

Vibroakustik - Schalltechnische Planung als Teil des Bauwerkinformationsmodells

Andreas Rabold
ift Rosenheim
DE-Rosenheim



Vibroakustik - Schalltechnische Planung als Teil des Bauwerkinformationsmodells

1. Einleitung

Holzhäuser zeigen Pioniercharakter in Bezug auf Energieeinsparung und Nachhaltigkeit und 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 Geschosbauweise des urbanen Bereichs kontinuierlich zu. Gerade im Geschosswohnungsbau bieten sich moderne vorgefertigte Massivholzelemente wie Brettsperrholzelemente, Hohlkastenelemente oder Holz-Beton-Verbundelemente für eine baukonstruktiv kosteneffiziente Erstellung der Gebäude an.

Verglichen mit Gebäuden in Mauerwerks- und Betonbauweise ist jedoch die Planung eines Bauobjektes in Holzbauweise für den Architekten und die Fachplaner eine deutlich größere Herausforderung. 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, könnten den Planungsaufwand nicht nur drastisch reduzieren, sondern auch zuverlässiger machen, die Qualität entscheidend erhöhen und damit letztendlich die Wettbewerbsfähigkeit von Holzbauten fördern.

Aus dieser Motivation heraus wird derzeit ein Kooperationsprojekt der TU-München der Hochschule Rosenheim und des ift Rosenheim durchgeführt. Als Zielsetzung des Projekts ergibt sich ein Planungsprozess, der die numerische Simulation und den Nachweis vibroakustischer Gebäudeeigenschaften eng an ein umfassendes Bauwerkinformationsmodell (BIM) koppelt. Dies ermöglicht dem Fachplaner einen optimierten Entwurf einzelner Bauteile, die Untersuchung deren (schwingungstechnischer) Kopplung sowie der vibroakustischen Eigenschaften des Gesamtgebäudes bereits in einem frühen Planungsstadium. In Kombination mit der Methode der Statistischen-Energie-Analyse (SEA) wird hierzu die Erweiterung vorhandener Finite-Elemente-Verfahren hinsichtlich einer geometrisch-mechanischen und vibroakustisch konsistenten Kopplung von Bauteilen sowie die Ableitung des volumenorientierten Gesamtmodells aus dem Bauwerkinformationsmodell angestrebt.

2. Vibroakustischer Planungsprozess im Überblick

Zur Illustration des methodischen 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 **Bauwerkinformationsmodell** (BIM) überführt wird. Im BIM werden neben der bauteilorientierten räumlichen Geometrie des Gebäudes insbesondere dessen mechanische und bauphysikalische Attribute gespeichert. Dieses Modell basiert auf dem Standard der Industry Foundation Classes (IFC), die gegebenenfalls um die für die Vibroakustik von Holzbauten

notwendigen zusätzlichen Attribute zu erweitern sind. Dieses Informationsmodell kann nicht nur für die hier betrachtete schalltechnische Planung, sondern auch für vielfältige andere Planungsaufgaben verwendet werden, wie Abbildung 1 illustriert.

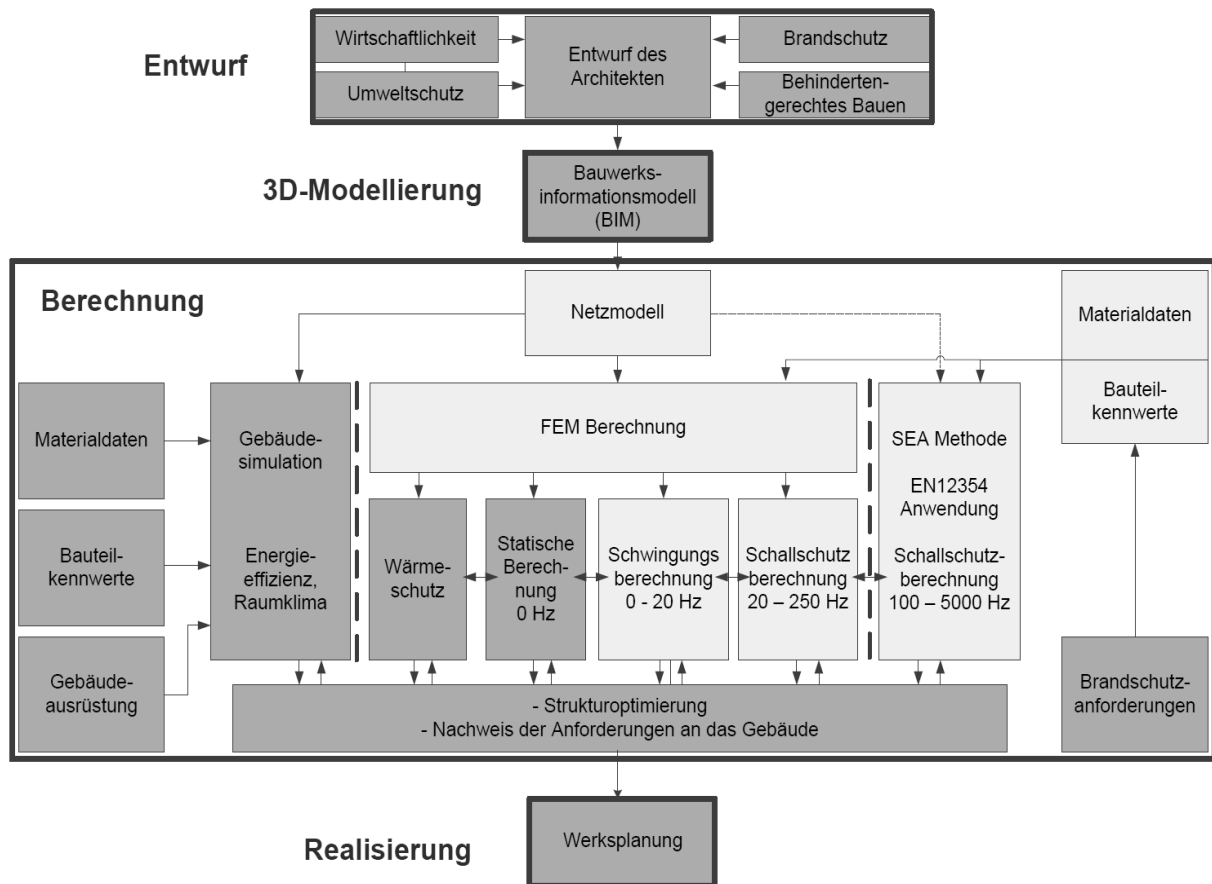


Abbildung 1: Übersicht des Gesamtplanungsablaufs für ein Bauwerk in Geschosßbauweise. Für den vibroakustischen Planungsprozess relevante Bereiche sind gelb hinterlegt.

Aus dem bauteilorientierten Modell wird ein **Netzmodell** abgeleitet. Dieses Volumennetz wird je Bauteil oder Bauteilgruppe (Decken, Wände etc.) generiert, wobei ohne wesentliche Einschränkung hinsichtlich des Anwendungsfeldes ‚Holzbauwerk‘ angenommen wird, dass sich jede Bauteilgruppe aus einem flächigen Netz aus Viereckselementen durch Extrusion in Dickenrichtung erzeugen lässt. Es entsteht ein Netz aus (dünnen) Hexaederelementen. Die Verwendung von unter Umständen geschichteten Volumenelementen ist zwingend nötig, weil eine detaillierte Simulation des komplexen geometrischen Teilmodells einer Baugruppe mit Platten- oder Schalenelementen nicht mit hinreichender Genauigkeit möglich ist.

Die in diesem Netzmodell auftretenden dünnen Strukturen verlangen aus Effizienzgründen die Verwendung von **Finiten Elementen hoher Ordnung**, 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 ist den **Stoßstellen** zwischen den Bauteilen sowohl hinsichtlich der geometrischen als auch der mechanisch-akustischen Modellbildung zu widmen. Da die Bauteile einzeln vernetzt werden, ‚passen‘ die Netze an diesen Stoßstellen nicht zwingend aneinander. Um dieses verallgemeinerte Netzmodell verwenden zu können, sollen **Mortar-Techniken** für einen inkompatiblen Netzübergang verwendet werden. Hierfür gibt es bisher wenige Untersuchungen zu Finiten Elementen hoher Ordnung und zu Eigenwertproblemen, deren Lösung die Grundlage für die vibroakustische Analyse darstellt. Das Finite-Element-Modell wird für den Bereich tiefer Frequenzen (0 - 250 Hz) eingesetzt.

Eine weitere zentrale Forschungsaufgabe ist die Verallgemeinerung der Mortar-Technik zu einem **Mortar-artigen Ansatz**, mit dem nicht nur bisher untersuchte starre, sondern ebenso unterschiedlich **„weiche“ Kopplungen** (Elastische Lagerung, duktile Nagelung oder Verschraubung gegenüber starrer Verklebung) berücksichtigt werden können. Hierfür sind mechanische und mathematische Modelle sowie eine geeignete Implementierung unter Verwendung Finiter Elemente hoher Ordnung zu entwickeln. Da am Gesamtmodell die **Flankenübertragung** eine wesentliche Rolle spielt, kommt diesem Modellaspekt große praktische Bedeutung zu.

Für die Berechnung im mittleren und oberen Frequenzbereich (250 - 5000 Hz) wird die **SEA Methode** und die von ihr abgeleiteten Ansätze nach EN 12354 eingesetzt. Als Ausgangsbasis dient die in der Praxis bereits in ersten Bauvorhaben getestete Berechnung nach EN 12354 [1],[2],[3]. Von diesem stark vereinfachten Ansatz ausgehend wird die Anwendung der umfassenderen und genaueren SEA-Methode mit experimentell ermittelten Verlustfaktoren angestrebt. Hierfür ist ein spezielles Berechnungsmodell erforderlich, das nicht nur auf geometrische Daten zugreift, sondern auch die experimentell ermittelten Verlustfaktoren zwischen den Subsystemen für die SEA-Methode und die akustischen Eingangsdaten der Bauteile und Stoßstellen für die Berechnung nach EN 12354 verwendet.

Von entscheidender Bedeutung für das Gesamtprojekt ist die Bereitstellung geeigneter **Material- und Anregungsmodelle** aus detaillierten experimentellen Untersuchungen. Anhand einer Bestandsaufnahme der erforderlichen Bauteil- und Verbindungsvarianten (Stoßstellen) kann ein Prüfplan für die erforderlichen Eingangsgrößen festgelegt- und abgearbeitet werden. Typische Stoßstellen und Bauteildetails von Massivholzelementen Im Geschosßbau werden in **Abbildung 2** gezeigt. Die experimentellen Eingangsdaten werden sowohl für die SEA- als auch die FEM-Berechnung benötigt. Die erforderlichen Modelle zur Anregung, Dämpfung und Abstrahlung können auf Basis der in [4] erarbeiteten Ansätze weiterentwickelt und mit experimentellen Ergebnissen validiert werden.

Dieser Aspekt ist auch für die **Validierung** und damit den Nachweis der Praxistauglichkeit des Gesamtsystems unerlässlich. Hierzu sollen Messergebnisse aus realisierten Mehrgeschossern in Massivholzbauweise verwendet werden. Es können sowohl Messergebnisse bereits realisierter Mehrgeschosser [3] als auch des geplanten Beispielobjekts verwendet werden.

Das **Beispielprojekt** soll zur Darstellung des optimierten Planungsprozesses und der Umsetzung für den Anwender mit den entwickelten Planungswerkzeugen realisiert werden. Die Planung soll in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsvorbereitung des beteiligten Holzbaubetriebs erfolgen. Möglich ist hier auch eine Wiederholung der Planung eines bereits realisierten Bauvorhabens um im direkten Vergleich mit der zunächst konventionell durchgeführten Planung Fortschritte und weiterer Entwicklungsbedarf des neuen Planungsverfahrens aufzuzeigen.

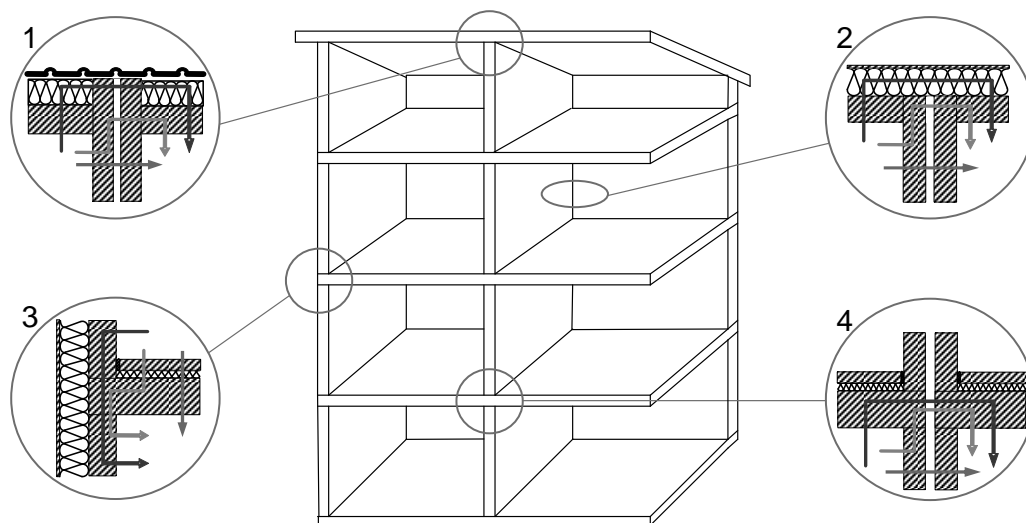


Abbildung 2: Geschosswohnungsbau in Massivholzbauweise mit Prinzipdetails der Stoßstellen und den Schall-Übertragungswegen.

3. Inhalt der Teilprojekte

Die Bearbeitung des methodischen Ansatzes erfolgt in vier Teilprojekten der Projektpartner. Eine Übersicht der Teilprojekt-Inhalte und der -Verknüpfungen wird Abbildung 3 anhand der Aufgabenverteilung im Gesamtprojekt gegeben.

Die Teilprojekte eins und zwei der Technischen Universität München beinhalten die Verwaltung der Daten im BauwerkInformationsmodell, die Bauteilbezogene Netzgenerierung für die Finite-Elementberechnung sowie deren Verbindung anhand der Mortar Methode. Die Schwerpunkte der Teilprojekte drei und vier an der Hochschule Rosenheim und dem ift Rosenheim liegen in der SEA- und FEM-basierten Luft- und Trittschallberechnung. Ebenso erfolgt die für die Berechnung erforderlich messtechnische Ermittlung der Eingangsgößen für die Berechnung.

Aufbauend auf einer Bauteil- und Messdatensammlung werden ergänzende Material-Komponenten- Stoßstellen und Bauteilmessungen durchgeführt.

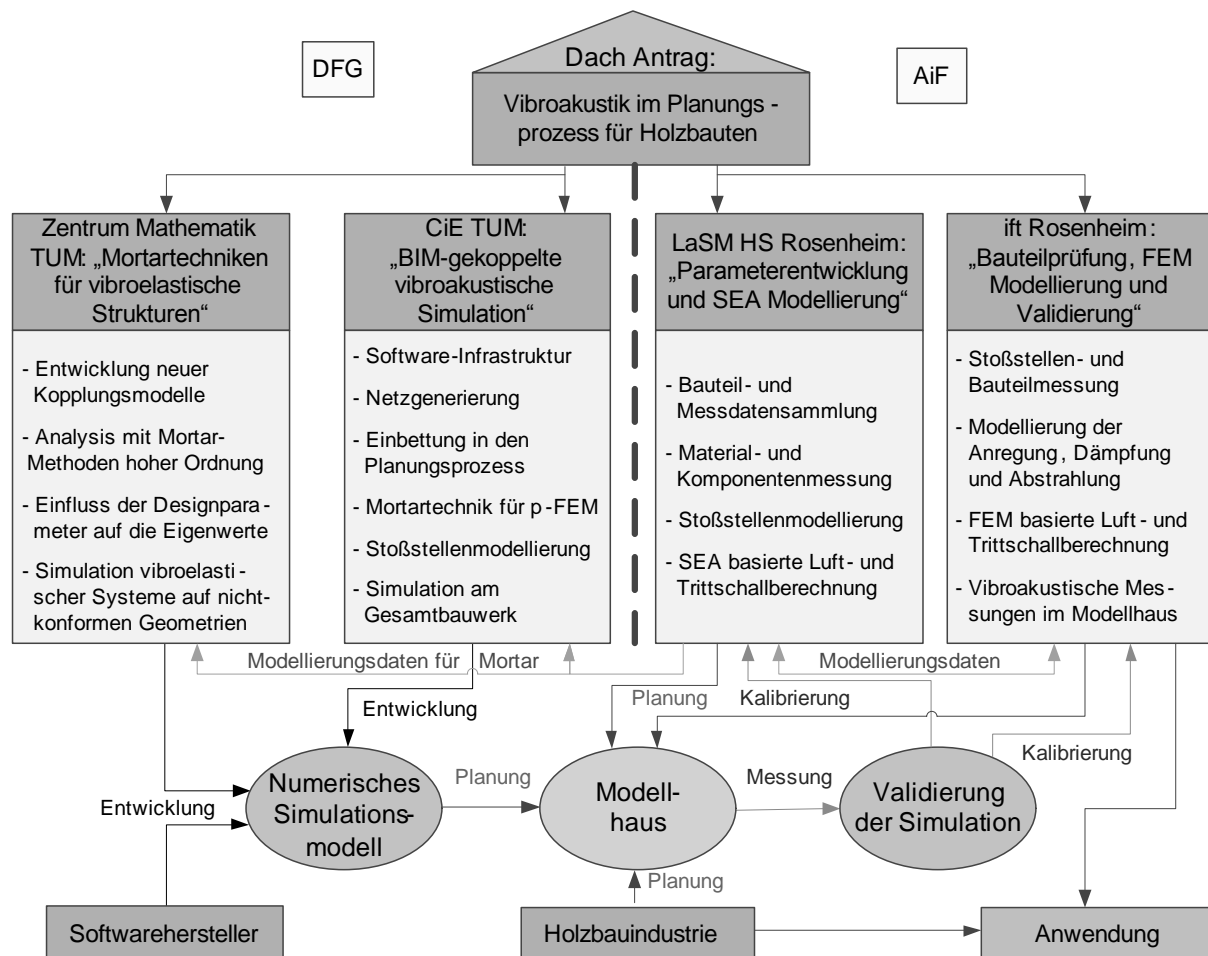


Abbildung 3: Die Aufgabenverteilung der Projektpartner im Gesamtprojekt

3.1. Material- Bauteil- und Stoßstellenmessung

Die geplanten Material- Bauteil- und Stoßstellenmessungen an Massivholzbauteilen dienen als Eingangsgrößen für die Luft- und Trittschallberechnung anhand der FEM und SEA-Methode sowie der vereinfachten Prognose nach DIN EN 12354. Die Festlegung der zu prüfenden Bauteile und Stoßstellen erfolgt anhand der Datensätze vorausgegangener Arbeiten [5], [6], [7], [8]. Zur Durchführung der Stoßstellenmessungen in Leichtbaukonstruktionen wurden in vorausgegangenen Projekten die Grundlagen geschaffen [9], [10], [11]. Hierbei wurde insbesondere die für den Holzbau typischen Schwierigkeiten bei der Messung nach DIN EN ISO 10848 wie z.B. die Berücksichtigung des vielschichtigen Bauteilaufbaus und die geringe Körperschalldiffusität untersucht [9]. Für die Anwendung des Berechnungsmodells auf die in diesem Projekt zu untersuchenden Massivholzbauteile

ist insbesondere die Körperschallausbreitung (Ausbreitungsdämpfung) im Element bei unterschiedlicher Fertigung (Verdübelung, Vernagelung, Verleimung) und die Ausführung der Stoßstelle differenzierter zu untersuchen.

3.2. Anwendung der der SEA und der FEM auf die Luft- und Trittschallberechnung

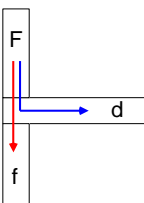
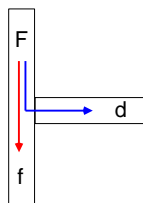
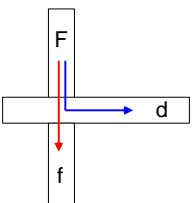
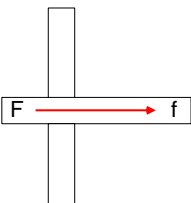
Die Schallübertragung am Bau kann nach dem Ansatz der auf der SEA Methode basierenden Berechnung nach EN 12354 aus der energetischen Summe der einzelnen Übertragungswege berechnet werden. Für die Berechnung der Luft-Schalldämmung nach (1) sind hierzu die Flankendämm-Maße R_{ij} erforderlich. Diese können entweder messtechnisch bestimmt werden, oder nach (2) aus dem Stoßstellendämm-Maß K_{ij} berechnet werden.

$$R'_w = -10 \log(10^{-0,1R_w} + \sum_{ij} 10^{-0,1R_{ij,w}}) \quad \text{dB} \quad (1)$$

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log\left(\frac{S_{\text{Bau}}}{S_{\text{Ij0}}}\right) \quad \text{dB} \quad (2)$$

Eine Anwendbarkeit der Prognosemodelle auf die in diesem Projekt im Fokus stehende Massivholzbauweise ist auf Grund einer nicht ausreichenden Datenbasis für die noch recht junge Bauweise nur sehr beschränkt möglich. Einige Planungswerte für die Stoßstellendämm-Maße konnten in Zusammenarbeit mit der Hochschule Rosenheim und der Holzforschung Austria ermittelt und zusammengestellt werden [6],[11],[7],[2]. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt. Erste Anwendungen der Prognose nach EN12354 in der Baubegleitung und Nachweisführung zeigten recht vielversprechende Ergebnisse [3],[1]. Eine detaillierte Anwendung der SEA Methode kann gegenüber dem stark vereinfachten Ansatz nach DIN EN 12354 eine weitere Genauigkeitssteigerung erbringen.

Tabelle 1: Übersicht vorhandener Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für Massivholzelemente [2]

Systemgeometrie		T-Stoß		Kreuz-Stoß	
					
K_{FF}	Messwert	23 dB, [6]	5 dB, [11]	22 dB, [11]	7 dB, [11]
	Berechnung	9 dB	9 dB	13 dB	13 dB
K_{Fd}	Messwert	13 - 15 dB, [7], [6]	15 dB, [11]	16 dB, [11]	
	Berechnung	6 dB	6 dB	9 dB	

Die Anwendung der SEA-Methode setzt jedoch eine genügend hohe Eigenmodendichte im Bauteil und im Raum voraus. Diese Voraussetzung ist bei üblichen Bauteilabmessungen und Raumgrößen für tiefe Frequenzen nicht gegeben. Der typische Anwendungsbereich der SEA liegt deshalb deutlich über 100 Hz. Untersuchungen zum subjektiven Empfinden der Trittschallübertragung bei Holzdecken zeigten jedoch, dass die tiefen Frequenzen bei der Trittschallübertragung eine maßgebende Rolle spielen [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Für die computergestützte Simulation der Schallübertragung von Deckenkonstruktionen ist es deshalb sinnvoll ergänzende Berechnungsmodelle zu verwenden, die genügend genaue Ergebnisse bei geringer Eigenmodendichte ermöglichen. Hier bietet sich die Verwendung von modalen Methoden an, die eine Berechnung der Schwingungsschnelle oder des Schalldrucks aus den Eigenmoden des Bauteils und des Raum ermöglichen. Bei einfachen Bauteilen und Raumgeometrien können analytische Ansätze für die Eigenmoden verwendet werden (z.B. [20]). Kann ein Bauteil auf Grund seines Aufbaus oder seiner Randbedingungen mit analytischen Ansätzen nicht befriedigend beschrieben werden, wird häufig die FEM zur Berechnung der Eigenmoden angewendet

[21], [22], [23]. Bauakustische Anwendungen der FEM zur Berechnung der Luftschalldämmung von Wänden erfolgten z.B in [24],[25]; zur Berechnung der Trittschalldämmung und Optimierung von Deckenkonstruktionen in [28],[4].

3.3. Baumessung zur Validierung der Modelle

Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Berechnungsmodelle sollen im Projekt durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen validiert werden. Hierzu sind zunächst für die Luft- und Trittschallberechnung die Ergebnisse mit Messwerten verschiedener Bauteile unter Laborbedingungen ohne Nebenwege zur vergleichen. Im zweiten Schritt kann die Validierung anhand von Baumessungen (inkl. Nebenwege) erfolgen.

Für die Trittschallübertragung von Decken wurde die Validierung des Berechnungsmodells bereits in [4] durchgeführt. Die FE-Berechnung sowie die Modal- und Spektralanalyse erfolgte in AdhoC [30]. Die ermittelten Berechnungsergebnisse wurden mit Messergebnissen von 25 verschiedenen Deckenaufbauten aus der Datenbank des ift Rosenheim verglichen. Die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens wurde auf Basis dieser Validierung als ausreichend eingestuft, um eine numerische Optimierung von Holzdecken durchführen zu können. Für den Nachweis der Eignung der optimierten Konstruktionen wurde eine zusätzliche messtechnische Überprüfung vorgesehen.

4. Zusammenfassung

Der vibroakustische Planungsprozess von Mehrgeschossern in Massivholzbauweise kann durch geeignete computergestützte Planungswerkzeuge und eine gesicherte Datenbasis deutlich vereinfacht und beschleunigt werden. Für die bauakustische Planung wird hierzu im vorgestellten Projekt eine Berechnung anhand der Methode der Statistischen-Energie-Analyse in Kombination mit der Erweiterung vorhandener Finite-Elemente-Verfahren angestrebt. Dies ermöglicht dem Fachplaner einen optimierten Entwurf einzelner Bauteile und die Untersuchung der vibroakustischen Eigenschaften des Gesamtgebäudes bereits im frühen Planungsentwurf. Hierdurch wird es möglich den Planungsaufwand nicht nur drastisch zu reduzieren, sondern auch zuverlässiger zu machen, die Qualität entscheidend zu erhöhen und damit die Wettbewerbsfähigkeit von Holzbauten zu fördern.

5. Danksagung

Der Autor bedankt sich für die hilfreichen Diskussionen und die Zusammenarbeit besonders bei den Projektpartnern Prof. Wohlmuth (M2 - Zentrum Mathematik, TU München), Prof. Rank (Lehrstuhl für Computation in Engineering, TU München), Prof. Schanda (Fakultät für angewandte Natur und Geisteswissenschaften, HS Rosenheim). Sowie für die finanzielle Unterstützung durch die AiF und die DFG.

6. Literatur

- [1] A., Rabold: Schalltechnische Lösungen für Massivholzelemente in der Geschossbauweise, Tagungsband 4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz, 2011
- [2] M. Schramm, F. Dolezal, A. Rabold, U. Schanda: Stoßstellen im Holzbau – Planung, Prognose und Ausführung, Tagungsband DAGA 2010.
- [3] Vier- und acht-geschossige Wohn- und Bürogebäude in Massivholzbauweise. Standort Bad Aibling, Bauherr B&O Wohnungswirtschaft GmbH, Planung Architekturbüro Schankula und bauart Konstruktions GmbH, schalltechnische Begleitung ift Rosenheim
- [4] A. Rabold: Anwendung der Finite Element Methode auf die Trittschallberechnung. Dissertation, Technische Universität München, 2010.

- [5] Scholl, W., Bietz, H., Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109, Forschungsbericht, PTB Braunschweig, 2004
- [6] 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
- [7] Dolezal, F., Bednar, T., Teibinger, M., Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen, Teil 1, Bauphysik 2008, 30, 143-151
- [8] Furrer, B., Schmid, M., Weber, H., Müller, A., Starck, C., Schallschutz im Holzbau, Kooperationsprojekt Lignum Holzwirtschaft Schweiz Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, 2008
- [9] Schumacher, R., Pütz, M., Saß, B., Grundlagenuntersuchung zum Stoßstellendämm-Maß im Holzbau, Forschungsbericht des ift Rosenheim, 2001
- [10] Schumacher, R., Pütz, M., Saß, B., Schalllängsdämmung im Mehrgeschoss-Holzbau, DGfH-Forschungsbericht des ift Rosenheim, 2002
- [11] Schramm, M., Vertikale Flankenübertragung bei Holzmassivdecken, Diplomarbeit Fachbereich Holztechnik, HS Rosenheim 2008
- [12] Hveem, S., Homb, A., Haagberg, K., Rindel, J. H., Low-frequency foot-fall noise in multi-storey timber frame buildings, NKB report 1996:12 E
- [13] Warnock, A.C.C., "Low-frequency impact sound transmission through floor systems", InterNoise, 2000
- [14] Burkhart, C., Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, mögliche Ursachen, Tagungsband DAGA 2002
- [15] Rasmussen, B., Rindel, J. H., Sound insulation of dwellings – Legal requirements in Europe and subjective evaluation of acoustical comfort. Proceedings of DAGA, 2003, 118–121
- [16] Kühn, B., Blicke R., Trittschalldämmung und Gehgeräusche-Immission von Geschossdecken aus Holz, WKSB, 2004, 52
- [17] Lang, J., Schallschutz im Wohnungsbau, Forschungsbericht ifip TU Wien, 2006
- [18] Rabold, A., Trittschalldämmung richtig bewerten, Tagungsband 1. Internationale Schall- und Akustiktage, Bad Wörishofen, 2011
- [19] Rabold, A., Schanda, U., Hessinger, J., Korrelation zwischen Geher und Norm-Hammerwerk bei der Trittschallübertragung, Tagungsband DAGA, 2011
- [20] Jean, P., Rondeau, J.F., A simple decoupled modal calculation of sound transmission between volumes", Acta Acustica, 2002, 88, 924 – 933
- [21] Petyt, M., Lim, S. P., Finite element analysis of the noise inside a mechanically excited cylinder", International Journal for Numerical Methods in Engineering 13, 109-122, 1978.
- [22] Goransson P and Davidsson F (1987) A three dimensional infinite element for wave propagation. J. Sound and Vibration, 115(3), 556-559.
- [23] Dhainaut, M., Finite element procedures for fluid-structure interactions in acoustics", doctoral thesis, University of Science and Technology Trondheim, 1996
- [24] Ackermann, L., Simulation der Schalltransmission durch Wände, Dissertation am Institut für Angewandte Mechanik, TU Braunschweig, 2001
- [25] Davidsson, P., Structure-acoustic analysis; finite element modelling and reduction methods", Doctoral Thesis, Division of Structural Mechanics, Lund

- University, Sweden, 2004, ISBN 91-628-6176-X
- [26] Rabold, A., Düster, A., Rank, E., FEM based prediction model for the impact sound level of floors, Conference proceedings EURONOISE 2008.
 - [27] Rabold, A., Düster, A., Hessinger, J., Rank, E., Optimization of lightweight floors in the low frequency range with a FEM based prediction model, Tagungsband DAGA 2009.
 - [28] Rabold, A. ; Rank, E.: Anwendung der Finiten Elemente Methode auf die Trittschallberechnung, Teilbericht zum Forschungsvorhaben: Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen von Holzdecken und Deckenauflage zur Entwicklung neuartiger Schallschutzmaßnahmen/ Lehrstuhl für Computation in Engineering , TU München. 2009. – Forschungsbericht
 - [29] Rabold, A., Anwendung der Finite Element Methode auf die Trittschallberechnung. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
 - [30] Düster, A. ; Bröker, H. ; Heidkamp, H. ; Heißerer, U. ; Kollmannsberger, S. ; Krause, R. ; Muthler, A. ; Niggel, A. ; Nübel, V. ; Rücker, M. ; Scholz, D., AdhoC 4 – User’s Guide. Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München, 2004