereich des Projektes wurden umfangreiche Untersuchungen an Bauteilstößen in Massivholzbauweise durchgeführt, um die Schallübertragung der Bauteilstöße durch Stoßstellendämm-Maße beschreiben zu können. Die Messungen erfolgten für die vertikale und die horizontale Übertragung flankierender Bauteile von Trenndecken und Trennwänden. Hierbei wurde der Einfluss des Masseverhältnisses zwischen Trenn- und Flankenbauteil, sowie die Ausführung des Bauteilstoßes detaillierter untersucht. Neben der direkten Montage mit Winkeln und Verschraubungen wurden auch entkoppelte Systeme mit Elastomeren geprüft, die eine deutliche Verbesserung des Stoßstellendämm-Maßes zeigten. Die ermittelten Stoßstellendämm-Maße wurden sowohl frequenzabhängig für die Bauteildatenbank VaBDat, als auch als Einzahlwerte für praxisnahe Planungshilfen im Tabellenverfahren zur Verfügung gestellt. Für die Planungswerte konnten neben den eigenen Laborprüfwerten ergänzende Daten anderer Prüfinstitute verwendet werden. Die experimentell ermittelten Stoßstellendämm-Maße wurden zusätzlich mit Berechnungsergebnissen anhand der EFA und SEA verglichen. Die EFA wurde mittels der am Lehrstuhl für Baumechanik implementierten Vorgehensweise durchgeführt, während für die SEA eine kommerzielle Software für die Berechnung der Kopplungsverlustfaktoren eingesetzt wurde, die in Stoßstellendämm-Maße umgerechnet werden können.

Experimentelle Untersuchungen wurden ebenso in Form einer Betriebsschwinganalyse an einzelnen und gekoppelten Bauteilen (L-Stoß) aus Massivholzelementen durchgeführt, um die mittels der Finite-Elemente Methode prognostizierten Eigenmoden und Eigenfrequenzen mit den Messergebnissen zu validieren.

Ergänzend zu den Labormessungen wurden im Rahmen des Projektes Baumessungen durchgeführt, um die Ergebnisse für die Validierung der Prognosemodelle verwenden zu können. Neben dem Bau-Schalldämm-Maß und dem Norm-Trittschallpegel konnten in einem Bauvorhaben auch die Stoßstellendämm-Maße und im o.g. Achtgeschosser die ersten Eigenfrequenzen des Gebäudes bestimmt werden. Somit stand eine gute Datenbasis für die Validierung zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Validierung zeigten sowohl für FEM-basierte Analyse des Schwingungsverhaltens als auch die SEA-basierten Luft- und Trittschallberechnung eine gute Anwendbarkeit der Methoden. Mit den vorgestellten Berechnungs- und Simulationsmodellen ist es nun möglich, Parameterstudien zur vibroakustischen Analyse von Massivholzgebäuden oder Teilen davon effizient durchzuführen. Da Konstruktionen auf diese Weise optimiert werden können und der Modellierungsaufwand durch das BIM-gestützte Verfahren erheblich verringert wird, können bei der Planung und Erstellung von Massivholzgebäuden die Qualität erhöht sowie Zeit und Kosten eingespart werden.

5 Literatur

- [1] Horger, T., Wohlmuth, B., „Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 1“, Forschungsbericht Technische Universität München, Juni 2017
- [2] Paolini, A., Kollmannsberger, S., Frischmann, F., Rank, E., Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 2, Forschungsbericht, Technische Universität München, 2018.
- [3] Châteaueux-Hellwig, C., Schramm, M., Rabold, A., „Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 4“, Forschungsbericht ift Rosenheim, 2017
- [4] Mecking, S., Kruse, T., Winter, C., Schanda, U., „Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 3“, Forschungsbericht HS Rosenheim, 2017
- [5] Winter C. , Müller G. , „Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten - Modellierung, numerische Simulation, Validierung – Teilprojekt 5“, Forschungsbericht TU München, 2017.
- [6] Paolini, A., Kollmannsberger, S., Winter, C., Buchschmid, M., Müller, G., Rabold, A., Mecking, S., Schanda, U., Rank, E., A high-order finite element model for vibration analysis of cross-laminated timber assemblies, Building Acoustics Vol. 24(3), S. 135-158, 2017.
- [7] Paolini, A., Frischmann, F., Kollmannberger, S., Rabold, A., Horger, T., Wohlmuth B., Rank, E., BIM gestützte strukturdynamische Analyse mit Volumenelementen höherer Ordnung, Bauingenieur 93(4), S. 160-166, 2018.
- [8] Horger, T., Kollmannsberger, S., Frischmann, F., Rank, E., Wohlmuth, B., A new mortar formulation for modeling elastomer bedded structures with modal-analysis in 3D, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, 1:18, 2014.
- [9] Paolini, A., Kollmannsberger, S., Rank, E., Horger, T., Wohlmuth, B., A mortar formulation including viscoelastic layers for vibration analysis, Computational Mechanics, 2018, DOI 10.1007/s00466-018-1582-9
- [10] Düster, A., Rank, E., Szabó, B. A., The p-version of the Finite Element and Finite Cell Methods, Encyclopedia of Computational Mechanics, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, 2017.
- [11] Paolini, A., Winter, C., Müller, G., Kollmannsberger, S., Rank, E., Vergleich der h- und p-Version der FEM zur Prognose des Körperschalls in Massivholzkonstruktionen, Fortschritte der Akustik, DAGA 2018.
- [12] Hadromi, N., Energieflussanalyse mittels p-FEM, Technischer Bericht, Technische Universität München, 2017.
- [13] Timpte, A., Stoßstellendämm-Maße im Massivholzbau – Konstruktionen, akustische Kenngrößen, Schallschutzprognose, Masterarbeit TU Berlin und Hochschule Rosenheim, 2016
- [14] Timpte A. 2017. Vibration Reduction Indices of Cross Laminated Timber Structures. <http://www.fh->

rosenheim.de/fileadmin/user_upload/Fakultaeten_und_Abteilungen/Fakultaet_ANG/Laboratorien/Schallmesstechnik/Documentation_Kij.pdf. (in Überarbeitung)

- [15] Winter, C.; Buchschmid, M.; Müller, G.: Modeling of orthotropic plates out of cross laminated timber in the mid and high frequency range. In: *Procedia Engineering* 199 (2017), S. 1392–97.
- [16] Lyon, R. H.; DeJong, R. G.: *Theory and application of statistical energy analysis*, 2. ed. Boston et al 1995.
- [17] Mace, B. R.; Shorter, P. J.: Energy Flow Models from Finite Element Analysis. In: *Journal of Sound and Vibration* 233 (2000) 3, S. 369–89.
- [18] DIN EN ISO 12354:2017-11: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Teil 1 und 2
- [19] Winter, C.; Buchschmid, M.; Müller, G.: Robust Estimation of the Energy Flow in Timber Structures. In: Gibbs, B. (Hrsg.): *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration 2017*.
- [20] Gerretsen, E.: Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures. In: *Applied Acoustics* 12 (1979) 6, S. 413–33.
- [21] Finnforest Merk GmbH, Leno-Massivbau, LenoTec, Material + Konstruktion, Aichach, 2004.
- [22] DIN EN 1912:2013-10: Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten; Deutsche Fassung EN 1912:2012 + AC:2013.
- [23] DIN EN 338:2016-07: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen; Deutsche Fassung EN 338:2016.
- [24] Niemz, P., Caduff, D., Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz, *Holz als Roh- und Werkstoff* 66, 2008, Heft 1, S. 1-4.
- [25] Negreira, J., Austrell, P., Flodén, O., Bard, D., Characterisation of an elastomer for noise and vibration insulation in lightweight timber buildings, *Building Acoustics*, 21(4), S. 251-276, 2014.
- [26] Sorger, C., Frischmann, F., Kollmannsberger, S., Rank, E., TUM.GeoFrame: automated high-order hexahedral mesh generation for shell-like structures. *Engineering with Computers*, 30(1), S. 41-56, 2014
- [27] ISO 16739:2013: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organization for Standardization, Genf, Schweiz.
- [28] ISO/PAS 16739:2005: Industry Foundation Classes, Release 2x, Platform Specification (IFC2x Platform). International Organization for Standardization, Genf, Schweiz.
- [29] Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 1. Aufl., 2015, ISBN 978-3-658-05605-6.
- [30] Frischmann, F., Kollmannsberger, S., Rabold, A., Rank, E., High order Finite Elements for mid-frequency vibro-acoustics, *Proc. of the IX International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN*, Porto, Portugal, 2014.

- [31] Romberg, R.: Gebäudemodell-basierte Strukturanalyse im Bauwesen. Dissertation, Technische Universität München, 2005.
- [32] Feldmann, A., Dynamic Properties of Tall Timber Structures under Wind-induced Vibration, Masterarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [33] Kruse, T., Messung und Analyse des Schwingungsverhaltens von gekoppelten Bauteilen aus Brettsperholz, Masterarbeit, Hochschule Rosenheim, 2016.
- [34] Bodig, J., Jane, B.A., Mechanics of Wood and Wood Composites, Krieger Publishing Company, 2. Aufl., 1993, ISBN 978-0-894-64777-2.
- [35] Gülzow, A., Zerstörungsfreie Bestimmung der Biegesteifigkeiten von Brettsperholzplatten, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2008.
- [36] Eibl, J., Häussler-Combe, U., Baudynamik, Beton-Kalender 1997, Teil 2, S. 755-861.
- [37] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [38] DIN 4109 Schallschutz im Hochbau, Teil 1 und Teil 2 in der konsolidierten Fassung, 2018-01
- [39] Châteauevieux-Hellwig, C., Mecking, S., Brummer, B., Rabold, A., Anwendung zur SEA basierten Berechnung nach EN 12354 für Massivholzelemente, Tagungsband DAGA 2016
- [40] Holtz, F., Rabold, A., Hessinger, J., Bacher, S., Ergänzende Deckenmessungen zum laufenden Vorhaben: Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109, Forschungsbericht ift Rosenheim, 2005
- [41] Rabold, A.: Anwendung der Finite-Element-Methode auf die Trittschallberechnung. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [42] Winter, C.: Frequency Dependent Modeling for the Prediction of the Sound Transmission in Timber Constructions. submitted, Dissertation 2018.
- [43] Blaß, H.J.; Görlacher, R.: Brettsperholz - Berechnungsgrundlagen. In: Holzbau-Kalender (2002) 2, S. 580–98.