

Gebrauchstauglichkeit und Komfort von dynamisch beanspruchten Holztragwerken im urbanen mehrgeschossigen Hochbau

- Schlussbericht AZ: 34548/01-25 -

Hannover, im März 2024



Projektleitung: Herr Henning Klattenhoff, Assmann Beraten + Planen GmbH

Projektbearbeitung: Frau Tanja Grießmann, Institut für Statik und Dynamik

Herr Benedikt Hofmeister, Institut für Statik und Dynamik

Frau Silke Appel, Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Herr Maximilian Breitzkreuz, Lehr- und Forschungsbereich
Mechanik/Dynamik

Herr Yannick Plüss, Institut für Baukonstruktion und Holzbau



Bewilligungsempfänger: Assmann Beraten + Planen GmbH (ABP)

Kooperationspartner: Leibniz Universität Hannover (LUH)

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK)

Technische Universität Braunschweig (TUB)

Geotechnik und Dynamik Consult GmbH (GuD)

Förderung durch die Bundesstiftung Umwelt



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungen	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	6
Danksagung	7
Zusammenfassung	9
1 Einleitung.....	10
2 Dynamische Untersuchungen an Bestandsgebäuden.....	14
3 Experimentelle Untersuchungen im Teststand	32
4 Konzept zur ingenieurpraktischen Umsetzung	51
5 Fazit.....	52
6 Literaturverzeichnis	53
7 Anhang: Detaillierte Darstellung der Teststandkonfigurationen.....	54

Abkürzungen

ABP	Assmann Beraten + Planen GmbH
AP	Arbeitspaket
BSP	Brettsperrholz
EMA	Experimental Modal Analysis
FDD	Frequency Domain Decomposition
FE	Finite Elemente
GuD	Geotechnik und Dynamik Consult GmbH
HTWK	Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
iBHolz	Institut für Baukonstruktion und Holzbau
KB_{Fmax}	Maximale bewertete Schwingstärke
LUH	Leibniz Universität Hannover
OMA	Operational Modal Analysis
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis
SSI	Stochastic Subspace Identification
TUB	Technische Universität Braunschweig
ÜF	Übertragungsfunktion

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ZUNAHME DER HOLZBAUPROJEKTE IN DEUTSCHLAND SEIT 2020 UND PROGNOSE BIS 2028	10
ABBILDUNG 2: INHALTLICHE SCHWERPUNKTE UND ZUSAMMENSPIEL DER ARBEITSPAKETE	13
ABBILDUNG 3: MESSOBJEKT A, HAMBURG, ALTER GÜTERBAHNHOF, PLAN A“ [3] © NEIL WINSTANLEY.....	15
ABBILDUNG 4: MESSOBJEKT B, BERLIN-WEDDING, LYNARSTRASSE, „BAUKÖRPER W“ [4], [5]	15
ABBILDUNG 5: MESSOBJEKT C, BERLIN-WEDDING, LINDOWER STRASSE [6], © JAN BITTER	16
ABBILDUNG 6: LINKS: ZENTRALE MESSSTATION MIT 32 MESSKANÄLEN; RECHTS: EINGESETZTES TRIAXIALES GEOPHON	17
ABBILDUNG 7: MESSSTELLEN UND MESSKANÄLE IM GEBÄUDEABSCHNITT W, MESSOBJEKT B.....	17
ABBILDUNG 8: (OBEN LINKS:) MAXIMALE SCHWINGGESCHWINDIGKEITEN AUS MESSUNG NR. 28 (S-BAHN); (RECHTS:) GEBÄUDESNITT MIT KENNZEICHNUNG DER AUF DER NORD-SEITE ÜBEREINANDER ANGEORDNETEN MESSKANÄLE NR.10, 30,16 UND 24 FÜR DIE VERTIKALE RICHTUNG, MESSOBJEKT B	18
ABBILDUNG 9: ÜF DER GESCHOSSDECKE IM 2. OG MIT DEN RESONANZSTELLEN; MESSOBJEKT B	19
ABBILDUNG 10: ÜF FÜR DIE VERTIKALE RICHTUNG; MESSOBJEKT B	20
ABBILDUNG 11: AUS KORRELATION UND DEN MESSUNGEN NR. 12, 16 UND 20 (S-BAHN) ERMITTELTE ÜF FÜR DIE VERTIKALE RICHTUNG: ÜF G_{15z} : BETONDECKE EG → GESCHOSSDECKE 5. OG; MESSOBJEKT B.....	21
ABBILDUNG 12: PROGNOSE DER VERTIKALEN DECKENSCHWINGUNG (KANAL 24) IM 5. OG (ZEITVERLAUF DER SCHWINGUNGSANTWORT UND KB_F -WERT) FÜR DIE MESSUNG NR. 16 MIT ÜF $G_{15z, M20}$; MESSOBJEKT B	21
ABBILDUNG 13: FOURIERSPEKTRUM DECKENFELD NORDSEITE – ANREGUNG AUS S-BAHNVERKEHR (MESSUNG 12), MESSSTELLE 16; MESSOBJEKT B.....	23
ABBILDUNG 14: FOURIERSPEKTRUM DECKENFELD SÜDSEITE – ANREGUNG AUS S-BAHNVERKEHR (MESSUNG 12), MESSSTELLE 12; MESSOBJEKT B.....	23
ABBILDUNG 15: GEBÄUDE-EIGENFORMEN UND -FREQUENZEN, IDENTIFIZIERT MIT FDD – LINKS: RÄUMLICHE EIGENFORM MIT DOMINANZ IN HORIZONTALER X-RICHTUNG (SENKRECHT ZUR BAHNTRASSE); RECHTS: MIT DOMINANZ IN HORIZONTALER Y- RICHTUNG (PARALLEL ZUR BAHNTRASSE); MESSOBJEKT B.....	24
ABBILDUNG 16: GEBÄUDE-EIGENFORMEN, -FREQUENZEN UND MODALE DÄMPFUNGEN, IDENTIFIZIERT MIT SSI; OBEN: REAL- UND IMAGINÄRTEIL VON MODE 1; UNTEN: REAL- UND IMAGINÄRTEIL VON MODE 2); MESSOBJEKT B	25
ABBILDUNG 17: MONTAGEPLANUNG BAUTEIL W, DECKE ÜBER 5. OG; MESSOBJEKT B	26
ABBILDUNG 18: AUFBAU DER BRETTSPERRHOLZDECKEN; MESSOBJEKT B	26
ABBILDUNG 19: GEOMETRISCHES MODELL DER GESCHOSSDECKE DES 5. OGS MIT EINGETRAGENEN UNTERZÜGEN UND BSP-PLATTEN; MESSOBJEKT B.....	27
ABBILDUNG 20: LINKS: KOPPLUNG ZWISCHEN BSP-PLATTEN MIT FEDERNDER LAGERUNG, WANDDETAIL NORDSEITE → MODELLIERUNG ALS EINSpanNUNG); MESSOBJEKT B	27
ABBILDUNG 21: ANGABEN ZUM FE-MODELL IN DER ÜBERSICHT; MESSOBJEKT B.....	28
ABBILDUNG 22: LINKS: 1. EIGENFORM DECKENFELD NORDSEITE BEI $F_0 = 32,47$ Hz; RECHTS: EIGENFORM DECKENFELD SÜDSEITE BEI $F_0 = 22,31$ Hz; MESSOBJEKT B.....	28
ABBILDUNG 23: 1. BIEGEEIGENFORM GESAMTGEBÄUDE; LINKS: MIT DOMINANZ IN X-RICHTUNG (SENKRECHT ZUR BAHNTRASSE) $F_0 =$ $2,6$ Hz; RECHTS: MIT DOMINANZ IN Y-RICHTUNG (PARALLEL ZUR BAHNTRASSE) $F_0 = 2,20$ Hz); MESSOBJEKT B	29
ABBILDUNG 24: AUSSCHNITT GESAMTGEBÄUDE; LINKS: MIT IN DER 1. EIGENFORM SCHWINGENDEN GESCHOSSDECKEN AUF DER SÜDSEITE BEI $22,31$ Hz; RECHTS: MIT IN DER 1. EIGENFORM SCHWINGENDEN GESCHOSSDECKEN AUF DER NORDSEITE BEI $32,47$ Hz; MESSOBJEKT B	29
ABBILDUNG 25: ABMESSUNGEN GEPLANTER TESTSTAND	34
ABBILDUNG 26: IM LABOR DER LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, INSTITUT FÜR STATIK UND DYNAMIK, REALISIRTER TESTSTAND, VARIANTE 7 BIS 10 (ZWEIGESCHOSSIG OHNE BODENAUFBAU)	34
ABBILDUNG 27: LINKS: ISD-SCHALTSCHRANK FÜR DIE MESSTECHNIK; RECHTS: EINGESETZTER MEAS-BESCHLEUNIGUNGSSENSOR...	36
ABBILDUNG 28: INSTRUMENTIERUNG AUF DER UNTERSEITE DER BSP MIT 30 BESCHLEUNIGUNGSSENSOREN	36
ABBILDUNG 29: VARIANTE 1A - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AM AUFLAGER, KOPPELBRETT UNVERNAGELT	37
ABBILDUNG 30: VARIANTE 4B – WINKELVERBINDUNG, DECKE MIT AKUSTIKLAGER (GELB) UNTEN, STUFENFALZ VERSCHRAUBT	37
ABBILDUNG 31: BODENAUFBAU FÜR DIE VARIANTEN 11, 12A, 12B	38
ABBILDUNG 32: VARIANTE 12B MIT TROCKENBAUWAND – SENSOREN AUF ESTRICH PLATZIERT.....	38

ABBILDUNG 33: ZEICHNERISCHE DARSTELLUNG DER REFERENZKONFIGURATION MIT AUFGELEGTER BSP-PLATTE UND EINGELEGTEM KOPPELBRETT (OHNE VERBINDUNG)	39
ABBILDUNG 34: MODALANALYSE MIT FE-ERGEBNISSE FÜR DIE ERSTEN VIER MODALFORMEN	40
ABBILDUNG 35: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 1 (REFERENZKONFIGURATION), UNVERSCHRAUBT,	40
ABBILDUNG 36: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 1A - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN, (ABSTAND 400 MM), KOPPELBRETT UNVERNAGELT	41
ABBILDUNG 37: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 1B - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN (ABSTAND 200 MM), KOPPELBRETT UNVERNAGELT	41
ABBILDUNG 38: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 1C - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN (ABSTAND 200 MM), KOPPELBRETT VERNAGELT	42
ABBILDUNG 39: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 4C - WINKELVERBINDUNG AN DEN AUFLAGERN, TEILVERNAGELT (ABSTAND 1000 MM), DECKE MIT AKUSTIKLAGER UNTEN, STUFENFALZ VERSCHRAUBT – GETZNER.....	43
ABBILDUNG 40: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 4C - WINKELVERBINDUNG AN DEN AUFLAGERN, TEILVERNAGELT (ABSTAND 1000 MM), DECKE MIT AKUSTIKLAGER UNTEN, STUFENFALZ VERSCHRAUBT – REGUPOL	43
ABBILDUNG 41: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 4C - WINKELVERBINDUNG AN DEN AUFLAGERN, TEILVERNAGELT (ABSTAND 1000 MM), DECKE MIT AKUSTIKLAGER UNTEN, STUFENFALZ VERSCHRAUBT – ROTHOBLAAS	43
ABBILDUNG 42: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 10 - OBEN KOPPELBRETT VERSCHRAUBT, UNTEN STUFENFALZ VERSCHRAUBT, DECKE-WAND-VERBINDUNG DURCH KREUZWEISE VERSCHRAUBUNG, AKUSTISCHE LAGER ÜBER UND UNTER DER DECKE	44
ABBILDUNG 43: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 11 - OBEN KOPPELBRETT VERSCHRAUBT, UNTEN STUFENFALZ VERSCHRAUBT, DECKE-WAND-VERBINDUNG DURCH KREUZWEISE VERSCHRAUBUNG, AKUSTISCHE LAGER ÜBER UND UNTER DER DECKE, BODENAUFBAUTEN - SENSOREN AUF BSP-PLATTE	45
ABBILDUNG 44: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 11 - OBEN KOPPELBRETT VERSCHRAUBT, UNTEN STUFENFALZ VERSCHRAUBT, DECKE-WAND-VERBINDUNG DURCH KREUZWEISE VERSCHRAUBUNG, AKUSTISCHE LAGER ÜBER UND UNTER DER DECKE, BODENAUFBAUTEN – SENSOREN AUF ESTRICH	45
ABBILDUNG 45: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 5 - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN (ABSTAND 200 MM), STUFENFALZ VERSCHRAUBT, ZUSÄTZLICHE NICHT VERSCHRAUBTE DRITTE WAND UM 20° GEDREHT	46
ABBILDUNG 46: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 6 - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN (ABSTAND 200 MM), STUFENFALZ VERSCHRAUBT, ZUSÄTZLICHE NICHT VERSCHRAUBTE DRITTE WAND.....	46
ABBILDUNG 47: SINGULÄRWERTVERLAUF FÜR VARIANTE 6 - DIREKTE VERSCHRAUBUNG AN DEN AUFLAGERN (ABSTAND 200 MM), STUFENFALZ VERSCHRAUBT, ZUSÄTZLICHE VERSCHRAUBTE DRITTE WAND	47
ABBILDUNG 48: IDENTIFIZIERTE MODALE DÄMPFUNGEN DER VARIANTEN 6 BIS 12B	48

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: MESSOBJEKTE AUS ARBEITSPAKET 1 IN DER ÜBERSICHT.....	14
TABELLE 2: MAXIMALE VERTIKALE SCHWINGGESCHWINDIGKEITEN UND $KB_{F_{MAX}}$ -WERTE	19
TABELLE 3: MESSOBJEKTE AUS ARBEITSPAKET 1 – ERSTE BIEGEEIGENFREQUENZEN DER GESCHOSSDECKEN.....	24
TABELLE 4: VERGLEICH DER EIGENFREQUENZEN AUS MESSUNGEN UND AUS FE-MODELLIERUNG; MESSOBJEKT B.....	30
TABELLE 5: TESTSTAND – BESCHREIBUNG DER AUFBAUVARIANTEN.....	35
TABELLE 6: VERGLEICH DER EIGENFREQUENZEN AUS MESSUNGEN UND AUS FE-MODELLIERUNG; TESTSTAND.....	41
TABELLE 7: EINFLUSS VON ZWISCHENWÄNDEN BEIM EINGESCHOSSIGEN AUFBAU.....	46
TABELLE 8: MITTELWERTE FÜR LEHRSCHE DÄMPFUNGSMAßE.....	48

Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen Projektpartnern für die sehr gute und engagierte Zusammenarbeit im Vorhaben herzlich bedanken. Durch das Engagement von Assmann Beraten + Planen GmbH und der Geotechnik und Dynamik Consult GmbH konnten Messungen in modernen, neu errichteten Gebäuden in moderner Holzbauweise durchgeführt werden.

Auf der wissenschaftlichen Seite wurde das Projekt unter der Federführung des Instituts für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover in Zusammenarbeit mit dem IBHolz der TU Braunschweig und dem Lehr- und Forschungsbereich Mechanik/Dynamik der HTWK Leipzig bearbeitet.

Eine Reihe von Firmen hat uns finanziell und mit Materiallieferungen unterstützt. Dadurch war es möglich, den Teststand an der Leibniz Universität aufzubauen. Zu nennen sind hier:



Stora Enso für die Bereitstellung von Brettsperrholzelementen,



Rothoblaas für die Bereitstellung einer Vielzahl von Verbindungsmitteln, Akustikwinkeln und akustischen Elastomerlagern,



Getzner Werkstoffe für die finanzielle Unterstützung und das Bereitstellen von akustischen Elastomerlagern,



Regupol Acoustics für die finanzielle Unterstützung und das Bereitstellen von akustischen Elastomerlagern,



Derix für die finanzielle Unterstützung,



Ingenieurbüro Köhnke für die Bereitstellung von Splittbinder und



Könecke Holzbau für die handwerkliche Begleitung und Logistik.

Abschließend ist es allen Projektpartnern ein großes Anliegen, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die großzügige finanzielle Förderung unseres Forschungsvorhabens zu danken. In Person danken wir Frau Sabine Djahanschah und Frau Anja Lehmann für die konstruktive und unbürokratische Unterstützung und Begleitung in allen Projektphasen, insbesondere im 3. Projektjahr, das in die Zeit der Corona-Pandemie fiel und zu deutlichen Verzögerungen bei der Durchführung der Laborversuche führte. Aufgrund der von der DBU gewährten Projektzeitverlängerung, konnten wir alle geplanten Arbeiten in vollem Umfang umsetzen.

Hannover und Hamburg, März 2024

Tanja Grießmann und Henning Klattenhoff

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben hatte zum Ziel, eine Methodik zu entwickeln, um die Gebrauchstauglichkeit und den Komfort von Gebäuden in Brettsperrholzbauweise sowohl bei Neubauten als auch bei Bestandsbauwerken zu bewerten. Hierfür wurden die durch dynamische Lasten verursachten Vertikal- und Horizontalschwingungen der Brettsperrholzdecken und des gesamten Gebäudes mit den Methoden der betrieblichen Modalanalyse analysiert und bewertet. Die Forschung umfasste die Auswahl repräsentativer Gebäude im Wohnungsbau, die Messdatenerfassung und -auswertung, die Entwicklung von Berechnungsmodellen und den Aufbau eines Modell-Teststandes für weitergehende Untersuchungen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass BSP-Decken bei niedrigeren Gebäuden ausreichend hohe Biegeeigenfrequenzen aufweisen, aber bei höheren Gebäuden mit mehr Vollgeschossen eine zunehmende Schwingungsproblematik auftreten könnte.

Die Modellierung mittels Finite-Elemente-Methoden erwies sich als nützlich, insbesondere wegen der Möglichkeit das Schwingungsverhalten im Vorfeld einer Baumaßnahme zu prognostizieren. Der zusammen mit Assmann Beraten + Planen entwickelte und an der Leibniz Universität Hannover aufgebaute Versuchsstand kann bezüglich seiner Abmessungen und seinem Schwingungsverhalten als Modellversuchsstand dienen, um ähnliche Versuche zu wiederholen.

Das Konzept eines elastisch gebundenen Bodenaufbaus auf BSP-Decken erhöht die Dämpfung und mindert Resonanzeffekte. Zukünftige Arbeiten sollten verschiedene Bodenaufbauvarianten untersuchen und alternative Auswertemethoden für die Dämpfung in Betracht ziehen.

Über das Forschungsdatenrepositorium der Leibniz Universität Hannover werden Projektergebnisse und Rohdaten in digitaler Form bereitgestellt und zum Download angeboten. Dabei wird ein Datenablagekonzept genutzt, das den FAIR-Prinzipien der LUH entspricht. So wird interessierten Anwendern und Forschergruppen die Möglichkeit geboten, die aufgezeichneten Rohdaten mit eigenen Methoden auszuwerten und weitere relevante Erkenntnisse aus den Daten abzuleiten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation mit Stand der Technik

Sowohl beim Neu- als auch beim Ausbau und der Sanierung von Altbauten erfreut sich die moderne Holzbauweise wegen ihrer guten Ökobilanz und günstigen Verarbeitbarkeit zunehmender Beliebtheit, sodass, bei stetig steigender Nachfrage, 2022 im Wohnungsneubau 21,3 % der Gebäude in Holz genehmigt wurden [1]. Hinzu kommt ein klarer Trend zum mehr- und vielgeschossigen Bauen, der auf eine Verbreitung der Holzbauweise bis in dicht besiedelte urbane Bereiche zielt. Es ist damit zu rechnen, dass sich die Fertigstellungen von Holzgebäuden, bezogen auf die erstellte Gebäudefläche, zwischen 2020 und 2024 knapp verzehnfachen wird, wobei dieser Faktor für die A-Städte noch deutlich höher liegen dürfte [2], (Abbildung 1). Dies gilt insbesondere für die großen Metropolen. Die Erschließung dieser Bereiche, die aktuell noch durch die klassische Massivbauweise in Stahlbeton und Mauerwerk dominiert sind, ist Voraussetzung zum Erreichen der ehrgeizigen Klimaziele der Bundesregierung.

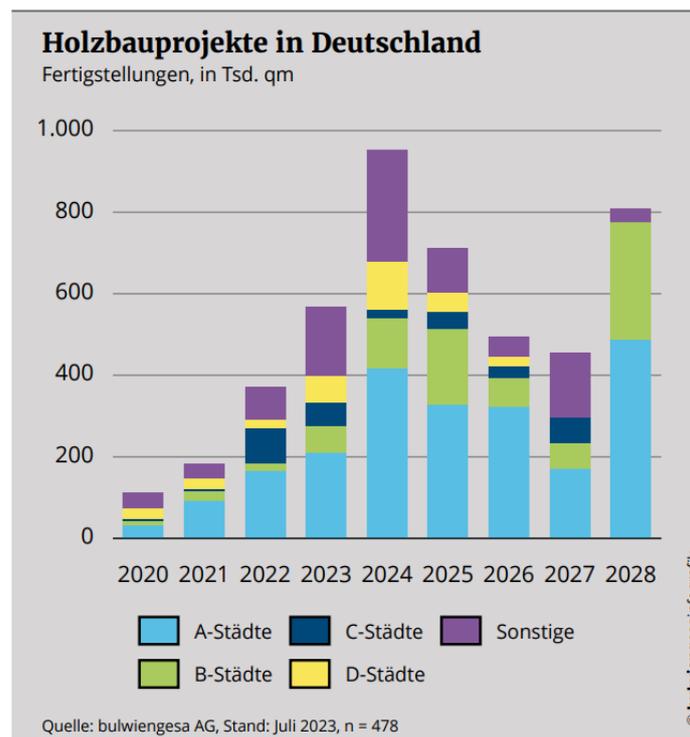


Abbildung 1: Zunahme der Holzbauprojekte in Deutschland seit 2020 und Prognose bis 2028

Auf der technischen Seite haben neue, innovative Holzbauprodukte, allen voran das hoch belastbare Brettsperrholz (BSP), und moderne Verbindungstechniken den Weg für mehrgeschossige Gebäude, deren Tragwerke mit Ausnahme der Gründung und Untergeschosse komplett in Holz errichtet werden können, geebnet, wodurch ganz neue Möglichkeiten für das Bauen mit Holz im urbanen Umfeld entstanden sind. Insbesondere wurden in den letzten zehn Jahren etliche Gebäude der Gebäudeklasse

5 (bis ca. 25 m Höhe) gebaut und der Trend setzt sich spektakulär fort: Derzeit befinden sich gleich mehrere Holzhochhäuser bis zu 65 Meter in der Bauphase. Etliche weitere sind in der Projektentwicklung und -planung. Auch Investoren im europäischen Ausland haben die Scheu vor dem Holzbau längst verloren: In Wien ist ein Holzbau mit 24 Geschossen fertig gestellt, in den Niederlanden, Großbritannien, Frankreich und Skandinavien sind etliche 15 bis 21-geschossige Holzgebäude in Nutzung.

1.2 Zielsetzung

Zum Start des Forschungsvorhabens im Jahr 2018 konnte festgehalten werden, dass für die Fälle

- von außen einwirkender dynamischer Lasten auf das Gesamtsystem des Gebäudes,
- von außen oder durch dynamische Lasten innerhalb des Gebäudes vertikal oder horizontal angeregter Geschossdecken,
- multifunktionaler Nutzung mit planmäßig auftretenden dynamischen Lasten innerhalb des Gebäudes

und bei

- hohen Komfortanforderungen, wie zum Beispiel bei Laboren, Forschungsinstituten und Krankenhäusern

derzeit keine technischen Empfehlungen oder Normen existieren, anhand derer der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für Gebäude, die komplett in moderner Holzbauweise errichtet werden, erfolgen kann. Daraus resultiert ein erhebliches Mangelpotential, dem beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit entweder mit einer sehr konservativen Auslegung oder durch die Wahl der Bauweise in Stahlbeton begegnet wird.

Das Vorhaben hatte sich daher zum Ziel gesetzt, eine Methodik zu erarbeiten, die sowohl für die Planungsphase im Falle eines Neubaus als auch für Betrachtungen von Bestandsbauwerken den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sowie eine qualifizierte Komfortbewertung ermöglicht. Dazu wurden durch dynamische Lasten induzierte Vertikal- und Horizontalschwingungen des gesamten Gebäudes und der Geschossdecken analysiert und bewertet.

In Bezug auf die Deckenschwingungen waren verschiedene Varianten in Holzbauweise Gegenstand der Untersuchungen.

Das Forschungsprojekt verfolgte die folgenden Teilziele:

- Auswahl repräsentativer Gebäude mit Anregung aus Verkehrslasten,
- Bereitstellen einer Messdatenbasis für die Systemidentifikation, Parameterschätzung, Schwingungsprognose und Komfortbewertung für Erschütterungen, die von außen auf das Gebäude einwirken,
- Bereitstellen einer Messdatenbasis für die Systemidentifikation, Parameterschätzung, Schwingungsprognose und Komfortbewertung bei multifunktionaler Nutzung und hohen Anforderungen an den Komfort,

-
- Berechnung messdatenbasierter Modelle für Gesamtgebäude und Teilsysteme,
 - Ermittlung von Übertragungsfunktionen zwischen Baugrund und Decke,
 - Identifikation globaler und lokaler Steifigkeits- und Dämpfungsparameter für Finite Elemente (FE-)Modelle,
 - Entwicklung parametrierter FE-Modelle für die Modellanpassung, Schwingungsprognose und Komfortbewertung,
 - Aufbau eines Teststandes und Entwurf eines Versuchskonzepts sowie die Planung und Durchführung von Schwingungsmessungen an verschiedenen Versuchsaufbauten,
 - Ermittlung relevanter Systemparameter anhand der Messungen an den verschiedenen Teststand-Varianten,
 - Bereitstellung einer Datenplattform mit Projektergebnissen und Rohdaten für ingenieurpraktische Aufgabenstellungen.

1.3 Arbeitsplanung

Das Gesamtprojekt wurde von ABP, die wissenschaftlichen Arbeiten von der LUH koordiniert.

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in fünf wissenschaftlich-technische Arbeitspakete, die in Abbildung 2 bezüglich ihrer Inhalte und Interaktionen dargestellt sind. Gegenstand der Arbeitspakete 1 und 2 waren experimentelle Untersuchungen. In Arbeitspaket 1 fanden diese in Bestandsgebäuden statt, in Arbeitspaket 2 an einem eigens für das Forschungsvorhaben aufgebautem großmaßstäblichen Versuchstand. Das Ziel dieser Arbeitspakete war es, relevante Messdaten aufzunehmen und diese so mit Methoden der Datenvorverarbeitung aufzubereiten, dass aus ihnen die dynamischen Eigenschaften der schwingenden Decken und Gebäude in den methodischen Arbeitspaketen 3 und 4 ermittelt werden konnten.

Im abschließenden Arbeitspaket 5 wurden technische Empfehlungen für Rechenmodelle und die Gebrauchstauglichkeit- und Komfortbewertung gegeben. Zusätzlich ist geplant, Projektergebnisse und ausgewählte Rohdaten im Forschungsdatenrepositorium der Leibniz Universität Hannover zu veröffentlichen.

1.4 Gliederung des Berichts

Gegenstand von Kapitel 2 sind die Messungen in Gebäuden. Als Beispielobjekt dient in diesem Bericht das Wohngebäude in Berlin, Wedding, Lynarstr. (Objekt B). Der Inhalt von Kapitel 2.1 sind die datenbasierten Methoden zur Analyse der dynamischen Eigenschaften. Dazu werden zunächst die durchgeführten Schwingungsmessungen beschrieben (2.1.1). Direkt aus den Messdaten werden KB-Werte und Übertragungsfunktionen bestimmt (2.1.2). In Kapitel 2.1.3 werden Methoden der betrieblichen Modalanalyse angewendet und modale Parameter für Geschosdecken und Gebäude berechnet. Für das Objekt B wird anschließend in Kapitel 2.2 eine FE-Analyse vorgenommen – mit Beschreibung der FE-Modelle für Geschosdecken und für das Gesamtgebäude (2.2.1) und den darauf aufbauenden Modalanalysen (2.2.2).

Abschließend werden alle Ergebnisse aus Kapitel 2 zusammengefasst. Kapitel 3 widmet sich den experimentellen Untersuchungen im Teststand des ISD. Dazu werden zunächst Zielsetzung (3.1), Aufbau des Teststandes (3.2) und Messkonzept (3.3) beschrieben und anschließend Modalanalysen (3.3) durchgeführt. Die Ergebnisse für Eigenfrequenzen (3.3.1) und Dämpfungen (3.3.2) werden ausführlich dokumentiert und alle Erkenntnisse aus den Untersuchungen am Teststand in Abschnitt 3.4 zusammengefasst. Kapitel 4 beschreibt die Datenplattform für Projektergebnisse und Rohdaten. In Kapitel 5 wird ein Fazit aus den durchgeführten Arbeiten gezogen und auf zukünftige Arbeiten ausgeblickt.

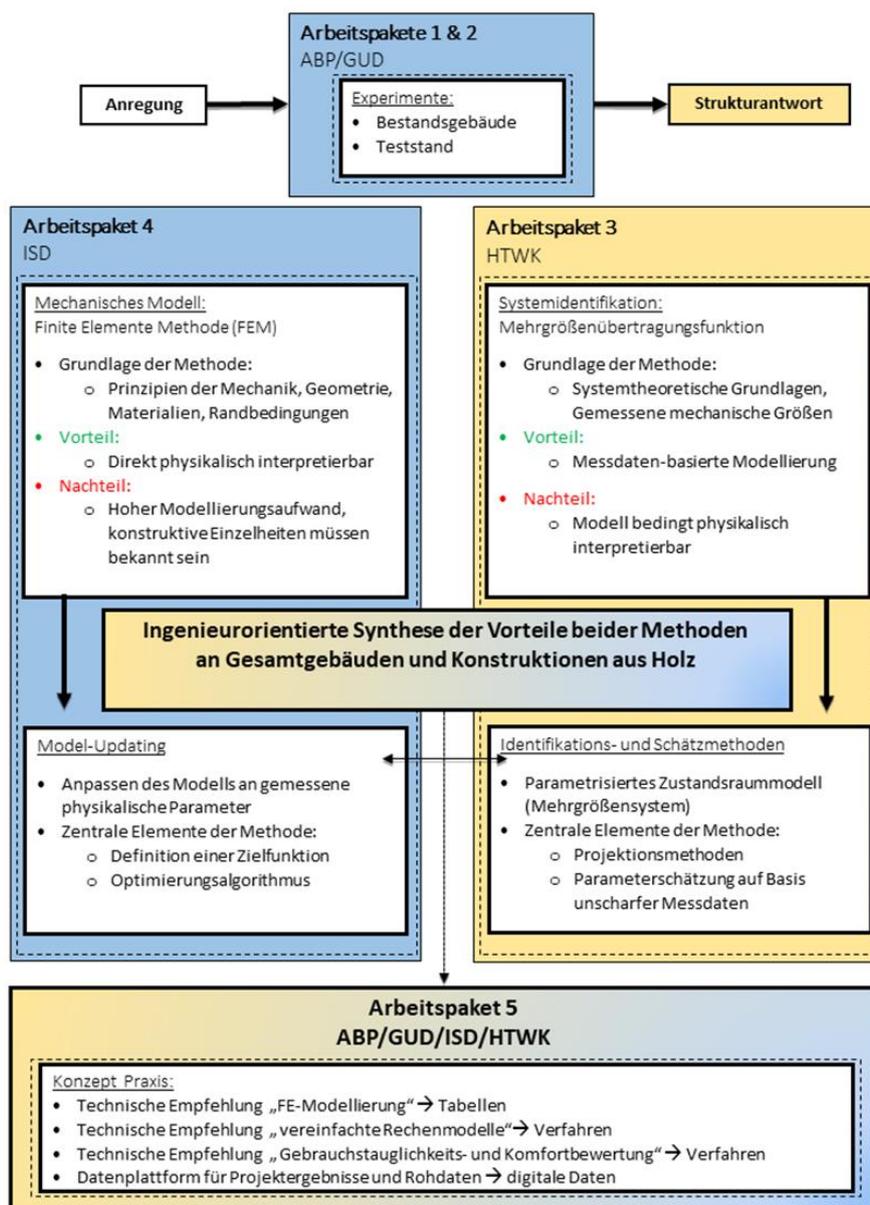


Abbildung 2: Inhaltliche Schwerpunkte und Zusammenspiel der Arbeitspakete

2 Dynamische Untersuchungen an Bestandsgebäuden

Zur Lösung des Erschütterungsproblems bei von außen einwirkenden Lasten war die Planung und Durchführung von Schwingungsmessungen in ausgewählten mehrstöckigen Gebäuden in Holzbauweise Gegenstand von AP 1. Die Gebäude sind Verkehrserschütterungen infolge von Schienen- und Straßenverkehr ausgesetzt. Kennzeichnend für diese Messaufgabe ist, dass eine Vielzahl von Unsicherheiten bezüglich Materialeigenschaften, Geometrie, Randbedingungen etc. existieren. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die von außen einwirkenden dynamischen Verkehrslasten aufgrund ihrer Ortsveränderlichkeit und Komplexität nicht direkt gemessen werden können. Stattdessen wird nur ihre Auswirkung auf die Dynamik des Gebäudes indirekt über gemessene Schwinggeschwindigkeiten und Beschleunigungen im Baugrund, auf dem Freifeld, an den Fundamenten, an Wänden und auf Decken erfasst. Das dynamische Verhalten der Gebäude muss vollständig aus gemessenen Antwortzeitverläufen erschlossen werden. Letztere müssen von ausreichender Qualität sein und insbesondere ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) aufweisen.

Als Ergebnis von AP 1 wurden gemessene Schwinggeschwindigkeitszeitverläufe für die Systemidentifikation, Parameterschätzung, Schwingungsprognose und Komfortbewertung aufgenommen. Damit konnten in AP 3 und 4 Methoden der betrieblichen Modalanalyse mit nichtparametrischen und parametrischen Verfahren der Systemidentifikation angewendet werden. Ebenso erfolgte die Berechnung der Übertragungsfunktionen in der Kette Baugrund → Fundament → Wände → Decke. Voruntersuchungen wurden in einer ersten Messkampagne in Hamburg-Barmbek an einem viergeschossigen Gebäude durchgeführt. Für ausführliche Analysen wurden zwei mehrgeschossige Wohngebäude in Berlin-Wedding ausgewählt, die für Messungen zugänglich waren. Tabelle 1 zeigt die Messobjekte des Forschungsvorhabens in der Übersicht.

Tabelle 1: Messobjekte aus Arbeitspaket 1 in der Übersicht

Nr.	Lage	Nutzungsart, Geschosszahl	Bauweise
A	Hamburg, Alter Güterbahnhof, „Plan A“	Wohngebäude, 4	Geschossdecken: Brettsperrholz Wände: Brettsperrholz
B	Berlin-Wedding, Lynarstraße, „Baukörper W“	Wohngebäude, 6	Geschossdecken: Brettsperrholz Wände: Holzständerbauweise
C	Berlin-Wedding, Lindower Straße	Wohngebäude, 7	Geschossdecken: Brettsperrholz Wände: Brettsperrholz

2.1 Datenbasierte dynamische Analyse von Bestandsgebäuden

2.1.1 Schwingungsmessungen

Die folgenden Abbildungen zeigen die Bestandsgebäude aus Tabelle 1, an denen Messungen im Forschungsprojekt durchgeführt wurden.



Abbildung 3: Messobjekt A, Hamburg, Alter Güterbahnhof, Plan A“ [3] © Neil Winstanley



Abbildung 4: Messobjekt B, Berlin-Wedding, Lynarstraße, „Baukörper W“ [4], [5]



Abbildung 5: Messobjekt C, Berlin-Wedding, Lindower Straße [6], © Jan Bitter

Für eine beispielhafte Beschreibung der Messkampagnen in Bestandsgebäuden sowie auch für die FE-Modellierung in Kapitel 3 wird das Messobjekt B nach Tabelle 1 gewählt.

In der Lynarstraße (Berlin Wedding) wurde im Jahr 2018 eines der damals größten Holzhäuser in Deutschland gebaut. Der Gebäudekomplex mit sechs Vollgeschossen ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Schwingungsmessungen fanden im Rohbau des nordöstlichen Baukörpers W (Abbildung 4, rechts) am 20.10.2018 statt. Gleisanlagen für Fernverkehr, Regional- und S-Bahn verlaufen direkt an der Grundstücksgrenze. Die Gleise liegen dabei auf einem hochgelegenen Bahndamm, der durch eine Mauer eingefasst ist (Abbildung 4, oben links). Das Erdgeschoss und der Treppenhaus-Gebäudekern sind in Stahlbeton ausgeführt, die restlichen Wände und Decken sind in Holzständerbauweise (Wände) bzw. Brettsperrholz (Decken) gebaut. Tragende Unterzüge sind ebenfalls aus Holz.

Auf mehreren Etagen wurden jeweils sowohl dreiachsige als auch einachsige 4,5 Hz-Geophone zur Messung der Schwinggeschwindigkeiten platziert (s. Abbildung 6). Die Messrichtung der einachsigen Geophone ist vertikal und dient der Erfassung der Deckenschwingungen. Mithilfe der dreiachsigen Geophone lassen sich neben den Deckenschwingungen auch die Vibrationen des gesamten Gebäudes erfassen, die sich vor allem in horizontaler Richtung auswirken. Insgesamt wurden 32 Kanäle synchron mit einer Abtastfrequenz von 1 kHz erfasst. Abbildung 6 zeigt die zentrale Messstation und das triaxiale Geophon, in Abbildung 7 sind die Sensorpositionen auf dem Baugrund, der Bodenplatte und auf den Geschossdecken eingetragen. Wegen der unmittelbaren Nähe zur Bahntrasse konnten zahlreiche Anregungen aus Zugverkehr (S-Bahnen, RE's, IC's und ICE's) gemessen werden. Im Gebäude wurden maximale Schwingungen bei S-Bahn-Anregung gemessen.

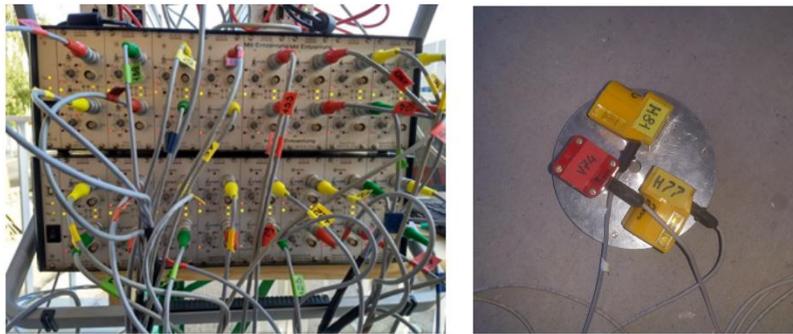


Abbildung 6: links: Zentrale Messstation mit 32 Messkanälen; rechts: eingesetztes triaxiales Geophon



Abbildung 7: Messstellen und Messkanäle im Gebäudeabschnitt W, Messobjekt B

2.1.2 KB-Werte und Übertragungsfunktionen

Abbildung 8 zeigt stellvertretend für eine Vielzahl von Messungen die maximalen Schwinggeschwindigkeiten aus Messung Nr. 28.

Im Baugrund dominiert die Anregung in vertikaler Richtung; Anregungen in den horizontalen Richtungen fallen rund 50 % geringer aus. Beim Übergang der Erschütterungen auf die massive Bodenplatte tritt eine deutliche Minderung der Schwinggeschwindigkeiten in allen Richtungen ein. Dies ändert sich ab dem EG, dem Übergang auf die Betondecke. Die im Vergleich zur EG-Decke leichteren BSP-Decken der OGs 1 bis 5 weisen nochmals größere Systemantworten auf – mit Maximalwerten auf der 5. OG-Decke (s. Abbildung 8). Resonanzeffekte treten erst ab dem 1. OG bei den Brettsperrholzdecken im Frequenzbereich von ca. 9 bis 18 Hz auf. Wenngleich spürbare Schwingungen aufgetreten sind, hat sich insgesamt keine erhöhte Schwingungsanfälligkeit durch die leichte Bauweise in Holz bei den durchgeführten Messungen ergeben.

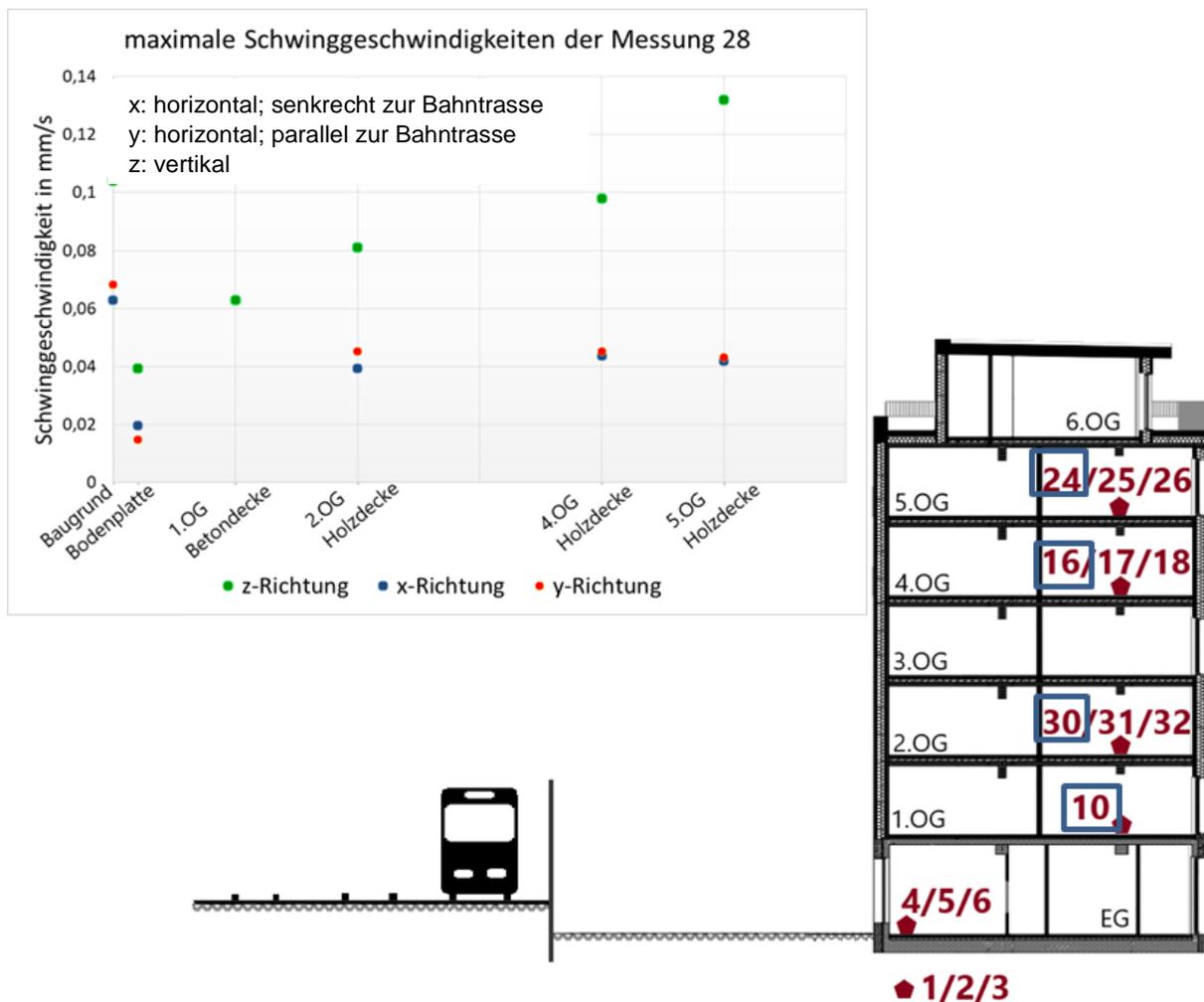


Abbildung 8: (oben links:) Maximale Schwinggeschwindigkeiten aus Messung Nr. 28 (S-Bahn); (rechts:) Gebäudeschnitt mit Kennzeichnung der auf der Nord-Seite übereinander angeordneten Messkanäle Nr.10, 30,16 und 24 für die vertikale Richtung, Messobjekt B

Der untere Anhaltswerte A_u (tags) = 0,15 wurde bei Einordnung in Tabelle 1, Zeile 4, der DIN4150-2 [7]. für alle Messungen und Zugtypen eingehalten, wenn man von der geringfügigen Überschreitung in der Messung Nr. 12 auf dem 5. OG absieht (s. Tabelle 2). Der untere Anhaltswerte A_u (nachts) = 0,1 wird in einzelnen Messungen im 4. und 5. OG überschritten. Da die Messungen im Rohbau durchgeführt wurden, ist mit Blick auf den späteren Ausbauzustand aber von höheren Dämpfungen und zusätzlicher Masse, die die Trägheit des gesamten Gebäudes erhöht - und damit nochmals von geminderten Systemantworten - auszugehen. In den weiteren Messobjekten A und C nach Tabelle 1 haben sich vergleichbare KB_{Fmax} -Werte ergeben (hier nicht dargestellt).

Tabelle 2: Maximale vertikale Schwinggeschwindigkeiten und KB_{Fmax} –Werte der Geschossdecken in mm/s, Messobjekt B

	Messung 12		Messung 16		Messung 20		Messung 28	
	max v	KB _{Fmax}						
2.OG	0,2013	0,0892	0,1284	0,0688	0,1473	0,0603	0,0811	0,0441
4.OG	0,2014	0,1142	0,1827	0,0872	0,1467	0,0679	0,0979	0,0471
5.OG	0,2757	0,1502	0,2083	0,1052	0,1589	0,083	0,1319	0,0644

Eine weitere interessante Analyse stellt die Berechnung von Übertragungsfunktionen (ÜF) aus dem Quotienten der gemessenen Ausgangsgröße zur Eingangsgröße dar. Für die Bestimmung von ÜF für die Geschossdecken aus BSP ist die Eingangsgröße der Kraftverlauf aus einem Impuls, der als Hammerschlag aufgebracht wird. Die Ausgangsgröße ist der von einem Geophon gemessene Schwinggeschwindigkeitsverlauf. Aus der ÜF können direkt Resonanzstellen durch „Peak-Picking“ abgeschätzt werden. Diese Maxima werden als Eigenfrequenzen des Systems interpretiert.

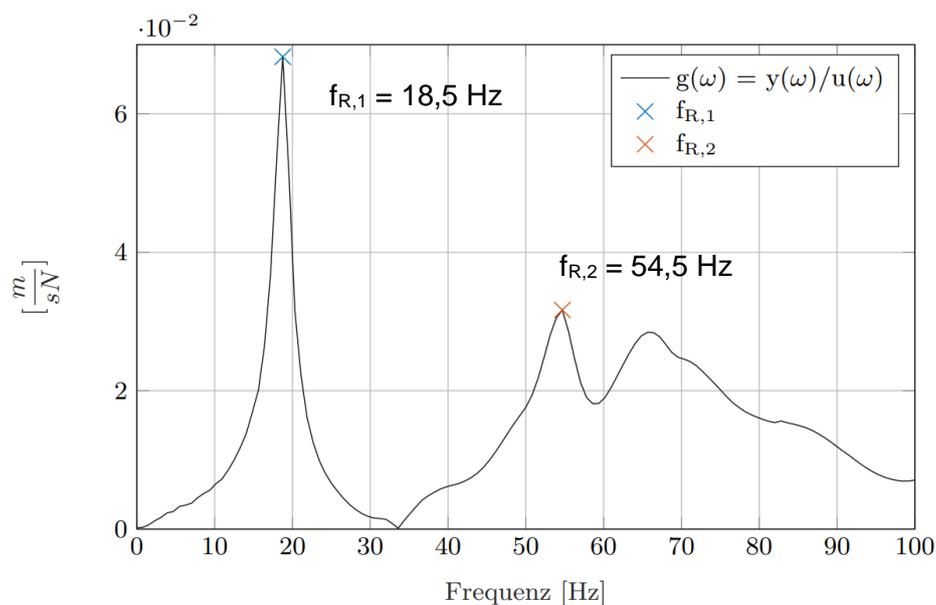


Abbildung 9: ÜF der Geschossdecke im 2. OG mit den Resonanzstellen; Messobjekt B

Es lassen sich auch $\ddot{U}F$ bestimmen, die aus gemessenen vertikalen Schwingungsantworten von Geschossdecken infolge der Anregung aus Schienenverkehr ermittelt werden. Die aus den Messungen Nr. 12, 16 und 20 aus Schmalbandspektren ermittelte $\ddot{U}F$ zeigt Abbildung 11. Die Spektren der aus den Messungen Nr. 16 und 20 berechneten $\ddot{U}F$ weisen eine gute Übereinstimmung auf. Durch Mittelung über eine Vielzahl $\ddot{U}F$ für die verschiedenen Anregungen (S-Bahn, RE, ICE, Güterzug) können Modellspektren erstellt werden, die anschließend für die Schwingungsprognose geeignet sind. Die aus Messung Nr. 20 ermittelte $\ddot{U}F$ $G_{15z, M20}$ wird verwendet, um die Zeitverläufe der Schwinggeschwindigkeit und des KB_F -Werts der Messung Nr. 16 zu prognostizieren. Abbildung 12 zeigt den Vergleich der prognostizierten Zeitreihen mit den experimentell ermittelten für das Deckenfeld auf der Nordwest-Seite im 5. OG (Kanal 24) nach Rücktransformation in den Zeitbereich.

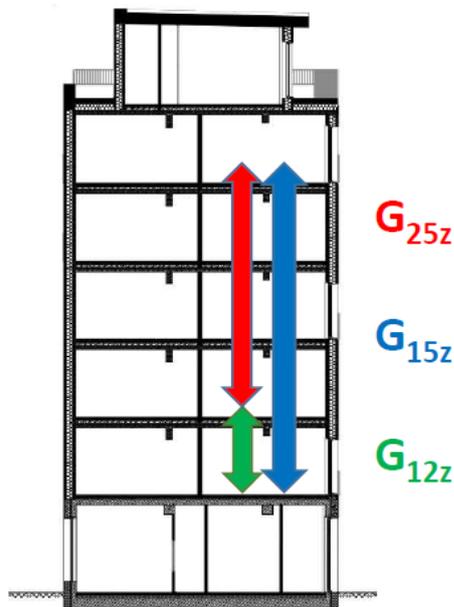


Abbildung 10: $\ddot{U}F$ für die vertikale Richtung; Messobjekt B

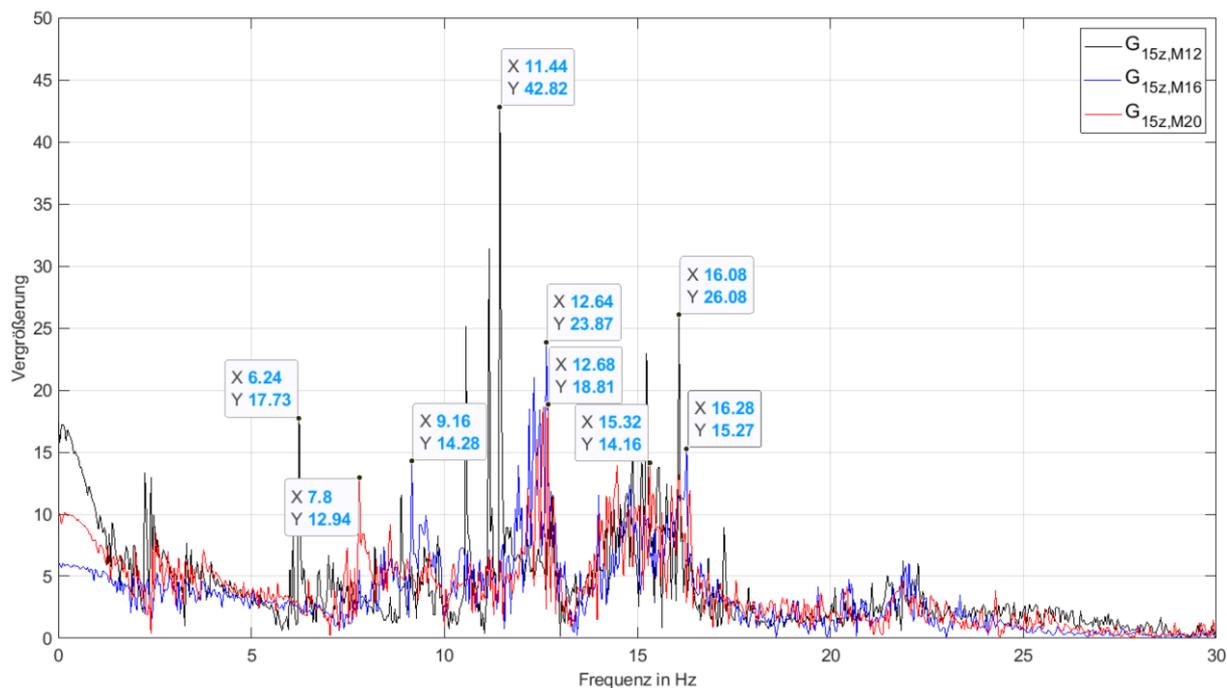


Abbildung 11: Aus Korrelation und den Messungen Nr. 12, 16 und 20 (S-Bahn) ermittelte ÜF für die vertikale Richtung: ÜF G_{15z} : Betondecke EG → Geschosdecke 5. OG; Messobjekt B

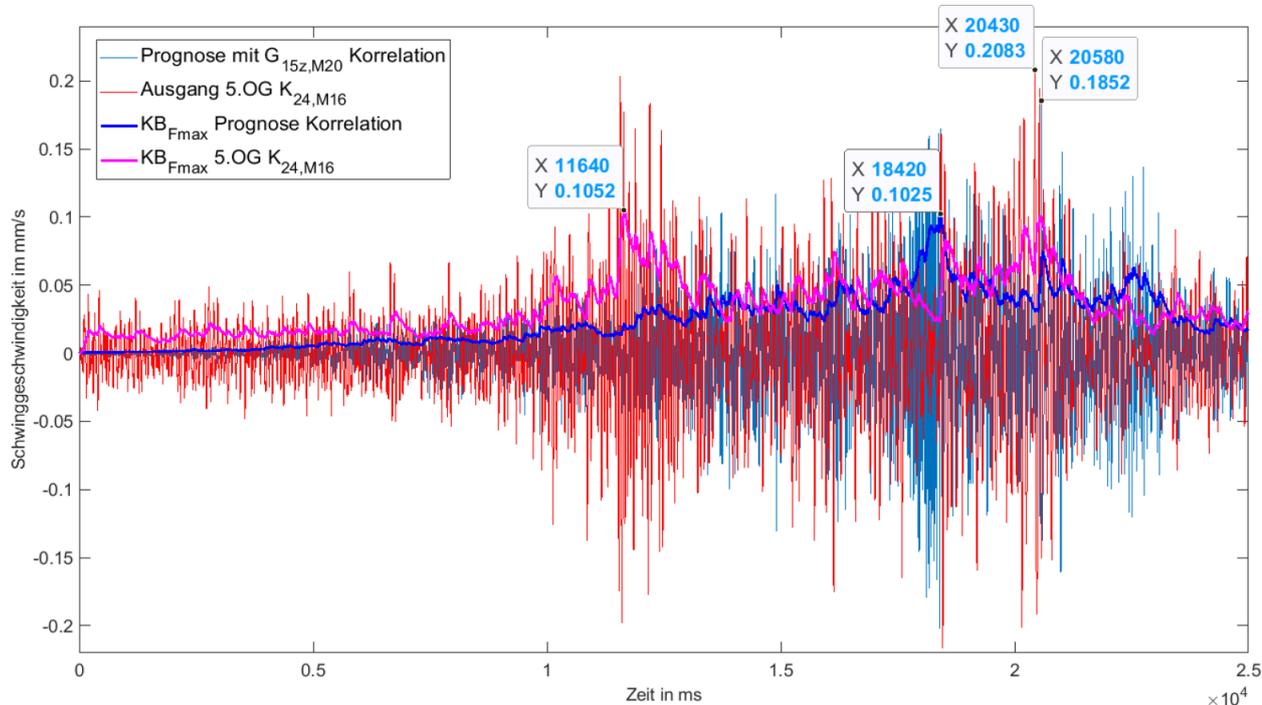


Abbildung 12: Prognose der vertikalen Deckenschwingung (Kanal 24) im 5. OG (Zeitverlauf der Schwingungsantwort und KB_F -Wert) für die Messung Nr. 16 mit ÜF $G_{15z, M20}$; Messobjekt B

2.1.3 Modalanalysen

Modalanalysen sind das grundlegende Werkzeug, um das Schwingungsverhalten eines Bauteils oder Bauwerks zu analysieren. Dazu werden die modalen Parameter Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungen bestimmt. Aus den Eigenfrequenzen kann abgeleitet werden, ob Resonanznähe zu kritischen Erregerfrequenzen besteht. In diesem Fall sind dann einerseits Stärke und Dauer der Anregung entscheidend und andererseits, ob eine hohe Dämpfung die Amplituden mindert oder nicht. Die Eigenformen geben Auskunft über die räumlichen Eigenschwingungszustände, die den jeweiligen Eigenfrequenzen zugeordnet sind. Von besonderem Interesse sind sowohl die vertikalen Biegeschwingungen der Geschossdecken als auch das räumliche Schwingungsverhalten des gesamten Gebäudes, bei dem Horizontalverschiebungen dominant sind.

Im ersten Schritt werden die modalen Parameter für die Geschossdecken und das Gebäude direkt aus den gemessenen Antwortsignalen ermittelt. Dazu wurden Methoden der nichtparametrischen und der parametrischen Systemidentifikation direkt auf die gemessenen Ausgangsgrößen angewendet. Aus der Gruppe der nichtparametrischen Verfahren wird die Frequency Domain Decomposition (FDD) verwendet. Eine ausführliche Darstellung der theoretischen Grundlagen findet sich zum Beispiel in [8]. Aus der Gruppe der parametrischen Methoden wird die kovarianzbasierte Stochastic Subspace Identification (SSI-COV) gewählt. Für die theoretischen Grundlagen wird zum Beispiel auf [9] verwiesen.

Die Ergebnisse zur Identifikation modaler Parameter sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Modalanalysen der Geschossdecken

Aus den Messungen auf der Geschossdecke des 4. OG in der Lynarstraße (Messobjekt B) wurden Fourierspektren unter verschiedenen Anregungen aus Schienenverkehr ermittelt. Diese sind für den ungünstigen Lastfall S-Bahn-Anregung für die Nord- und Südseite in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. Dabei interessieren vor allem die ersten Biegeeigenfrequenzen, da sie besonders leicht angeregt werden können. Die Zuordnung der weiteren Peaks in den Spektren bleibt unsicher. Es kann sich um Schwingungen des Bodenbelags und des Estrichs handeln, was an dieser Stelle nur vermutet werden kann. Eine genauere Analyse, welche Eigenschwingungszustände zusätzlich zu denen der tragenden Holzkonstruktion der Decken auftreten – vor allem des Estrichs, der schwimmend auf der tragenden Holzkonstruktion aufgebracht wird – erfolgt bei den Laborversuchen in Kapitel 3. Die hier dokumentierten Auswertungen betreffen Decken im Rohbauzustand. Das bedeutet, dass der Bodenaufbau aus Schüttung, Dämmung und Estrich zum Zeitpunkt der Messung noch nicht aufgebracht war. Im Forschungsvorhaben wurden auch Decken im Ausbauzustand gemessen. Die Ergebnisse hierzu und ein Vergleich der Decken in den verschiedenen Zuständen werden in Fachzeitschriften publiziert.

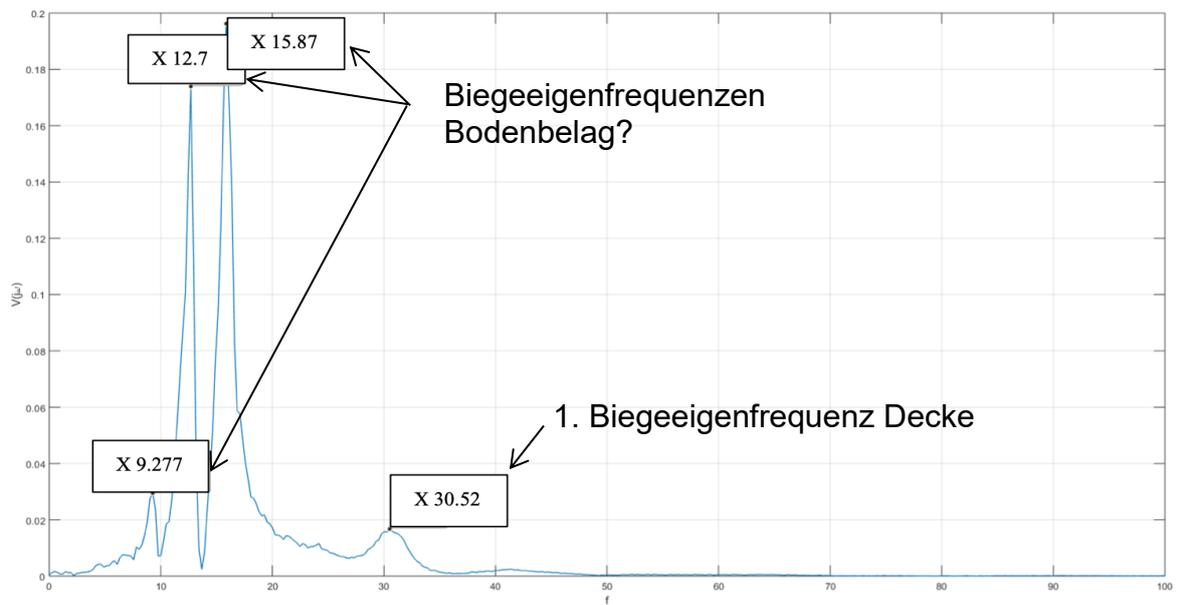


Abbildung 13: Fourierspektrum Deckenfeld Nordseite – Anregung aus S-Bahnverkehr (Messung 12), Messstelle 16; Messobjekt B

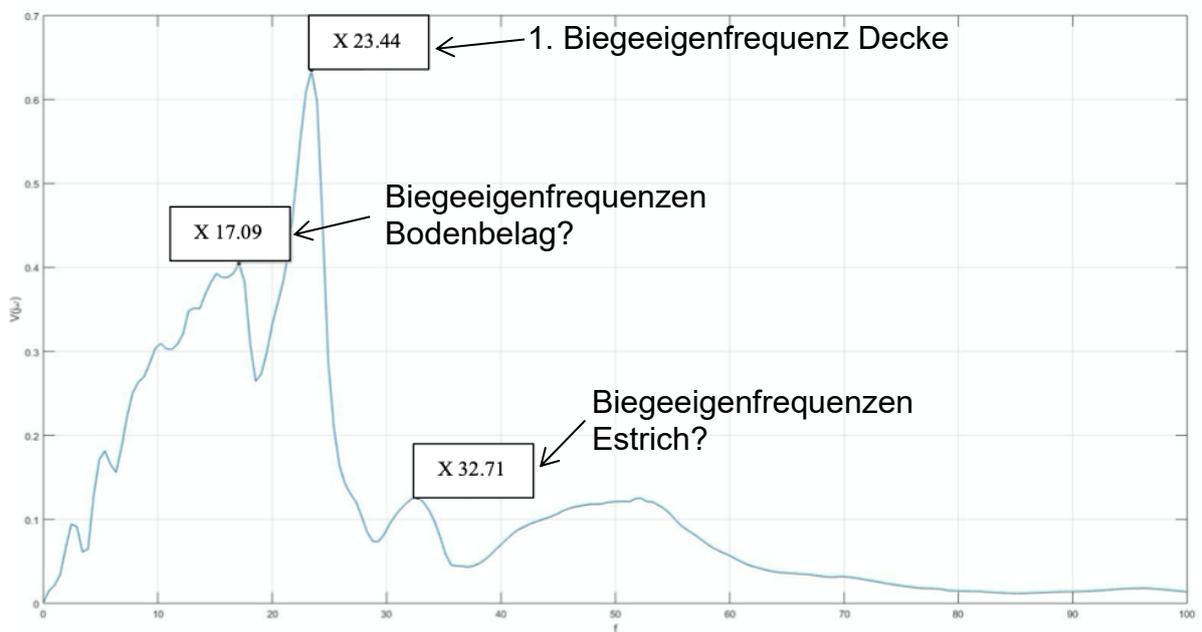


Abbildung 14: Fourierspektrum Deckenfeld Südseite – Anregung aus S-Bahnverkehr (Messung 12), Messstelle 12; Messobjekt B

Tabelle 3: Messobjekte aus Arbeitspaket 1 – erste Biegeeigenfrequenzen der Geschossdecken

Nr.	Lage	1. Biegeeigenfrequenzen der Geschossdecken (Rohbauzustand) in Hz
A	Hamburg, Alter Güterbahnhof, „Plan A“	22,5
B	Berlin-Wedding, Lynarstraße, „Baukörper W“	30,52 (Nordseite) 23,44 (Südseite)
C	Berlin-Wedding, Lindower Straße	16,8

Sämtliche erste Biegeeigenfrequenzen nach Tabelle 3 wurden im Rohbauzustand ermittelt. Sie können als günstig bewertet werden. Sie erfüllen das Kriterium der Hochabstimmung nach [10] und [11]. Zum Vergleich: Klassische Holzbalkendecken weisen Eigenfrequenzen im Bereich von 6 bis ca.15 Hz auf.

Modalanalysen des Gebäudes

Außer den Eigenschwingungszuständen der Geschossdecken wird auch eine Modalanalyse des gesamten Gebäudes vorgenommen. Es wurden Methoden der nichtparametrischen (FDD) und der parametrischen Systemidentifikation (SSI) direkt auf die gemessenen Ausgangsgrößen angewendet. Die Ergebnisse mit der FDD sind in Abbildung 15 dargestellt. Es ergeben sich erste Eigenfrequenzen bei 2,3 Hz und 2,2 Hz. Zu beiden Frequenzen gehören räumliche Eigenschwingungsformen.

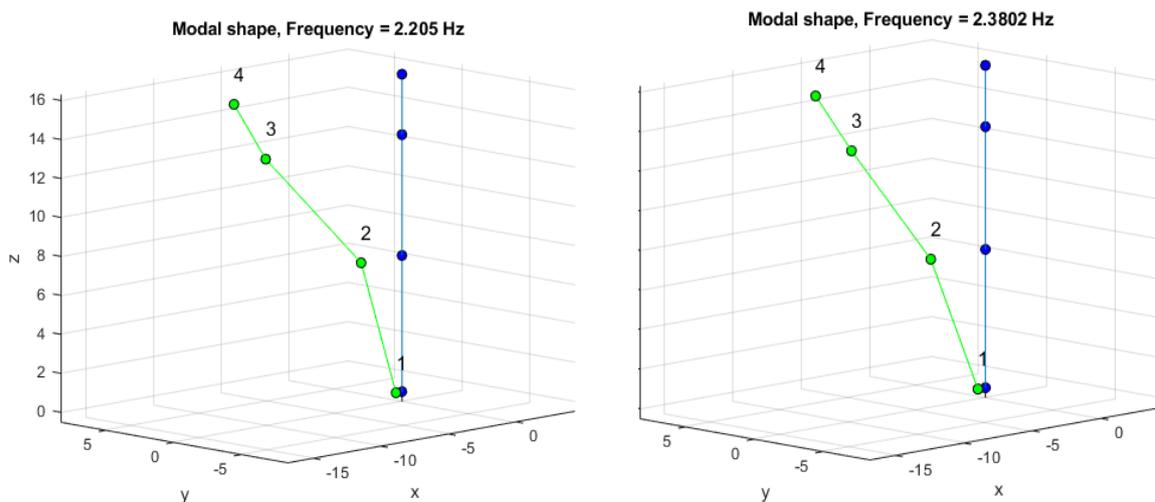


Abbildung 15: Gebäude-Eigenformen und -frequenzen, identifiziert mit FDD – links: räumliche Eigenform mit Dominanz in horizontaler x-Richtung (senkrecht zur Bahntrasse); rechts: mit Dominanz in horizontaler y-Richtung (parallel zur Bahntrasse); Messobjekt B

Die Ergebnisse der nichtparametrischen Systemidentifikation mit der SSI sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Ergebnisse stimmen gut mit denen aus Abbildung 16 überein und liefern zusätzlich realistische Werte von rund 5% Lehrscher Dämpfung, die mit der FDD nicht bestimmt werden konnten. Die rot-blauen Linien in Abbildung 10 deuten die Schwingungsrichtung in der Modalform an. Auch hier lässt sich erkennen, dass beide Moden räumliche Schwingungszustände abbilden. Mode 1 schwingt stärker in x-Richtung, Mode 2 in y-Richtung. Es handelt sich um Biegeschwingungen des Gesamtgebäudes, wobei sich die oberen Geschosse zusätzlich relativ zu den unteren Geschossen verdrehen.

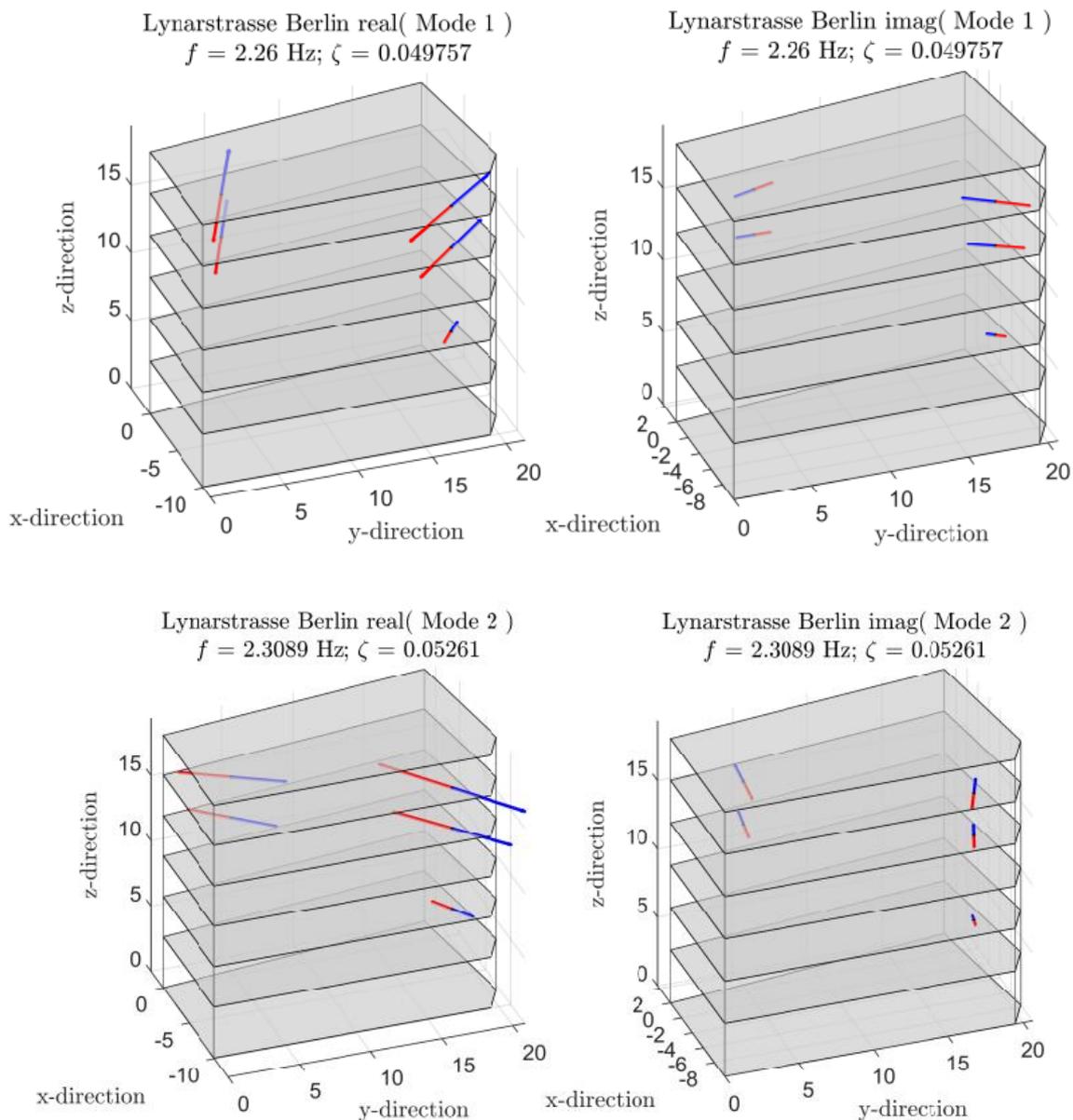


Abbildung 16: Gebäude-Eigenformen, -frequenzen und modale Dämpfungen, identifiziert mit SSI; oben: Real- und Imaginärteil von Mode 1; unten: Real- und Imaginärteil von Mode 2); Messobjekt B

2.2 Finite-Elemente-Modellierung

2.2.1 Modellaufbau

Ebenfalls am Beispiel des Gebäudes in der Lynarstraße (Messobjekt B) wird das Vorgehen beim Aufbau des FE-Modells in der Modellierungs- und Analyse-Software SAP2000 (Structural Software for Analysis and Design) beschrieben. Ausgangsbasis waren die detaillierten Planungsunterlagen, die uns über die Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt wurden.

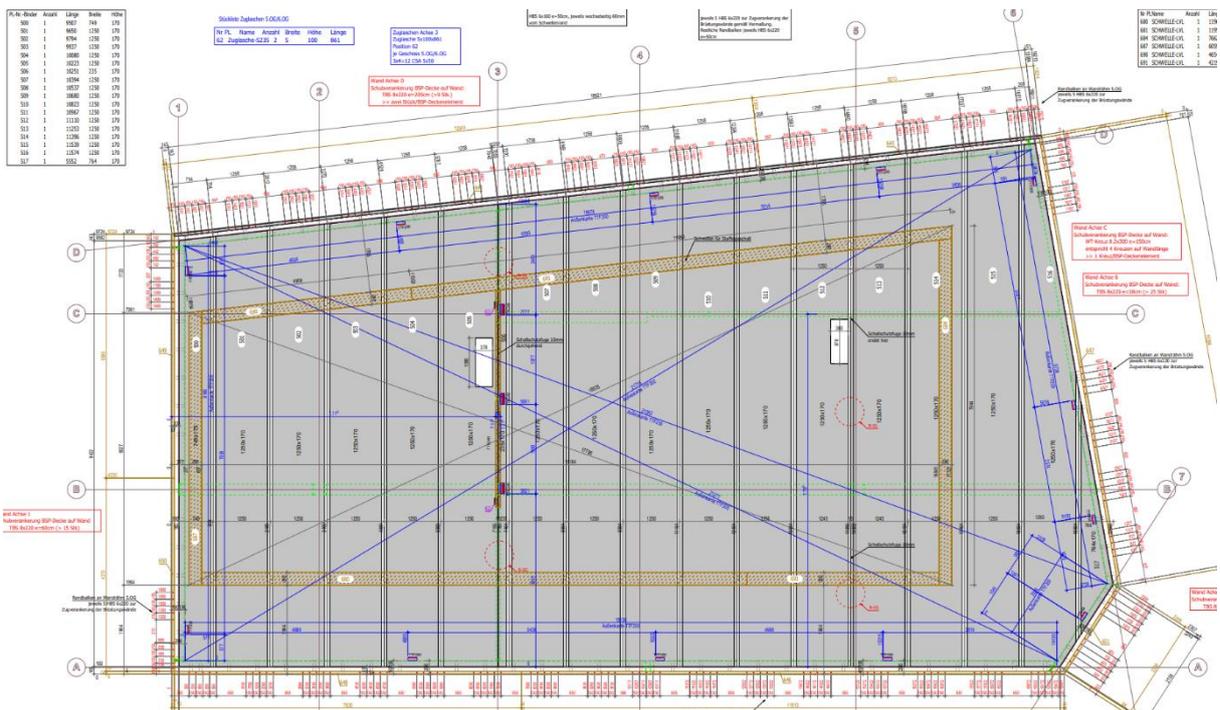
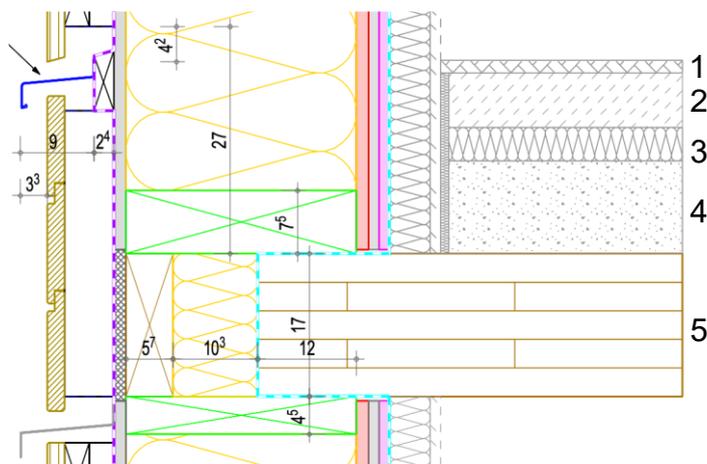


Abbildung 17: Montageplanung Bauteil W, Decke über 5. OG; Messobjekt B



	Schicht	Dicke in cm
1	Belag	1,5
2	Estrich	6,5
3	Trittschalldämmung	6,0
4	Schüttung	11,0
5	Brettsperrholzplatte (BSP), 5 Lagen	17,0

Abbildung 18: Aufbau der Brettsperrholzdecken; Messobjekt B

Das geometrische Modell nach Abbildung 19 wird entsprechend dem Verlegeplan der BSP-Platten (Abbildung 17) erstellt. Die Geschosdecke mit den ungefähren Abmessungen 10 m x 20 m (ohne die auskragenden Balkone) liegt rundherum auf den Außenwänden auf. Daher wird die Lagerung als gelenkig angenommen – mit Ausnahme der Nordseite. Hier wird entsprechend dem abweichenden Wandanschluss (s. Abbildung 20, rechts) eine feste Einspannung im FE-Modell angenommen. Vom Deckenaufbau nach Abbildung 18 wird nur der 17 cm starke BSP-Teil mit Volumenelementen modelliert. Dabei wird die 5-lagige BSP-Decke mit drei Lagen in Längs- und 2 Lagen in Querrichtung vereinfacht mit homogenem isotropen Material modelliert, um die Komplexität und damit die Rechenzeit der FE-Analyse sinnvoll zu begrenzen. Die übrigen Schichten 1 bis 4 nach Abbildung 18, rechts, werden als Massezuschlag ohne Berücksichtigung ihrer Steifigkeit modelliert. Bei der Kopplung der BSP-Platten wird eine elastische Lagerung mit Federelementen am oberen und unteren Rand der Plattenstöße gewählt (s. Abbildung 20, links).

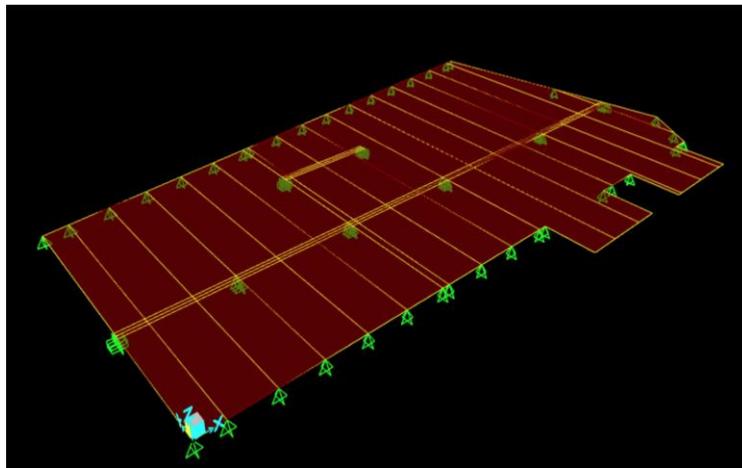


Abbildung 19: Geometrisches Modell der Geschosdecke des 5. OGs mit eingetragenen Unterzügen und BSP-Platten; Messobjekt B

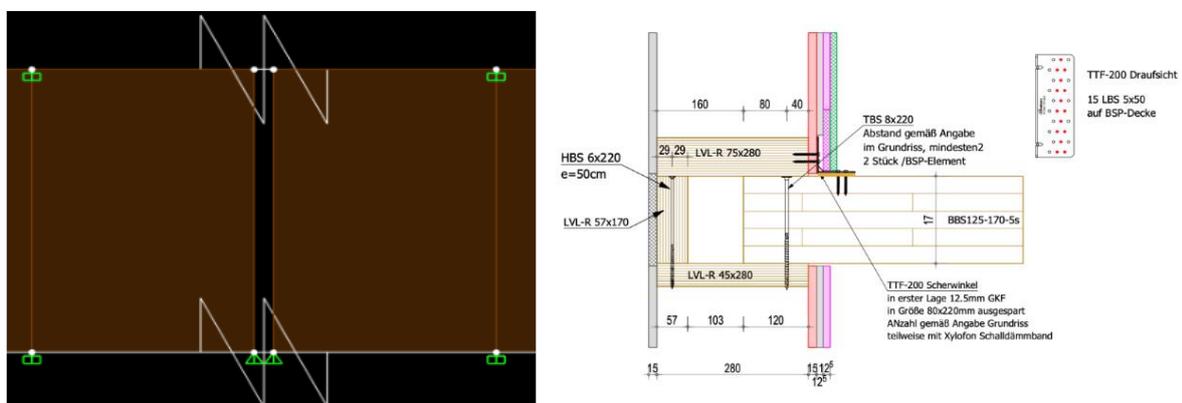
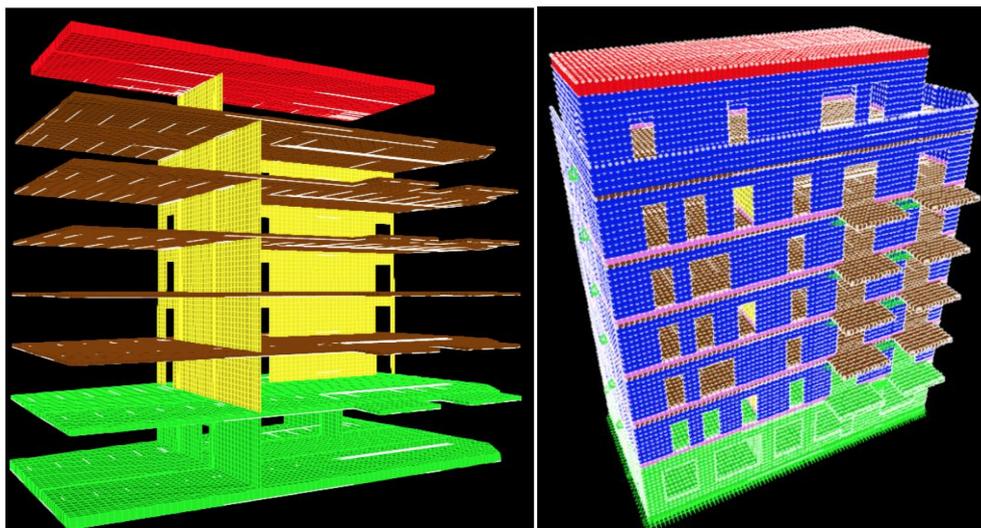


Abbildung 20: links: Kopplung zwischen BSP-Platten mit federnder Lagerung, Wanddetail Nordseite → Modellierung als Einspannung); Messobjekt B



FE-Modell - SAP2000	
Material BSP-Platten:	<ul style="list-style-type: none"> • homogen, isotrop, ideale Querschnittswerte
BSP-Platten, Sohlplatte, EG-Decke:	<ul style="list-style-type: none"> • Volumenelemente ($h/l/b = 17/30/30$) in cm • lineare Ansatzfunktionen • Auswertung in $2 \times 2 \times 2$ Gauß-Punkten
Wände:	<ul style="list-style-type: none"> • Schalenelemente ($l/b = 30/30$) in cm
Unterzüge:	<ul style="list-style-type: none"> • Balkenelemente
Anzahl Elemente:	109.483
Rechenzeit Modalanalyse	ca. 23 Min.

Abbildung 21: Angaben zum FE-Modell in der Übersicht; Messobjekt B

2.2.2 Modalanalysen

Modalanalysen der Geschossdecken

Erste Eigenfrequenzen der BSP-Geschossdecken und die zugehörigen Eigenformen ergeben sich nach Abbildung 22. Sie unterscheiden sich für die Geschossdecken des 1. bis 5. OGs nur wenig. Die EG-Decke ist in Stahlbeton ausgeführt und wird hier nicht betrachtet.

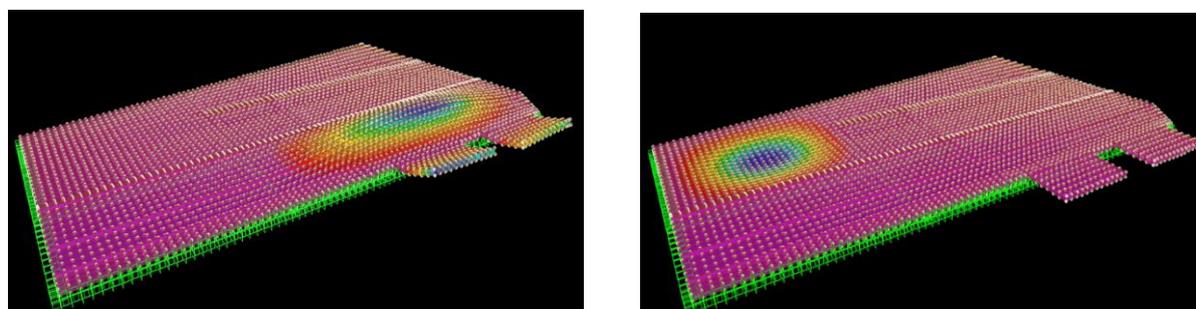


Abbildung 22: links: 1. Eigenform Deckenfeld Nordseite bei $f_0 = 32,47$ Hz; rechts: Eigenform Deckenfeld Südseite bei $f_0 = 22,31$ Hz; Messobjekt B

Modalanalysen des Gesamtgebäudes

Die Ergebnisse für die ersten beiden Biegeeigenformen sind in Abbildung 23 dargestellt. Sie stellen räumliche Schwingungszustände dar und entsprechen sehr gut den aus den Messungen mit der FDD bzw. SSI identifizierten Modalformen. Gleichzeitig sind die Biegeverformungen in den oberen Geschossen mit einer Verdrehung um die Vertikalachse gekoppelt. Diese wurde bereits bei der parametrischen Identifikation mit der SSI (Abbildung 17) beobachtet. Dieses räumliche Schwingungsverhalten wurde zum Beispiel auch beim Messobjekt C, dem Wohngebäude in der Lindower Straße, festgestellt. Es kann daher angenommen werden, dass bei Gebäuden, bei denen neben den Geschossdecken auch die Wände in Holz gebaut sind - wie in den hier betrachteten Fällen - räumliche Schwingungszustände stärker ausgeprägt auftreten, als dies bei Wänden in Massivbauweise (Mauerwerk / Stahlbeton) der Fall ist.

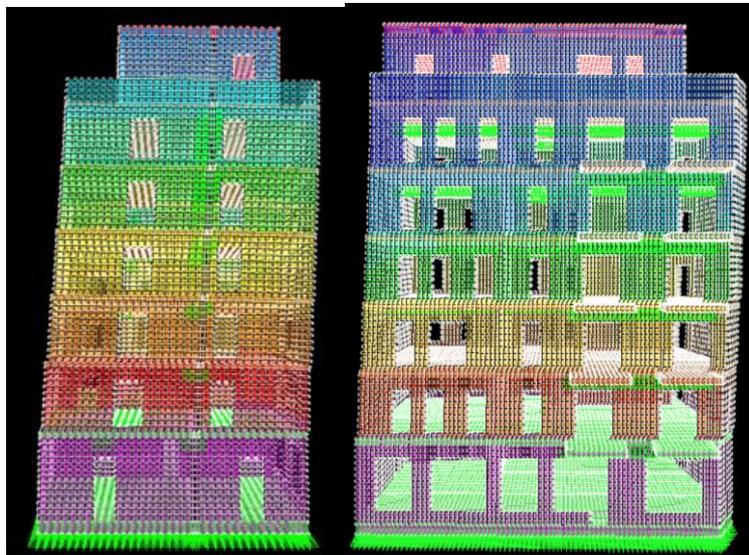


Abbildung 23: 1. Biegeeigenform Gesamtgebäude; links: mit Dominanz in x-Richtung (senkrecht zur Bahntrasse) $f_0 = 2,6$ Hz; rechts: mit Dominanz in y-Richtung (parallel zur Bahntrasse) $f_0 = 2,20$ Hz; Messobjekt B

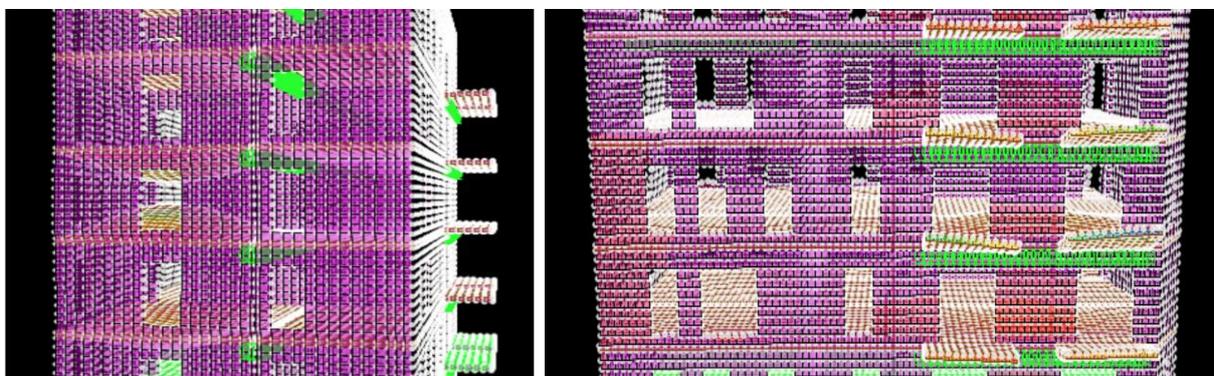


Abbildung 24: Ausschnitt Gesamtgebäude; links: mit in der 1. Eigenform schwingenden Geschossdecken auf der Südseite bei 22,31 Hz; rechts: mit in der 1. Eigenform schwingenden Geschossdecken auf der Nordseite bei 32,47 Hz; Messobjekt B

In Tabelle 4 werden die aus Messungen identifizierten Eigenfrequenzen den berechneten gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass der Fehler für die Decken auf der Nordseite und die Gebäudeeigenfrequenz mit Dominanz in y-Richtung gering ist. In den anderen Fällen ist der Fehler deutlich größer. Der Grund liegt vermutlich in der vereinfachten Abbildung der BSP-Decke als homogenes isotropes Material und den Vereinfachungen bei der Modellierung der Wände mit ideellen Querschnittswerten. Bei genauerer Berücksichtigung der Anisotropien von Decken und Wänden können genauere Ergebnisse erzielt werden. Dennoch wird das FE-Modell als geeignet bewertet, da es einen sinnvollen Kompromiss aus Detailaufwand zu Rechenzeit darstellt.

Tabelle 4: Vergleich der Eigenfrequenzen aus Messungen und aus FE-Modellierung;
Messobjekt B

	1. Biegeeigenfrequenzen der Geschossdecken in Hz		1. Biegeeigenfrequenz Gesamtgebäude in Hz	
	Nordseite	Südseite	Dominanz in x-Richtung	Dominanz in y-Richtung
aus Messung	31,70	23,44	2,20 (FDD) 2,26 (SSI)	2,38 (FDD) 2,31 (SSI)
FE-Modell	32,47	19,72	2,60	2,20
Abweichung zur Messung in %	2,4	15,9	18,2 (FDD) 15,0 (SSI)	7,6 (FDD) 4,8 (SSI)

2.3 Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse aus den Messungen in Bestandsgebäuden und der FE-Analyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die BSP-Decken im Rohbauzustand der untersuchten Objekte A, B und C nach Tabelle 1 weisen hohe Biegeeigenfrequenzen auf. Ihr Schwingungszustand kann als gut bewertet werden, wenn man die DIN 4150-2 [7] zugrunde legt. Die Anhaltswerte werden bei fast allen Zugvorbeifahrten (abgesehen von wenigen Ausnahmen) eingehalten.
- Betrachtet man den Schwingungszustand der Gesamtgebäude, treten erwartungsgemäß tiefe erste Eigenfrequenzen im Bereich $2 \text{ Hz} < f < 3 \text{ Hz}$ auf. Diese Eigenfrequenzen gehören zu räumlichen Eigenschwingungszuständen, die stärker ausgeprägt sind als bei Häusern mit massiven Wänden, was vermutlich an der geringeren Steifigkeit und Masse der Wände liegt. Bei klassischen Bauweisen spalten sich die Eigenschwingungszustände stärker in die einzelnen horizontalen Raumrichtungen; hier treten sie tendenziell eher kombiniert in einem Eigenschwingungszustand auf.
- Mit Übertragungsfunktionen, die direkt aus den Messdaten ermittelt werden, können sowohl Eigenfrequenzen abgeschätzt („Peak Picking“) als auch Schwingungsantworten und KB-Werte prognostiziert werden.

- FE-Modelle für Decken und Gebäude bieten den Vorteil einer physikalisch basierten Modellierung. Außerdem können mit ihnen Prognoseberechnungen durchgeführt und System- und Lastparameter variiert werden. Der Modellierungsaufwand ist relativ hoch, weil Auflager – und Übergangsbedingungen zwischen den BSP-Platten möglichst realitätsnah berücksichtigt werden müssen. Zudem sind Wand- und Deckenaufbauten komplexer als bei herkömmlichen Gebäuden in Massivbauweise. Bei der in Kapitel 2.2 beschriebenen Modellierung wurden die BSP-Decken als homogenes und isotropes Material unter Verwendung ideeller Querschnittswerte modelliert, obwohl sie aus fünf Lagen mit wechselnder Faserrichtung aufgebaut sind (s. Abbildung 18). Dies führte teilweise zu deutlichen Abweichungen zu den aus Messungen identifizierten Eigenfrequenzen.

3 Experimentelle Untersuchungen im Teststand

3.1 Zielsetzung

Zur Lösung des Problems der multifunktionalen Nutzung bei dynamischen Anregungen innerhalb des Gebäudes war der Aufbau eines geeigneten Teststandes an der LUH sowie die Planung und Durchführung von Schwingungsmessungen an verschiedenen Versuchsaufbauten zentraler Gegenstand von AP 2. Die verschiedenen Versuchsaufbauten wurden durch dynamische Erregersignale belastet, sodass anschließend verschiedene Methoden der Modalanalyse anwendbar waren. Gegenüber den Messungen an Gebäuden in AP 1 besteht bei den Messungen in AP 2 der Vorteil, dass weniger unbekannte Parameter vorliegen; insbesondere ist es möglich, die Massen für jeden Versuchsaufbau detailliert zu bestimmen, was bei Bauteilen und Bauwerken im Bestand nicht möglich ist. Bei den Untersuchungen in AP 1 blieb zum Beispiel ungeklärt, welchen Einfluss der schwimmende Estrich auf das Schwingungsverhalten der Decke hat. Das in Abbildung 14 gezeigte Fourierspektrum lässt „Estrich-Eigenfrequenzen“ zwischen 30 und 40 Hz vermuten. Im Teststand sollte gezielter untersucht werden, inwieweit das Aufbringen des schwimmenden Estrichs Eigenfrequenzen und Dämpfung der Decke beeinflussen.

Es wurden typische Versuchsstrukturen (Holzdecken-/ Wandelemente, Verbinder etc.) entworfen. Die Abmessungen der BSP-Platte wurden so dimensioniert, dass die erste Biegeeigenfrequenz der eingeschossigen Referenzkonfiguration im Bereich üblicher Eigenfrequenzen von Decken im Bestand liegt. Dies konnte erfolgreich umgesetzt werden, wie Tabelle 6 zeigt. Der Vergleich mit Tabelle 3, zeigt, dass die erste Biegeeigenfrequenz zwischen denen von Objekt A und C liegt und damit gut gewählt ist. Um die Praxisrelevanz aller Versuchsaufbauten und Verbindungsdetails sicherzustellen, wurden – unter der Koordination von ABP - die Industriepartner Stora Enso, Rothoblaas, Getzner Werkstoffe, Regupol Acoustics, Derix, Ingenieurbüro Köhnke und die Könecke Holzbau in die Planung mit einbezogen. Sie haben das Forschungsvorhaben außerdem finanziell und mit großzügigen Materiallieferungen unterstützt. Die Deckenaufbauten orientieren sich an dem im Brettsperrholzbau bewehrten Lagenaufbau mit Zementestrich, Trittschalldämmung und Schüttung. Zusammen mit der 140 mm BSP-Decke bezieht sich dieser Aufbau auf die Schallschutznorm DIN 4109-33.

In der Fügung und Verbindung der Holzelemente wurden klassische Varianten untersucht. Die längsseitige Verbindung der Deckenelemente wurde mit Koppelbrett und als Falzstoß untersucht. Von besonderem Interesse waren auch die Varianten der Befestigungen der Deckenelemente an die Wandelemente, da hier zu untersuchen war, welchen Einfluss die verschiedenen Verbindungen auf eine Einspannwirkung und damit auf die Höhe der Eigenfrequenz der Decke haben. In diesem Zusammenhang wird auch der Einsatz von akustisch wirksamen Elastomerlagern und die Auflast durch ein weiteres Geschoss über der Deckeneinspannung relevant.

Üblicherweise wird der Einfluss solcher Variationsmöglichkeiten vernachlässigt und im Sinne der Einbaubarkeit und Baugeschwindigkeit ausgewählt.

Insbesondere eine mögliche größere Teil-Einspannung der Deckenelemente hat ein größeres Potential, das Schwingungsverhalten einer BSP-Decke zu verbessern.

Im Wohnungsbau ergeben sich verschiedenartige Störungen des Deckenschwingsystems, die vermutlich einen als positiv zu wertenden Effekt auf das Schwingungsverhalten haben. Dazu gehört zum Einen das Vorhandensein einer seitlichen Wand, die in der Regel auch als Auflager fungiert, und zum Anderen der Einbau von Trockenbauwänden. Beide Umstände können einen erheblichen Einfluss auf die Eigenfrequenzen und die Dämpfungen haben.

Das durchgeführte Versuchsprogramm hat insbesondere das Ziel, diese besonderen Effekte genauer ihrem Einfluss und ihrer Größenordnung nach einschätzen zu können.

ABP hat zusammen mit der LUH und der HTWK den Versuchstand und die Systemvarianten entworfen. Die detaillierten Entwurfszeichnungen wurden von ABP erstellt. Sie sind auszugsweise im Anhang abgebildet.

Um ein möglichst großes Spektrum von Systemvariationen zu erhalten, wurden die Versuchsstrukturen sukzessive aufgebaut und jede Veränderung messtechnisch erfasst. Parallel wurde ein Messkonzept für Versuchsstrukturen im Teststand bei Anregung durch für typische Nutzungsszenarien repräsentative dynamische Erregersignale erstellt. Dieses legte die einzusetzende Sensorik, weitere Messtechnik und die Messpositionen fest. Das erarbeitete Messkonzept soll auf zukünftige Teststände übertragbar sein.

3.2 Aufbau des Teststands

Der Teststand wurde in der Versuchshalle des ISD nach den Entwurfsplänen von ABP aufgebaut (Abbildung 25 und Abbildung 26).

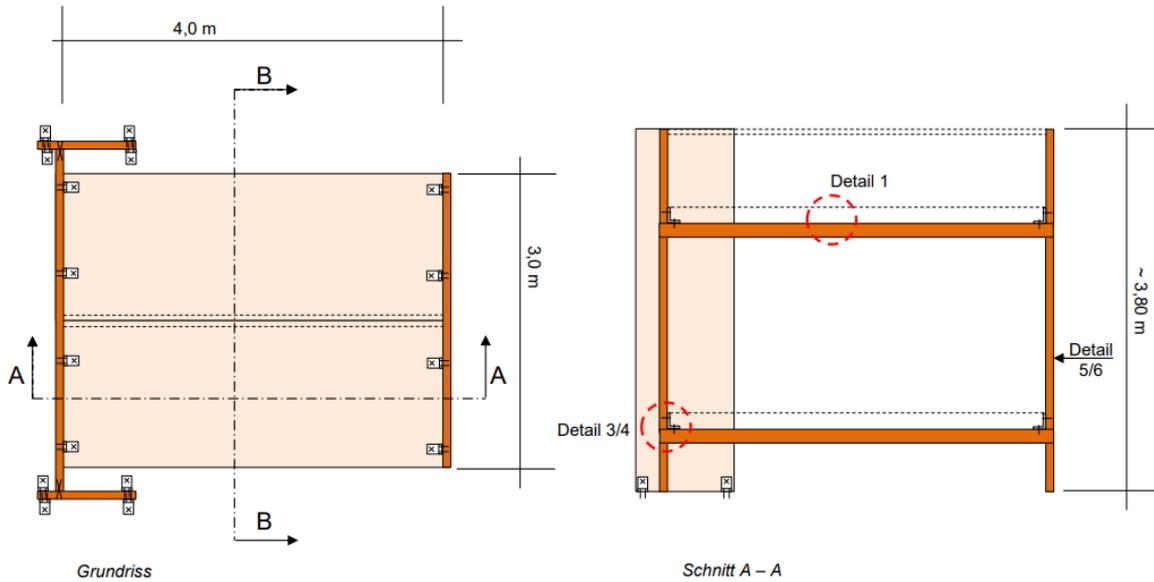


Abbildung 25: Abmessungen geplanter Teststand



Abbildung 26: Im Labor der Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik, realisierter Teststand, Variante 7 bis 10 (zweigeschossig ohne Bodenaufbau)

Tabelle 5: Teststand – Beschreibung der Aufbauvarianten

Variante Nr.	Geschosszahl	Kurzbeschreibung*
1	1	Referenzkonfiguration, unverschraubt, kein Koppelbrett
1a	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 400 mm), Koppelbrett unvernagelt
1b	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Koppelbrett unvernagelt
1c	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Koppelbrett vernagelt
2	1	Winkelverbindung an den Auflagern, Koppelbrett vernagelt
3a	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 400 mm), Stufenfalz verschraubt
3b	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt
4a	1	Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Stufenfalz verschraubt
4b	1	Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt
4c	1	akustische Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt – Vergleich dreier Hersteller
5	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt, zusätzliche nicht verschraubte dritte Wand um 20° gedreht
6	1	direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt, zusätzliche nicht verschraubte/ verschraubte dritte Wand
7	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt Decke-Wand-Verbindung mit Winkel
8	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt Decke-Wand-Verbindung mit Winkel, akustisches Lager über der Decke
9a	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung mit Winkel, akustische Lager über und unter der Decke
9b	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt Decke-Wand-Verbindung mit akustischem Winkel, akustische Lager über und unter der Decke
10	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke
11	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke, Bodenaufbauten
12a	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke, Bodenaufbauten, Trockenbauwand quer zur Deckenspannrichtung
12b	2	oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke, Bodenaufbauten, Trockenbauwand parallel zur Deckenspannrichtung

* Die Varianten sind auszugsweise im Anhang dargestellt.

3.3 Messungen an verschiedenen Teststandkonfigurationen

Der Teststand wurde sukzessive aufgebaut, um möglichst viele Systemvariationen zu erfassen. In jeder Konfiguration nach Tabelle wurden nach Fertigstellung Hammerimpulse (ca. 10 bis 20 pro Zeitreihe) an zufälligen Stellen auf der BSP-Platte aufgebracht und die gemessenen Beschleunigungszeitreihen einer Länge von ca. 72 s an 30 Positionen mit MEAS-Beschleunigungssensoren auf der Unterseite der BSP-Platte erfasst (Abbildung 28). Die Abtastfrequenz betrug 1 kHz. Die Hammeranregung zusammen mit der hohen Abtastfrequenz bietet insbesondere bei der Ermittlung der Dämpfung die Möglichkeit verschiedene Methoden anzuwenden. Um die Messtechnik übersichtlich anzuordnen, die Kabelführung zu erleichtern und wegen der langen Dauer der Versuche (mit Corona-Pause) wurde eigens ein Schaltschrank gebaut (Abbildung 27).

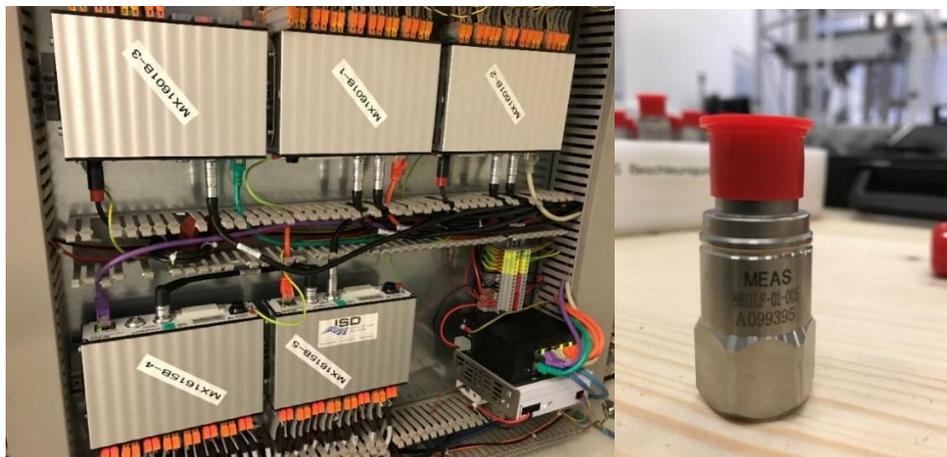


Abbildung 27: links: ISD-Schaltschrank für die Messtechnik; rechts: eingesetzter MEAS-Beschleunigungssensor



Abbildung 28: Instrumentierung auf der Unterseite der BSP mit 30 Beschleunigungssensoren

In den Varianten 1a bis 4a wurden verschiedene Arten der Befestigung der BSP-Platte auf den Auflagern (direkte Verschraubung/Winkel) - kombiniert mit unterschiedlichen Verbindungen (Koppelbrett/Stufenfalz) der über einen Breite von 3 m in der Mitte gestoßenen BSP-Platte - dynamisch untersucht. Als Beispiel ist in Abbildung 29 Variante 1a dargestellt. In der Variante 4b wurde ein Akustiklager zwischen Platte und Auflager eingebaut, welches die gesamte Auflagerfläche an beiden Auflagern abdeckt (Abbildung 30).

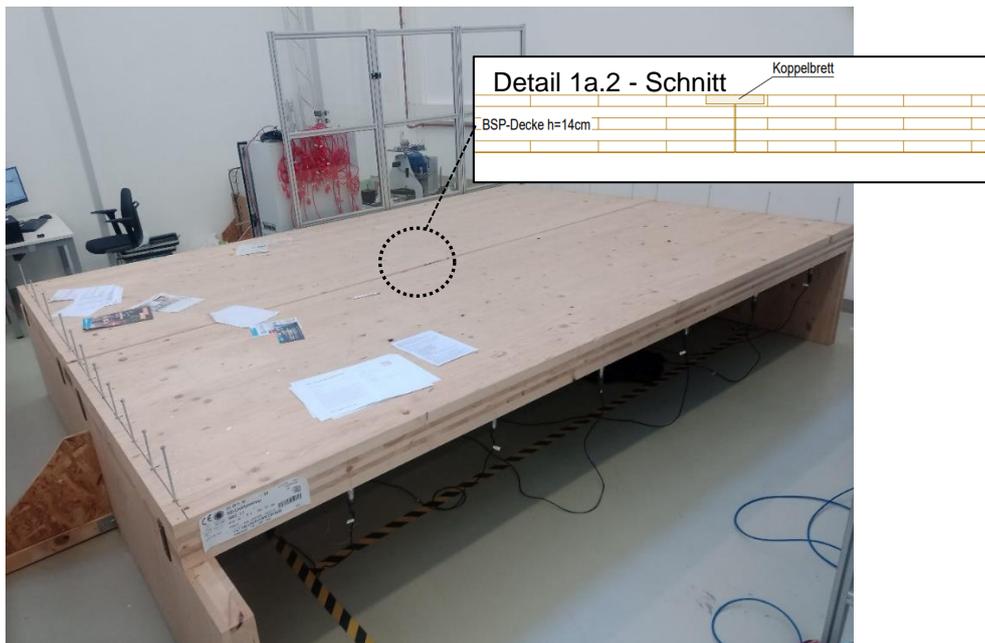
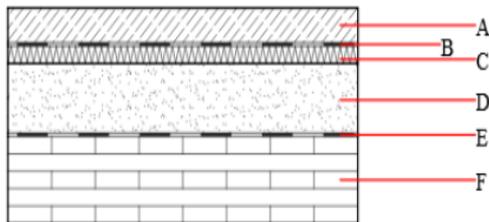


Abbildung 29: Variante 1a - direkte Verschraubung am Auflager, Koppelbrett unvernagelt



Abbildung 30: Variante 4b – Winkelverbindung, Decke mit Akustiklager (gelb) unten, Stufenfalz verschraubt

In Variante 4c wurde die Entkopplung von Platte und Auflagern mit Lagern verschiedener Hersteller verglichen. Es folgen weitere Varianten, die im Anhang zeichnerisch dargestellt sind. Die Varianten 7 bis 10 betreffen den zweigeschossigen Versuchsstand. In den Varianten 11 bis 12b kommt zum zweigeschossigen Aufbau ein ca. 325 mm starker Bodenaufbau dazu, der in Abbildung 31 beschrieben ist.



	Dicke in mm	Baustoff
A	50	Zementestrich
B	0,2	Trennschicht Kunststoff
C	40	Dämmung
D	95	Splittschüttung, elastisch gebunden
E	0,2	Rieselschutz
F	140	Brettsper Holz
Summe	325,4 mm	



Abbildung 31: Bodenaufbau für die Varianten 11, 12a, 12b



Abbildung 32: Variante 12b mit Trockenbauwand – Sensoren auf Estrich platziert

3.3 Modalanalysen

Das methodische Werkzeug zur Bewertung der verschiedenen Varianten ist auch hier die Modalanalyse. Alle Ergebnisse wurden mit Methoden der betrieblichen Modalanalyse erzeugt. Dabei kamen einerseits die FDD für die Bestimmung der Dämpfung und andererseits die Kombination aus der Berechnung des ersten Singulärwertverlaufs mit der sogenannten Peak-Picking-Methode zum Einsatz. Dabei werden die lokalen Maxima des Singulärwertverlaufs als Eigenfrequenzen des Systems interpretiert. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

3.3.1 Eigenfrequenzen

3.3.1.1 Referenzkonfiguration

In der eingeschossigen Referenzkonfiguration sind sämtliche Konstruktionselemente unverbunden: Die BSP-Platte ist auf die Auflager gelegt und das Koppelbrett ohne Verbindungselemente formschlüssig in die Stoßfuge eingelegt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Durch das Einlegen des Koppelbretts sollte das Gesamtgewicht der Decken vervollständigt werden ohne eine systembeeinflussende Verbindung herzustellen.

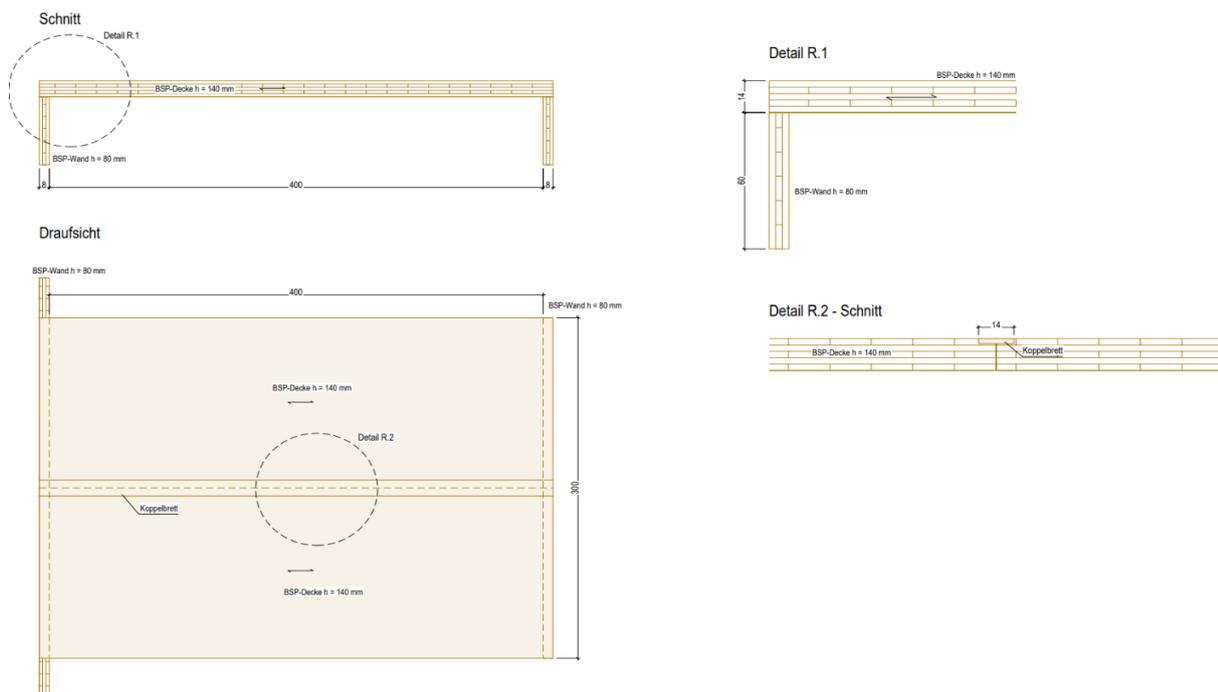


Abbildung 33: Zeichnerische Darstellung der Referenzkonfiguration mit aufgelegter BSP-Platte und eingelegtem Koppelbrett (ohne Verbindung)

Die FE-Modellierung und –analyse der Referenzkonfiguration ergibt die folgenden Eigenfrequenzen und –formen (Abbildung 34). Sie dienen als Interpretationshilfe für die Frequenzanalysen der folgenden Kapitel. Die Kopplung der BSP-Platte an den Auflagern wurde als gelenkig angenommen. Die ersten vier Lösungen können direkt

den ersten vier Peaks des Singulärwertverlaufs der Abbildung 35 zugeordnet werden. Die Abweichungen zwischen Modell und Messung gibt Tabelle 6 wieder.

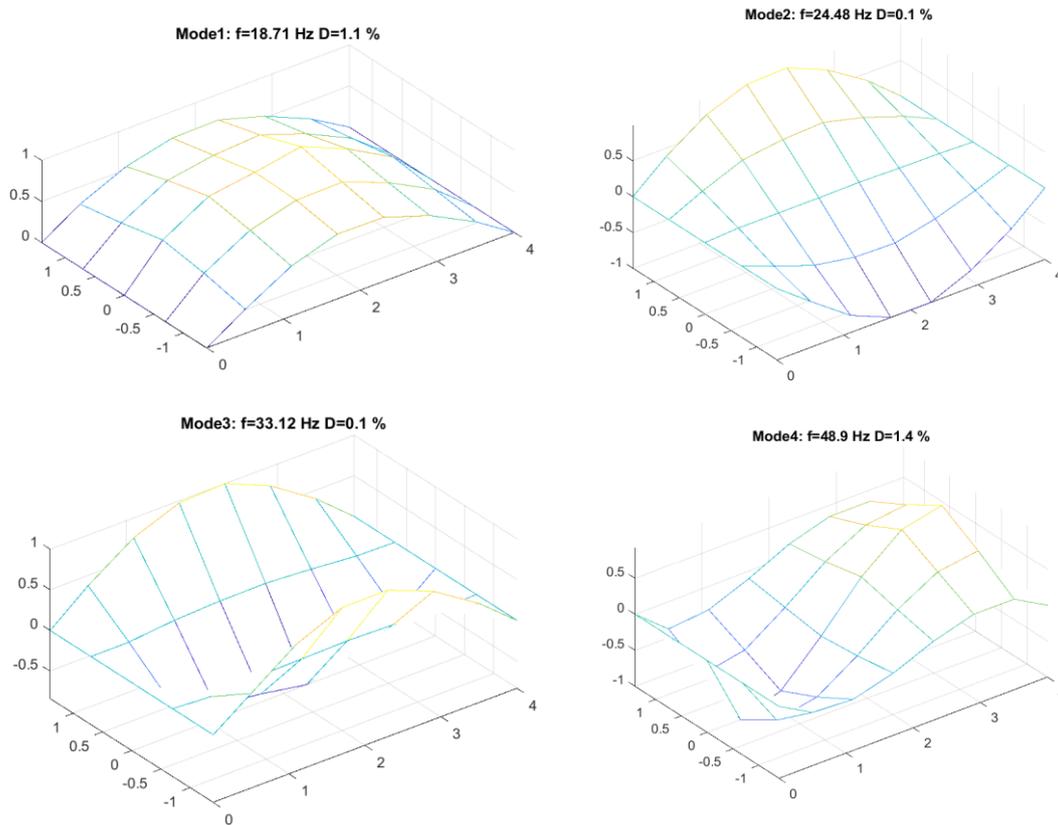


Abbildung 34: Modalanalyse mit FE–Ergebnisse für die ersten vier Modalformen

Für die Praxis dürften vor allem die beiden Biegemoden 1 und 4 die relevanten Größen darstellen, da die Torsionsmoden baupraktisch durch die Verbindung der Deckenelemente untereinander und vor allem durch den z. T. steifen Aufbau darüber (Estrich) sehr stark behindert sein dürften. Die Biegemoden zeigen Dämpfungen bei knapp über einem Prozent, die Torsionsmoden sind deutlich schwächer gedämpft.

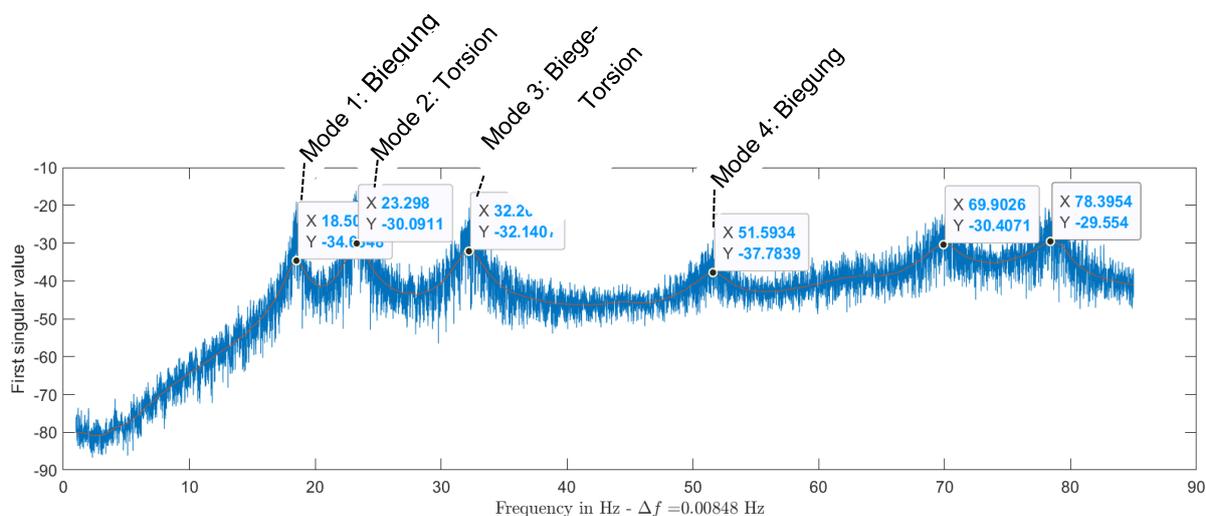


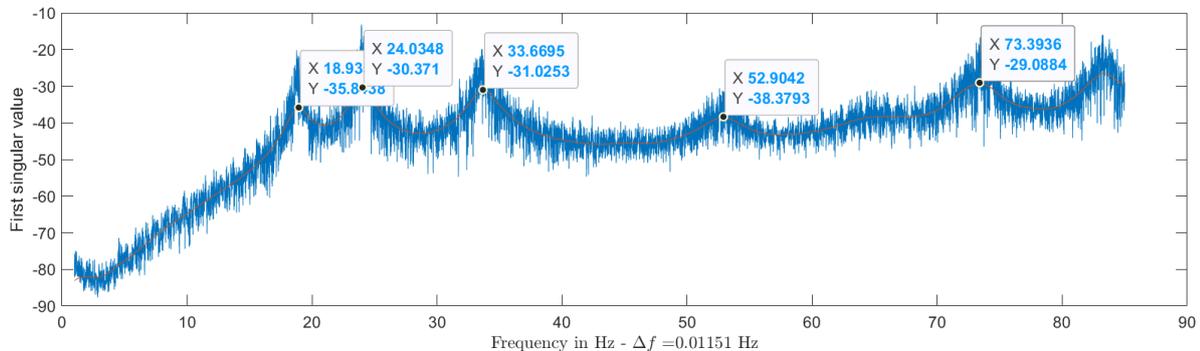
Abbildung 35: Singulärwertverlauf für Variante 1 (Referenzkonfiguration), unverschraubt, ohne Koppelbrett

Tabelle 6: Vergleich der Eigenfrequenzen aus Messungen und aus FE-Modellierung;
Teststand

	Mode 1 Hz	Mode 2 Hz	Mode 3 Hz	Mode 4 Hz
aus Messung	18,5	23,3	32,2	51,6
FE-Modell	18,7	24,5	33,1	48,9
Abweichung zur Messung in %	1,0	5,2	2,8	9,5

3.3.1.2 Konfigurationen mit Befestigungsvarianten

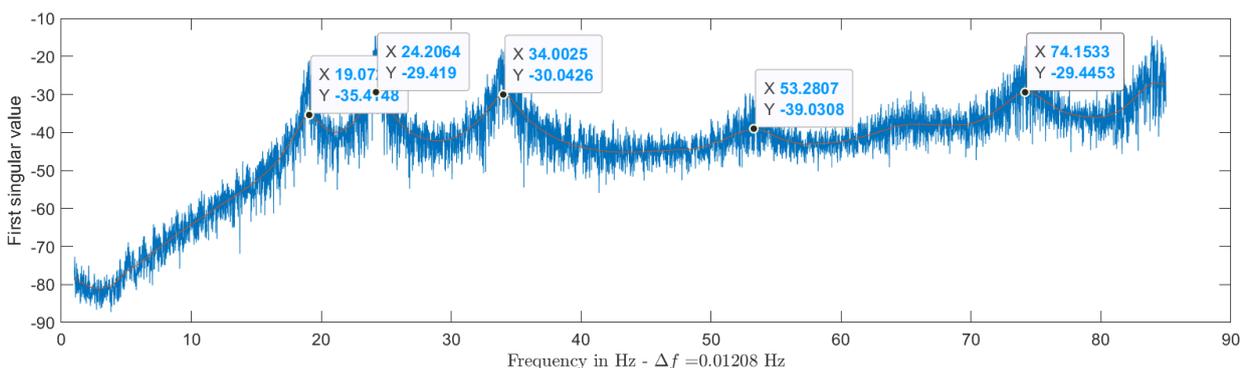
Vergleicht man die Eigenfrequenzen der verschiedenen Varianten 1a, 1b und 1c (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Abbildung 38), so stellt man nur geringfügige Unterschiede fest. Mit dichterem Schraubenabstand und zusätzlicher Vernagelung des Koppelbretts erhöhen sich die Eigenfrequenzen leicht. Insgesamt liegen die Eigenfrequenzen aller drei Varianten etwas über denen der Referenzkonfiguration, was an der steiferen Verbindung durch die Verschraubungen an den Auflagern liegt. Der Einfluss der Verschraubung ist baupraktisch unbedeutend. Dies scheint interessanterweise auch für den Einfluss der Vernagelung des Koppelbretts zu gelten: Selbst die „Schmetterlings-Torsion“ der Mode 3 erfährt keine



signifikante Veränderung.

Abbildung 36: Singulärwertverlauf für Variante 1a - direkte Verschraubung an den Auflagern, (Abstand 400 mm), Koppelbrett unvernagelt

Abbildung 37: Singulärwertverlauf für Variante 1b - direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Koppelbrett unvernagelt



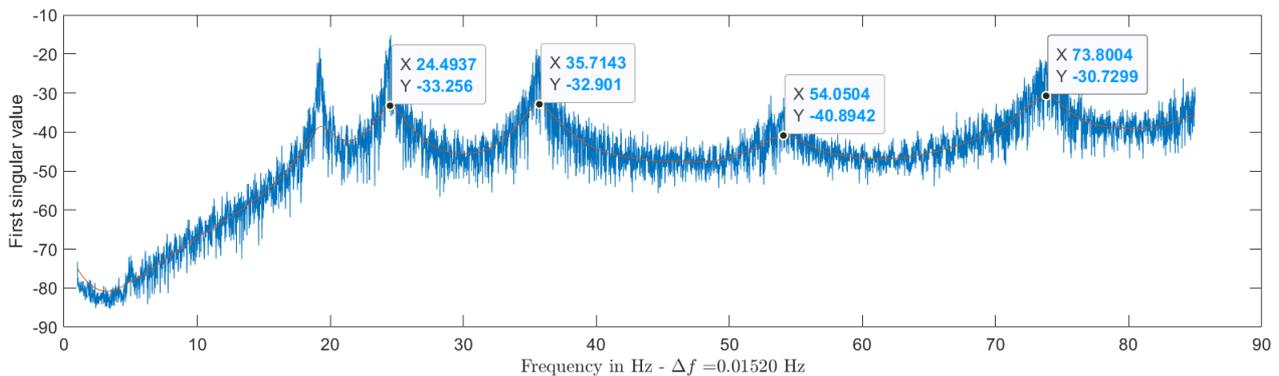


Abbildung 38: Singulärwertverlauf für Variante 1c - direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Koppelbrett vernagelt

3.3.1.3 Konfigurationen mit verschiedenen akustischen Lagern

In den Konfigurationen der Variante 4c mit Akustikwinkeln verschiedener Hersteller, platziert zwischen der BSP-Platte und den Auflagern, zeigen sich ebenfalls nur geringe Unterschiede im Eigenschwingungsverhalten, wie in Abbildung 39 bis Abbildung 41 abzulesen ist. Es ist davon auszugehen, dass es keine Unterschiede in der akustischen Wirkung der Herstellervarianten gibt. Die Lagerung der Decke auf den Akustiklagern führt insgesamt zu etwas niedrigeren Eigenfrequenzen im Vergleich mit der Referenzkonfiguration. Dieses Ergebnis ist plausibel, da durch das flächig auf den Auflagern aufgelegte Akustiklager eine - im Verhältnis zu den angrenzenden Elementen aus Holz – weichere Zwischenschicht eingefügt wird, die eine stärkere Bewegung an den Auflagern zulässt.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass BSP-Decken, die direkt durch eine BSP-Wand belastet werden und die direkt auf einer BSP-Wand aufliegen, eine gewisse Einspannung erfahren. Die Größe der Einspannung dürfte dabei von vielen Faktoren abhängen, z. B. von der Wandstärke, der Auflast und der Rotationsanfälligkeit der Deckenränder, die wiederum abhängig von der Deckenspannweite, Deckensteifigkeit und der Deckenaufast ist. Akustisch wirksame Elastomerlager haben neben ihren positiven Effekten zur Unterbrechung von Nebenschallwegen in der Konstruktion eine leichte Verschlechterung im Schwingungsverhalten zur Folge: Die Einspannung der Decke wird durch die Elastomere reduziert, die Deckeneigenfrequenz sinkt also.

Dieser Einfluss zeigt sich auch an einer anderen Stelle: Eins der drei akustisch-wirksamen Elastomerlager (Rothoblaas) hatte eine Stärke von nur 6,25 mm (anstatt von 12,5 mm). Demnach wird durch den Lagereinbau der Einspannungsanteil am Deckenlager nicht ganz so weit reduziert, wie bei stärkeren Lagern.

Insgesamt kann aber festgestellt werden, dass der Einbau von akustisch wirksamen Lagern nur einen irrelevanten negativen Einfluss auf das Schwingungsverhalten von Decken hat. Das gilt insbesondere für die Varianten durch den Einbau der Produkte unterschiedlicher Lagerhersteller und auch für die Lagerstärke.

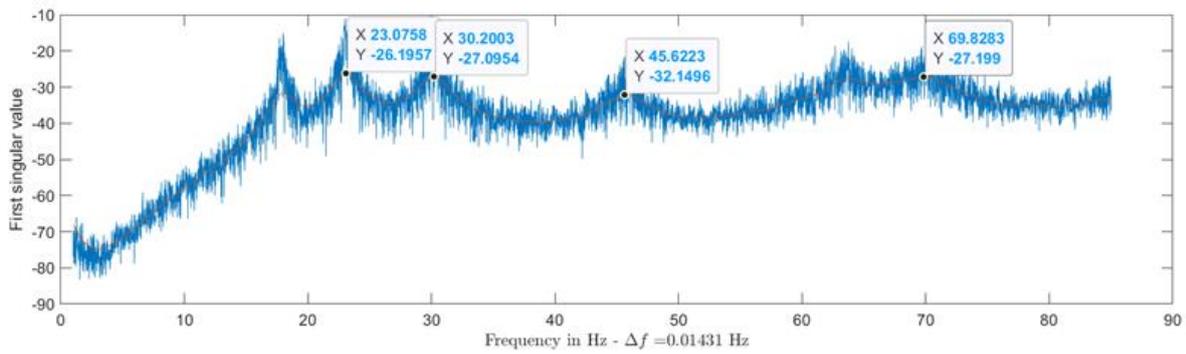


Abbildung 39: Singulärwertverlauf für Variante 4c - Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt – Getzner

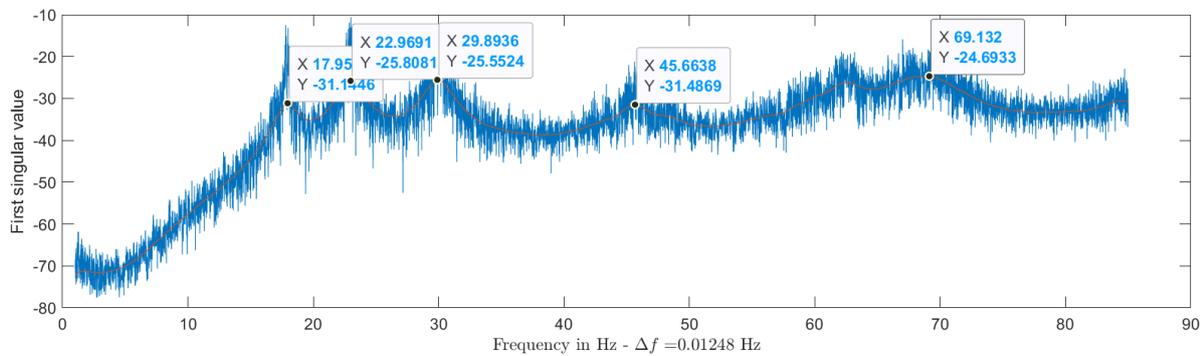


Abbildung 40: Singulärwertverlauf für Variante 4c - Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt – Regupol

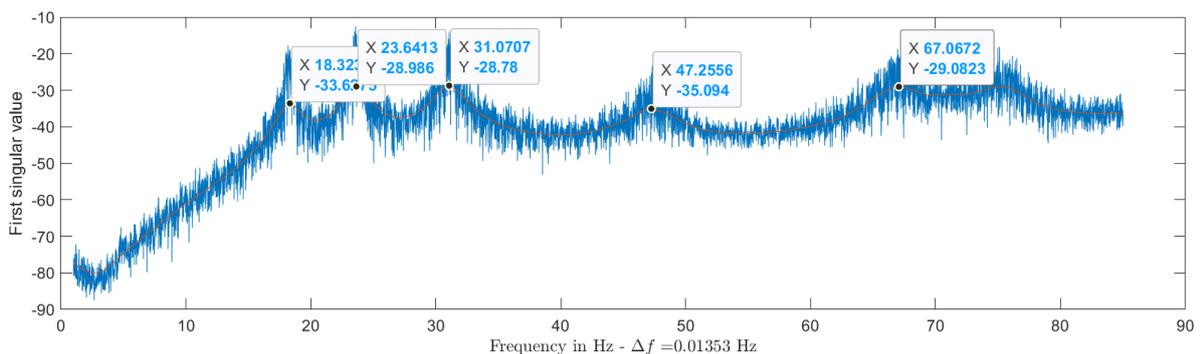


Abbildung 41: Singulärwertverlauf für Variante 4c - Winkelverbindung an den Auflagern, teilvernagelt (Abstand 1000 mm), Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt – Rothblaas

3.3.1.4 Schwingungsverhalten von BSP-Platte und Estrich

Von besonderem Interesse ist die Fragestellung, inwieweit ein typischer Bodenaufbau aus elastisch gebundener Splittschüttung, Dämmung und Zementestrich (genauer Aufbau – s. Abbildung 31) das Eigenschwingungsverhalten der BSP-Decke verändert

und inwieweit das Schwingungsverhalten des Zementestrichs mit dem der Holzdecke gekoppelt ist. Es ist bekannt, dass der Zementestrich zusammen mit der Schüttung zu einer deutlichen Verbesserung des Schallschutzes, insbesondere im störenden tieffrequenten Bereich, führt. Offen ist bisher die Fragestellung, wie stark die beiden Elemente BSP-Decke und Bodenaufbau zusammenwirken. Dies wird hier anhand des zweigeschossigen Aufbaus untersucht. In der Konfiguration der Variante 10 gibt es auf den beiden BSP-Platten (unten und oben) nach Abbildung 26 noch keinen Bodenaufbau. Aus dem Singulärwertverlauf nach Abbildung 42 lassen sich die Eigenfrequenzen 20,2 Hz, 24,8 Hz und 34,2 Hz identifizieren. Die Identifikation der ersten Eigenfrequenz (20,2 Hz) ist jetzt mit einer größeren Unsicherheit behaftet (fehlender Marker in Abbildung 42, da kein eindeutiger Peak identifiziert wurde) – verglichen mit der Identifikation bei der Referenzkonfiguration ().

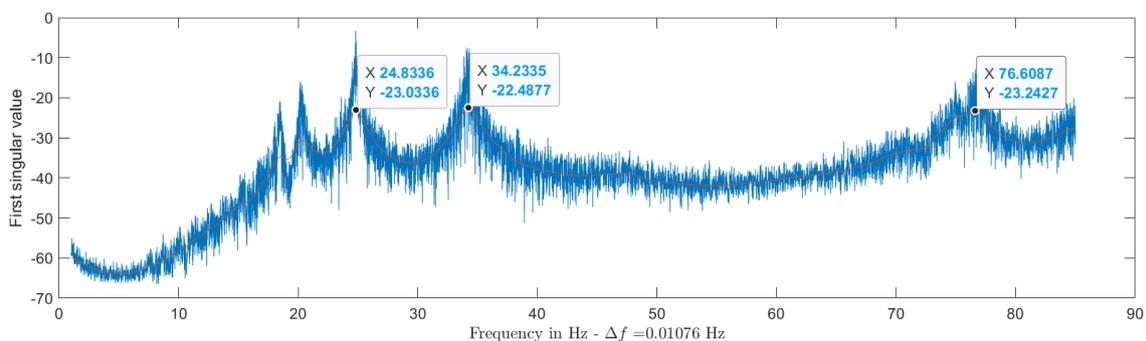


Abbildung 42: Singulärwertverlauf für Variante 10 - oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke

Nach Aufbringen der Bodenaufbauten (Abbildung 31) und anschließender Platzierung der Sensoren auf der Unterseite der BSP-Platte des unteren Geschosses ergibt sich ein gegenüber der Variante 10 (Abbildung 42) stark veränderter Singulärwertverlauf nach Abbildung 43. Die Dämpfung ist jetzt deutlich erhöht, sodass ein Peak-Picking kaum noch möglich ist. Die Eigenfrequenzen 14,7 Hz (1. Torsionsmode) und 30,2 Hz können aber ausgelesen werden. Die Eigenfrequenz zum Torsionsmode ist um rund 10 Hz gesunken. Der zweite Wert (30,2 Hz) lässt sich nicht mehr eindeutig einer Eigenfrequenz im Vergleich mit Abbildung 42 zuordnen. Der 1. Biegemode taucht als Doppel-Peak bei einem Wert von ca. 10 Hz (ohne Marker in Abbildung 43) auf. Das Absinken der ersten Eigenfrequenzen resultiert aus der Zusatzmasse durch den Bodenaufbau. Die deutliche Erhöhung der Dämpfung hat zwei Ursachen: Zum einen treten Material- und Reibungsdämpfung in der gebundenen Schüttung, der darüber liegenden Dämmung und an allen Schichtübergängen auf. Zum anderen schwingen der oben liegende Zementestrich und die unten liegende BSP-Platte nicht perfekt in Phase, wie ein Vergleich zwischen Abbildung 43 und dem Identifikationsergebnis bei Platzierung der Sensoren auf dem Zementestrich (Abbildung 44) zeigt. Im letzten Fall wird das dynamische Verhalten der Estrichplatte gemessen. Das Peak-Picking liefert jetzt keine Ergebnisse mehr; stattdessen steigt der Singulärwert mit zunehmender Frequenz an. Das lässt darauf schließen, dass die Trägheitskräfte des Bodenaufbaus den Schwingungen der BSP-Platte entgegenwirken und diese „bremsen.“

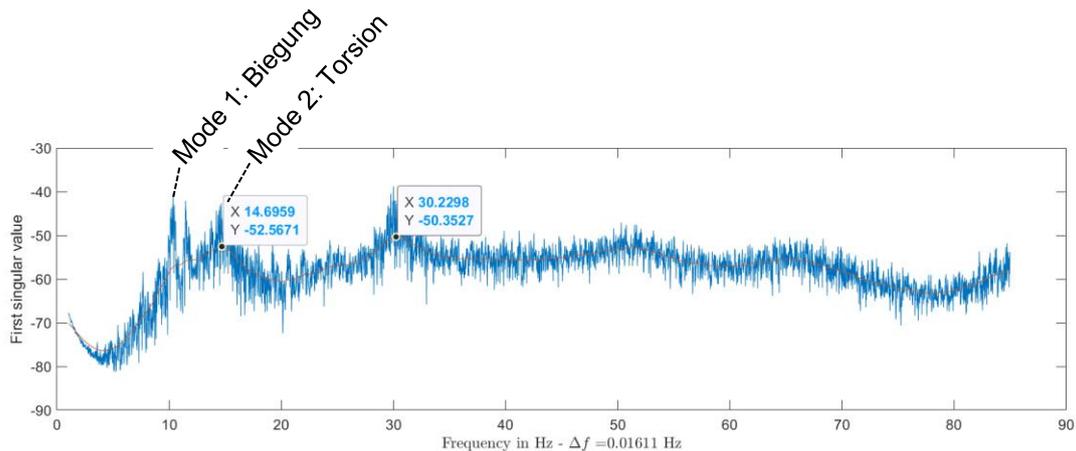


Abbildung 43: Singulärwertverlauf für Variante 11 - oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke, Bodenaufbauten - Sensoren auf BSP-Platte

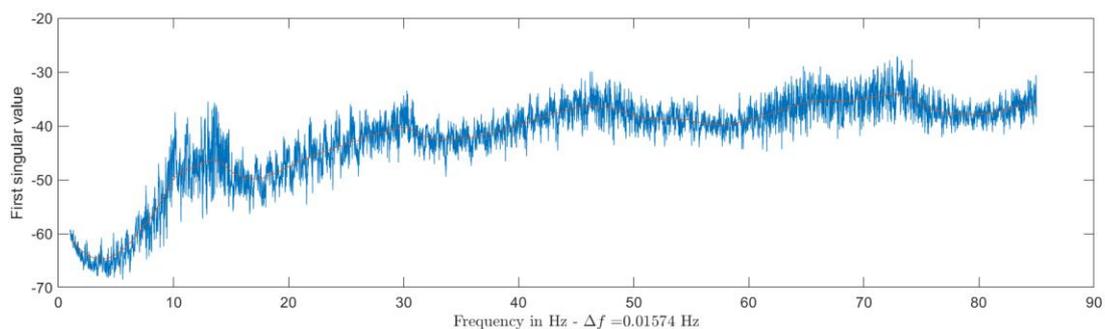


Abbildung 44: Singulärwertverlauf für Variante 11 - oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt, Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke, Bodenaufbauten – Sensoren auf Estrich

3.3.1.5 Einfluss von seitlichen Auflagerwänden und Zwischenwänden

Insbesondere im Wohnungsbau besteht das Deckensystem selten aus einem ungestört schwingenden Einfeld-System. In aller Regel gibt es mindestens an den Gebäudeseiten Seitenauflager, ggf. sogar innerhalb des Gebäudes. Diese Querwände haben einen erheblichen Einfluss auf das Schwingungssystem Decke und wirken sich in aller Regel positiv aus – durch eine Erhöhung der Eigenfrequenz und möglicherweise auch durch eine Erhöhung der Dämpfung.

Um den Einfluss von Wänden, die auf der 4 m x 3 m großen Deckenplatte am Rand platziert werden, zu analysieren, ist es sinnvoll zunächst den eingeschossigen Aufbau ohne Bodenaufbauten zu betrachten. Hier wurden drei Varianten (s. Kapitel 7, Aufbau 5, 6 und 7) untersucht. Es zeigt sich in allen Fällen, dass im Vergleich mit der Referenzkonfiguration die Eigenfrequenzen deutlich ansteigen. Dieser Effekt ist am größten, wenn die seitliche Wand mit der darunterliegenden BSP-Platte verschraubt

wird, wie in Tabelle 7 zu sehen ist. Die Erhöhung der Eigenfrequenzen (und damit die zusätzliche Versteifung der Konstruktion) beträgt in diesem Fall rund 40 bis 50 % und ist somit erheblich. Abbildung 45 bis Abbildung 47 zeigen die Einzelergebnisse der Identifikation.

Tabelle 7: Einfluss von seitlichen Auflagerwänden beim eingeschossigen Aufbau

	Mode 1 Hz	Mode 2 Hz	Mode 3 Hz	Mode 4 Hz
Referenzkonfiguration	18,5	23,3	32,2	51,6
Variante 5	21,9	29,2	40,6	62,6
Variante 6 - unverschraubt	20,1	28,6	46,9	62,8
Variante 6 - verschraubt	25,4	34,8	-	77,0
Abweichung Variante 6 - verschraubt – Referenz in %	37,3	49,4	-	49,2

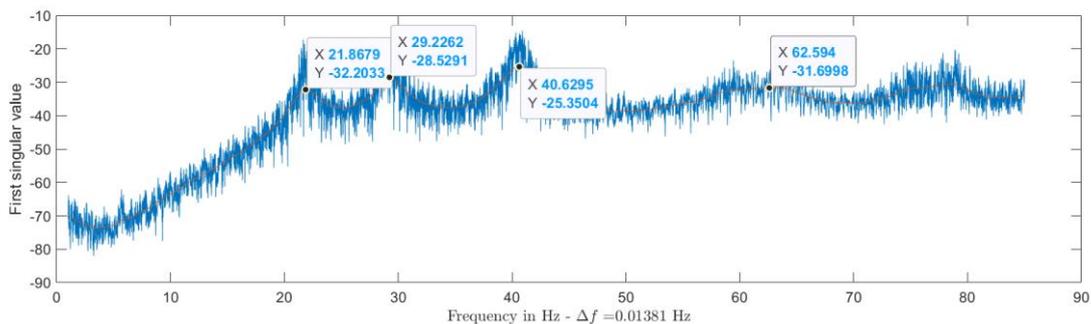


Abbildung 45: Singulärwertverlauf für Variante 5 - direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt, zusätzliche nicht verschraubte dritte Wand um 20° gedreht

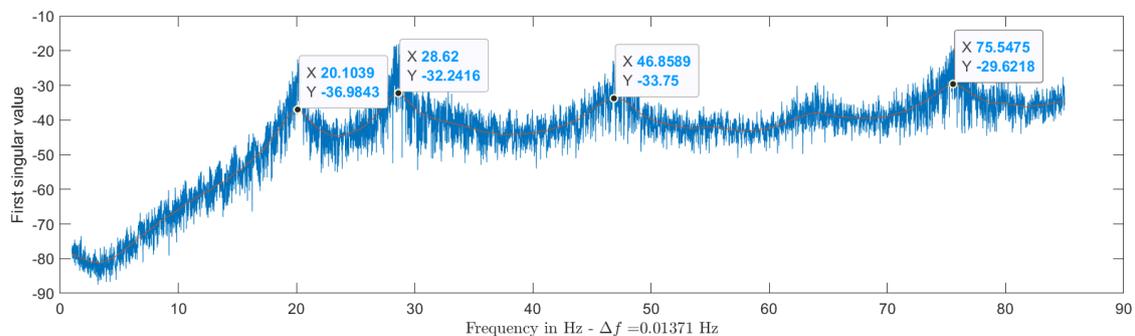


Abbildung 46: Singulärwertverlauf für Variante 6 - direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt, zusätzliche nicht verschraubte dritte Wand

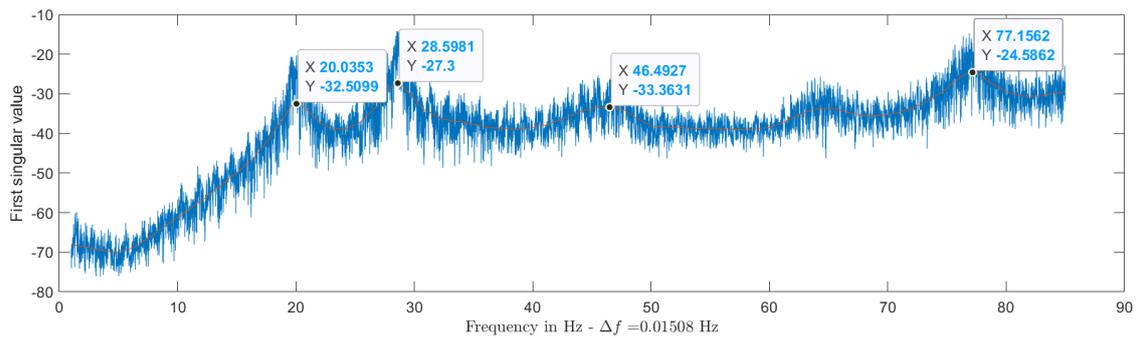


Abbildung 47: Singulärwertverlauf für Variante 6 - direkte Verschraubung an den Auflagern (Abstand 200 mm), Stufenfalz verschraubt, zusätzliche verschraubte dritte Wand

Im zweigeschossigen Versuchsaufbau (mit Bodenaufbau) eingebrachte zusätzliche Zwischenwände (Varianten 12a und 12b) beeinflussen das Schwingungsverhalten dagegen kaum. Dabei ist es unerheblich, ob die Wände auf den Estrich gestellt oder dieser eingefräst wird und die Wände bis unten auf die BSP-Platte geführt werden. Auf eine Darstellung der Ergebnisse wurde an dieser Stelle verzichtet.

3.3.2 Dämpfungen

Abschließend soll die wichtige Frage nach den messtechnisch ermittelten Dämpfungen behandelt werden. Sie wurden mittels betrieblicher Modalanalyse mit der FDD identifiziert. Verglichen mit der Identifikation von Eigenfrequenzen und Eigenformen werden die frequenzabhängigen (modalen) Dämpfungen grundsätzlich mit höherer Unsicherheit berechnet, welches sich in einer größeren Streuung dieser Werte zeigt. Für die Dämpfung gilt, dass sie mit der Zunahme von der Amplitude und/oder der Frequenz ansteigt. Die in Tabelle 8 angegebenen Ergebnisse stellen Mittelwerte für die wichtigen ersten beiden Moden (1. Biegemode und 1. Torsionsmode) dar, die in der Praxis besonders leicht angeregt werden. Es zeigt sich, dass bei den meisten Aufbauvarianten die Dämpfung zwischen 1 und 2 % liegt. Bei der Variante 4c ergab sich aufgrund der vollflächig auf den Auflagern aufliegenden Akustiklager, die eine stärkere Bewegung zulassen, eine höhere Dämpfung. Werden diese Auflagerbereiche verschraubt (ab Variante 5) sinkt die Dämpfung um ca. 1 %. Eine deutlich erhöhte Dämpfung wurde bei den Varianten am zweigeschossigen Versuchsstand mit Bodenaufbauten auf beiden Ebenen gemessen. Diese deutliche Zunahme der Dämpfung lässt sich auf die bereits genannte Material- und Reibungsdämpfung in der gebundenen Schüttung, der darüber liegenden Dämmung und an den Schichtübergängen des Bodenaufbaus zurückführen. Aber auch die ebenfalls bereits erwähnte Phasenverschiebung der Schwingungen zwischen der BSP-Platte und Zementestrich resultiert in einer zusätzlichen (Schein-)dämpfung, die die Schwingamplituden reduziert. In Abbildung 48 sind die Ergebnisse der Auswertung der modalen Dämpfungsmaße für die Varianten 6 bis 12b dargestellt. Hier sieht man den großen Unterschied in der Streuung der modalen Dämpfungen beim Übergang von Variante 10 (ohne Bodenaufbau) zu 11 (mit Bodenaufbau). Die starke Zunahme

der Streuung für die Varianten mit Bodenaufbau lässt sich auf die insgesamt höhere Dämpfung und auf das Vorhandensein von Nichtlinearitäten zurückführen. Weiter fällt auf, dass die 1. Torsionsmode („Mode2“ in Abbildung 48) mit 4,5 bis 6 % die höchsten Dämpfungswerte aufweist.

Tabelle 8: Mittelwerte für Lehrsche Dämpfungsmaße

	Lehrsches Dämpfungsmaß D in %
Varianten 1 bis 4b, 5 bis 10	$1 \leq D \leq 2$
Varianten 4c	$D \geq 2$
Varianten 11 bis 12b	$D \geq 4$

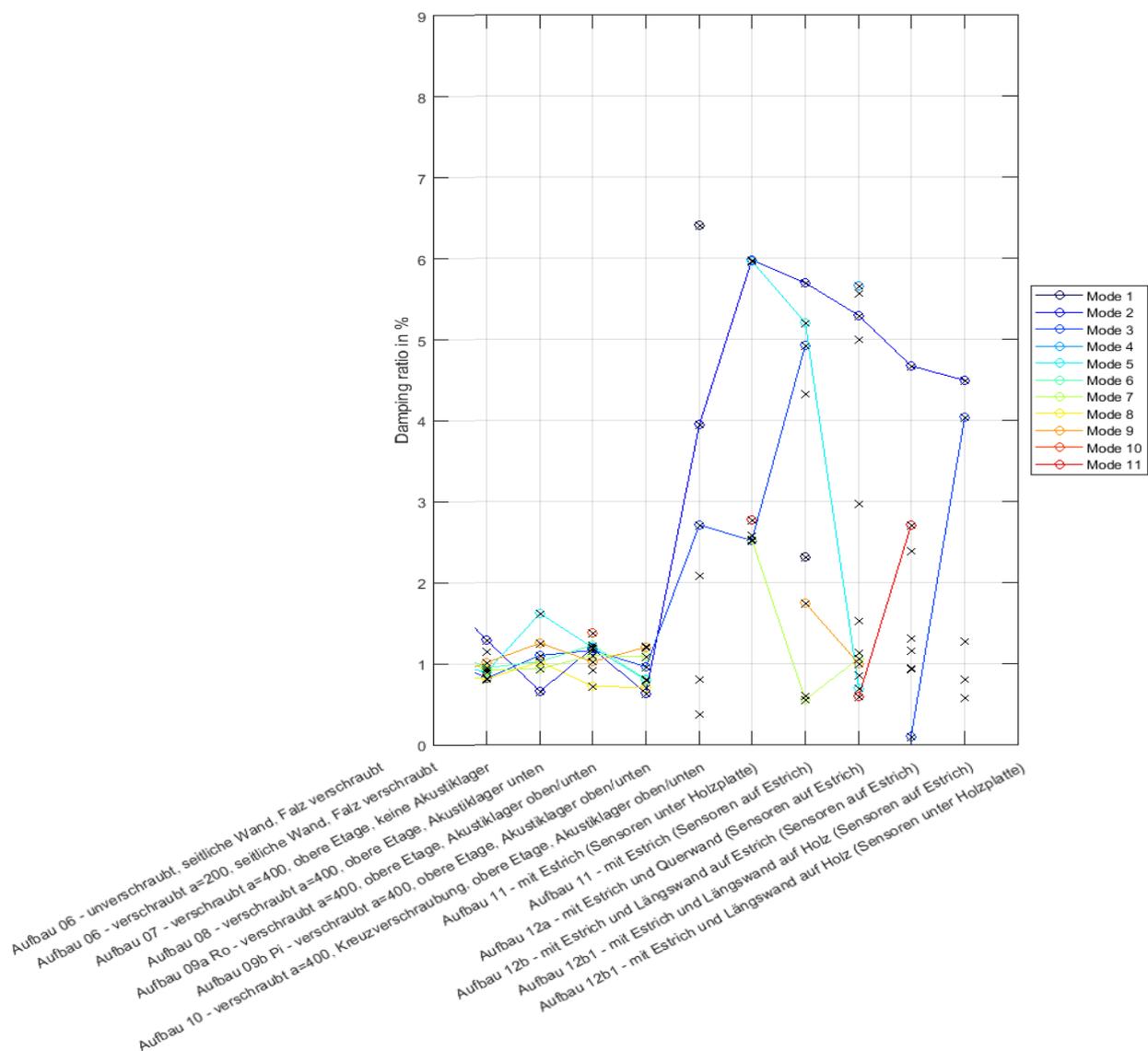


Abbildung 48: Identifizierte modale Dämpfungen der Varianten 6 bis 12b

3.4 Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse aus den Labormessungen werden im Folgenden zusammengefasst.

Versuchsstand und Messkonzept:

- Der Versuchsstand der LUH kann bezüglich seiner Abmessungen und seinem Schwingungsverhalten (Eigenfrequenzen sind typisch für Decken im Bestand) als Modellversuchsstand dienen, um ähnliche Versuche zu wiederholen.
- Das messtechnische Versuchskonzept mit hoher Abtastfrequenz (1 kHz), Beschleunigungsmessungen in guter räumlicher Auflösung (30 Sensoren), langen Messzeitreihen (72 s) und einer Vielzahl von Hammerimpulsen (rund 10 bis 20 pro Zeitreihe) hat sich als geeignet erwiesen. Da viele Versuchswiederholungen (einzelne Hammerschläge) bereits in eine Zeitreihe integriert sind, erhöht dies die Zuverlässigkeit der Auswertung, wenn sämtliche Auswertungen auf die komplette Zeitreihe angewendet werden.

Ergebnisse zu Eigenfrequenzen und Dämpfungen:

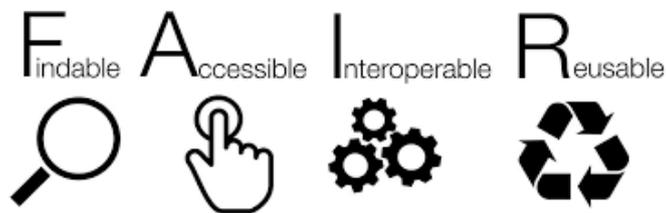
- Bei Verschraubungen der BSP-Platte an den Auflagern und Befestigungen des Koppelbretts erhöhen sich die Eigenfrequenzen nur leicht.
- Zwischen Auflager und BSP-Platte vollflächig verlegte Akustiklager führen zu einer leichten Absenkung der Eigenfrequenzen.
- Beim Vergleich dreier Herstellervarianten von Akustiklagern haben sich keine Unterschiede ergeben.
- Bringt man auf eine BSP-Platte einen typischen Bodenaufbau aus elastisch gebundener Schüttung, Dämmung und Zementestrich auf, sinken die ersten Eigenfrequenzen (1. Biegung und 1. Torsion) der BSP-Platte signifikant – hier um rund 10 Hz – ab. Die BSP-Platte und die oberliegende Estrichplatte schwingen nicht genau in Phase. Misst man auf dem Estrich, lassen sich aus den Schwingungen der Estrichplatte keine eindeutigen Eigenfrequenzen mehr identifizieren.
- Das Verhalten von BSP- und Estrichplatte ist aus dynamischer Sicht und mit Blick auf die Anwendung in der Praxis insgesamt als günstig zu betrachten. Die hohe Dämpfung und die zusätzliche Trägheit (Zusatzmasse von Schüttung und Estrich) mindern die Schwingamplituden der Platte. Dieser Effekt überkompensiert die (eher ungünstige) Absenkung der ersten Eigenfrequenzen. Die hier beobachtete Absenkung um rund 10 Hz würde in der Praxis auch geringer ausfallen, was daran liegt, dass der Bodenaufbau im Laborversuch nicht im Verhältnis zur nur 14 cm hohen BSP-Platte runterskaliert, sondern in voller Höhe (wie auch bei realen Decken in Gebäuden) aufgebracht wurde. Folglich ist der Massenzuschlag im Verhältnis zur Masse der BSP-Platte zu groß. Im Laborversuch hatte dies aber den Vorteil, dass man den Einfluss des Bodenaufbaus auf das Schwingungsverhalten der darunterliegenden Platte aus BSP deutlich herausarbeiten konnte.

- Werden seitliche Auflagerwände in die Konstruktion ohne Bodenaufbau eingefügt und an ihrem oberen und unteren Ende über Verschraubungen an die Platten gekoppelt, erhöhen sich die Eigenfrequenzen signifikant. Bei Vorhandensein des Bodenaufbaus konnte dagegen kein Einfluss der Zwischenwände festgestellt werden.
- Es zeigt sich, dass bei den meisten Varianten die Dämpfung zwischen 1 und 2 % liegt. Bei der Variante 4c ergab sich aufgrund der vollflächig auf den Auflagern liegenden Akustiklager eine höhere Dämpfung. Werden diese Auflagerbereiche verschraubt (ab Variante 5) sinkt die Dämpfung um ca. 1 %. Eine deutlich erhöhte Dämpfung wurde bei den Varianten am zweigeschossigen Versuchsstand mit Bodenaufbauten (Variante 11 und folgende) auf beiden Ebenen gemessen. Der 1. Torsionsmode wird hier besonders gut bedämpft. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da in der Praxis Torsionsbewegungen grundsätzlich eine geringe Dämpfung aufweisen und daher leicht angeregt werden können.

4 Konzept zur ingenieurpraktischen Umsetzung

Ziel von AP 5 ist die Überführung der Projektergebnisse in die ingenieurpraktische Anwendung. Dazu werden technische Empfehlungen erarbeitet und über das Forschungsdatenrepositorium der Leibniz Universität Hannover Projektergebnisse und Rohdaten in digitaler Form bereitgestellt und zum Download angeboten. Dabei wurde ein Datenablagekonzept entwickelt, das den FAIR-Prinzipien der LUH genügt:

- F - findable (auffindbar)
- A - accessible (zugänglich)
- I - interoperable (kompatibel zu anderen Systemen)
- R - reusable (nachnutzbar)



Im Ergebnis dieses Arbeitspakets werden Planungshilfen gegeben, die für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, für die qualifizierte Komfortbewertung und die Modellierung und Analyse mit FE nützlich sind. Die zu veröffentlichenden Daten betreffen:

1) FE-Modellierung:

- lokale Steifigkeiten und Steifigkeitsverteilungen für Wand- und Deckenelemente,
- Verbinder, Anschlüsse Wand-Decke, Übergangsbedingungen,
- Ergebnisse aus Modalanalysen (FE-Analyse).

2) Vereinfachte Rechenmodelle:

- Identifikation von parametrisierten Zustandsraummodellen,
- Ermittlung von Übertragungsfunktionen,
- Ergebnisse aus Modalanalysen (OMA/EMA).

2) Gebrauchstauglichkeits- und Komfortbewertung:

- KB-Wert-Bestimmung aus Messdaten,
- KB-Wert-Bestimmung aus Simulationsdaten.

Über die Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift werden die zum Open Access freigegebenen Daten beschrieben sowie Zugang und URL zum Forschungsdatenrepositorium der Leibniz Universität publiziert:

https://data.uni-hannover.de/datasets_dbh

5 Fazit

Das Forschungsvorhaben liefert wichtige Erkenntnisse zum Schwingungsverhalten von mehrstöckigen Gebäuden in BSP-Bauweise. In einem eigens im Vorhaben entworfenen Versuchsstand konnten weitere Detailfragen zum Einfluss von Verbindungsmitteln und einem typischen Bodenaufbau aus Schüttung, Dämmung und Zementestrich auf Eigenfrequenzen und Dämpfungen geklärt werden.

Die BSP-Decken im Rohbauzustand der im Forschungsvorhaben untersuchten Gebäude wiesen hohe erste Biegeeigenfrequenzen auf. Auch die in-situ-Messungen mit Bodenaufbau zeigten Schwingungszustände, die im Rahmen des Konzepts der Hochabstimmung als gut bewertet werden können. Der Komfort ist bei allen gemessenen Decken (noch) gewährleistet ($KB_{F_{max}}$ -Werte sind eingehalten). Allerdings ist davon auszugehen, dass bei höheren Gebäuden mit mehr Vollgeschossen zunehmend eine Schwingungsproblematik auftreten könnte. Sie wird dadurch verursacht, dass die aufgehenden Wände bei der Bauweise in BSP verformbarer und infolge ihrer geringeren Trägheit leichter dynamisch anregbar sind als Wände in Massivbauweise. Die Konsequenz ist, dass das gesamte Gebäude bei Anregung von außen mit „räumlichen Schwingungszuständen“ antwortet, was bedeutet, dass höherliegende Decken tendenziell größere resultierende Schwingamplituden und damit ungünstigere KB-Werte als weiter untenliegende haben. Dieser Problematik kann dadurch begegnet werden, dass auf eine gute Aussteifung des Gebäudes (insbesondere der Wände) über die gesamte Höhe geachtet wird. Um die zu erwartenden Schwingamplituden und KB-Werte für hohe Gebäude zu prognostizieren, bieten sich FE-Modelle an. Schon eine Modellierung der BSP-Decken als homogenes und isotropes Material unter Verwendung ideeller Querschnittswerte hat sich dabei als hinreichend brauchbar erwiesen. Dies führte dennoch teilweise zu deutlichen Abweichungen von den aus Messungen identifizierten Eigenfrequenzen. Trotzdem wird diese Vorgehensweise als brauchbar bewertet, da sie einen sinnvollen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit darstellt.

Der Versuchsstand der LUH kann bezüglich seiner Abmessungen und seinem Schwingungsverhalten als Modell dienen, um ähnliche Versuche zu wiederholen. Auch das Mess- und Versuchskonzept hat sich als geeignet erwiesen und bietet die Möglichkeit, sehr unterschiedliche Auswertemethoden auf die Daten anzuwenden.

Das Aufbringen eines Bodenaufbaus aus elastisch gebundener Schüttung, Dämmung und Zementestrich auf die BSP-Decke ist ein sinnvolles Konzept, da es die Dämpfung signifikant erhöht und Resonanzeffekte mindert.

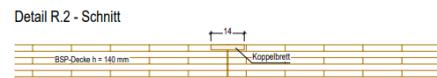
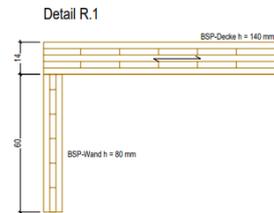
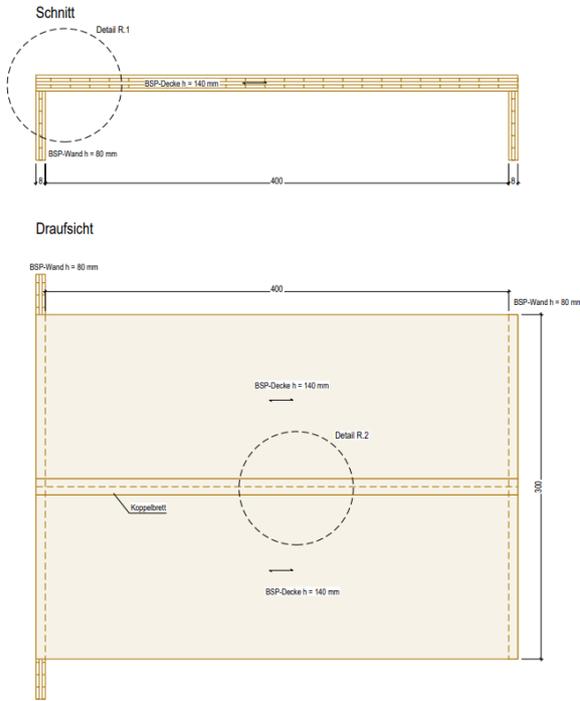
Zukünftige Arbeiten sollten gezielt verschiedene Varianten von Bodenaufbauten hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften untersuchen und vergleichen. Dazu kann die hier vorgestellte Methodik verwendet werden. Bei der Auswertung der Dämpfung sollten weitere Methoden im Zeitbereich zur Anwendung kommen.

6 Literaturverzeichnis

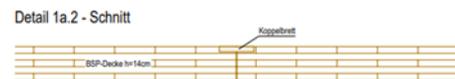
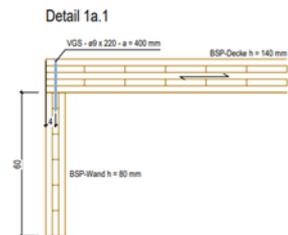
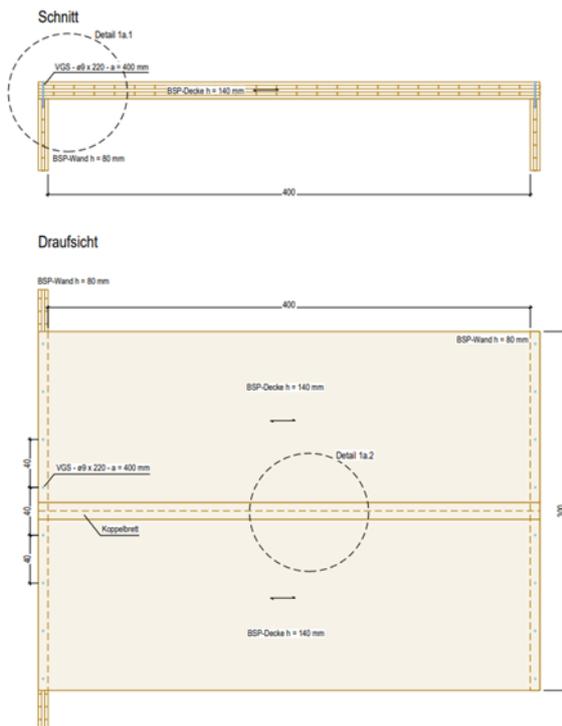
- [1] Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V., „Lagebericht Zimmerer/ Holzbau 2023,“ Rainer Kabelitz-Ciré, Berlin, 2023
- [2] Bulwiengesa AG, Koalition für Holzbau „Marktstudie Holz als Baustoff im Neubau“, Berlin, 22. August 2023
- [3] <https://spine-architects.com/projects/3x4> (aufgerufen am 06.02.2024)
- [4] <http://holzunion.com/referenzen/lynarstrasse-berlin/#> (aufgerufen am 26.03.2022)
- [5] Quelle: <https://weddingweiser.de/neues-wohnen-in-der-lynarstrasse-unser-haus-ausholz/> (aufgerufen am 26.03.2022)
- [6] Holzer Kobler Architekturen: Li18.Berlin, <https://holzerkobler.com/de/project/li18berlin>
- [7] DIN 4150-2: „Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen von Menschen auf Gebäuden, 1999
- [8] Rune Brincker, Lingmi Zhang, Palle Andersen „Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition“, Proceedings of the international modal analysis conference, San Antonio, Texas, 2000
- [9] T. Katayama. Subspace Methods for System Identification. Communications and Control Engineering. Springer, 2005.
- [10] Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, 2010
- [11] A. Rabold und H. Patricia, „Schall- und schwingungsoptimierte Holzdecken: Bemessungs- und Konstruktionshilfen für die Praxis,“ 2009.

7 Anhang: Detaillierte Darstellung der Teststandkonfigurationen

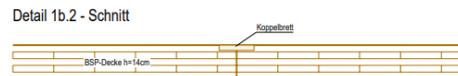
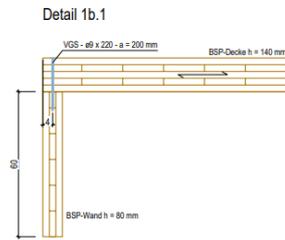
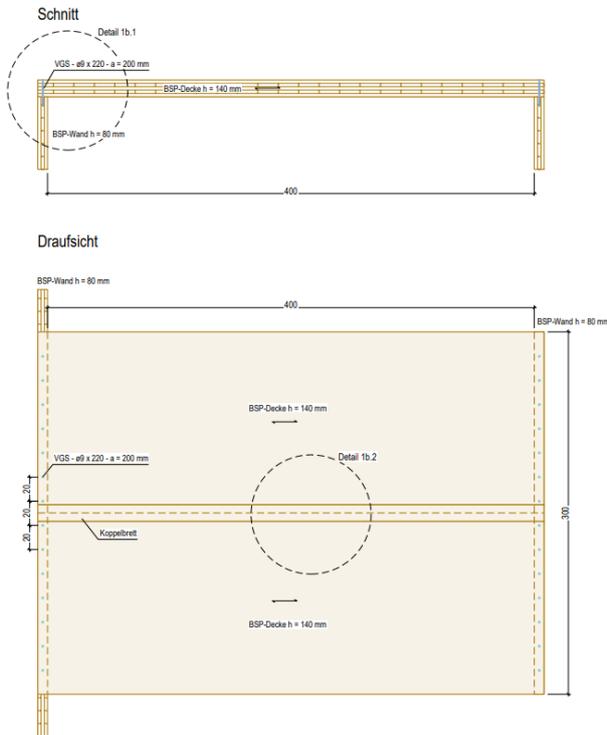
Referenz - nicht verschraubt, Koppelbrett unvernagelt



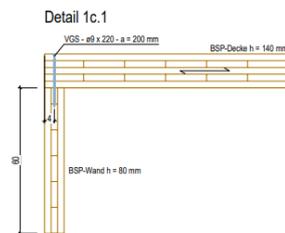
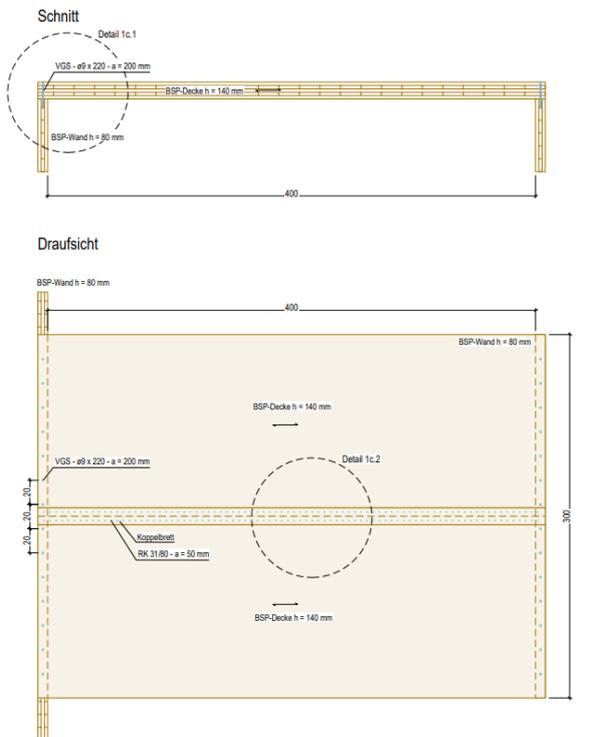
Aufbau 1a - direkte Verschraubung, Koppelbrett unvernagelt



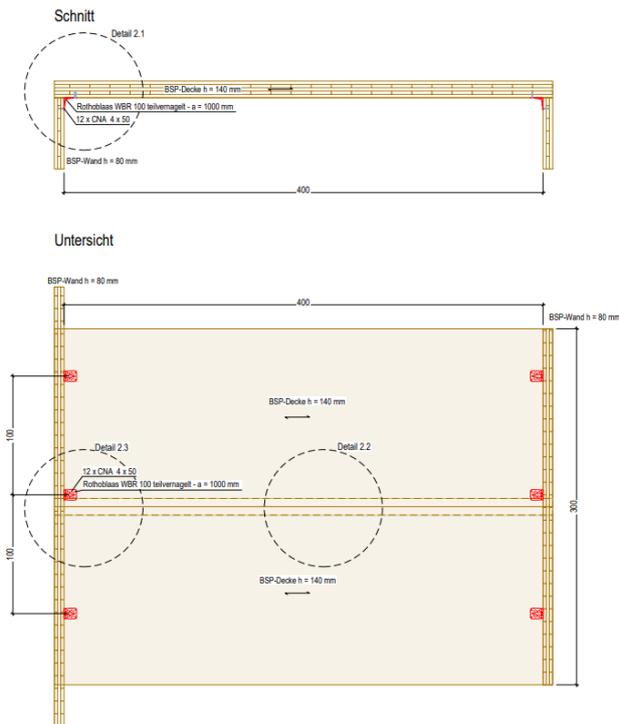
Aufbau 1b - direkte Verschraubung (verdoppelt), Koppelbrett unvernagelt



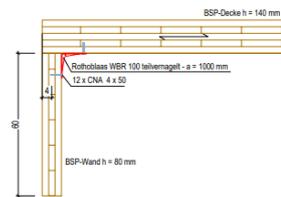
Aufbau 1c - direkte Verschraubung (verdoppelt), Koppelbrett vernagelt



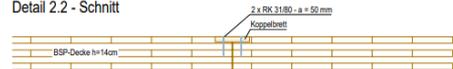
Aufbau 2 - Winkelverbindung, Koppelbrett vernagelt



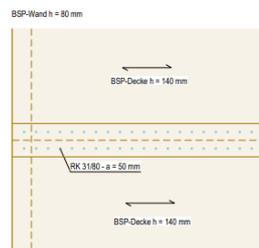
Detail 2.1



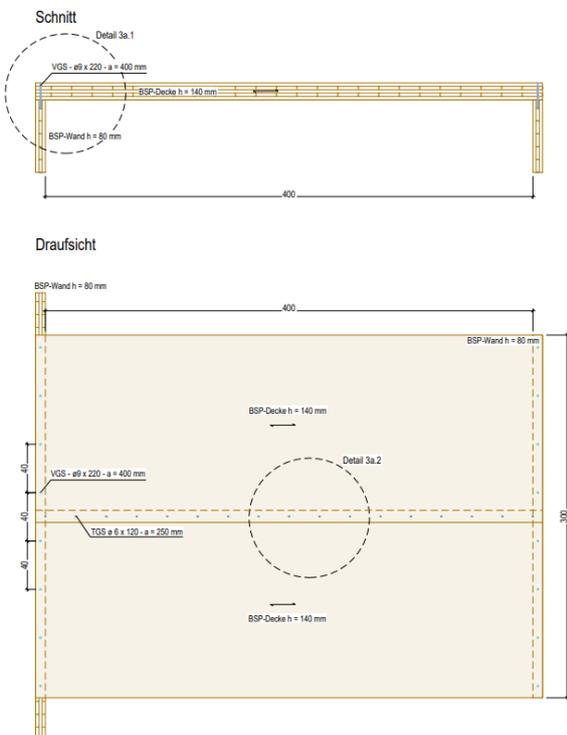
Detail 2.2 - Schnitt



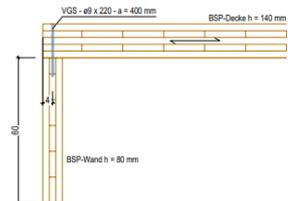
Detail 2.3 - Draufsicht



Aufbau 3a - direkte Verschraubung, Stufenfalz verschraubt



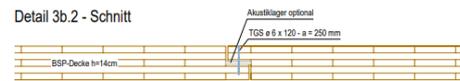
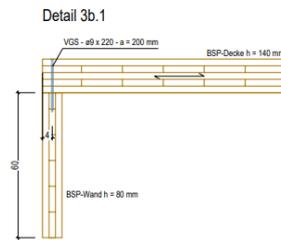
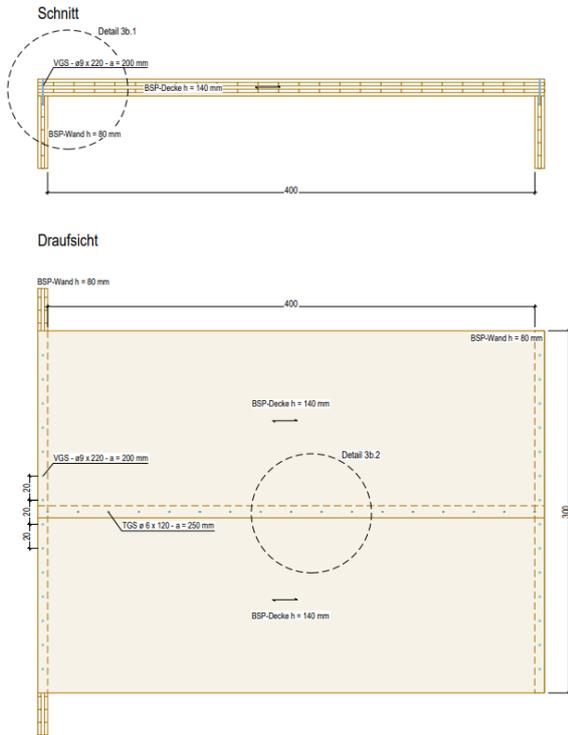
Detail 3a.1



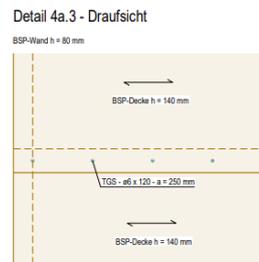
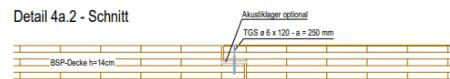
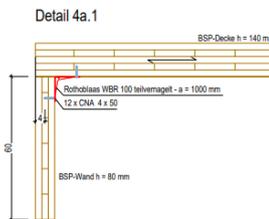
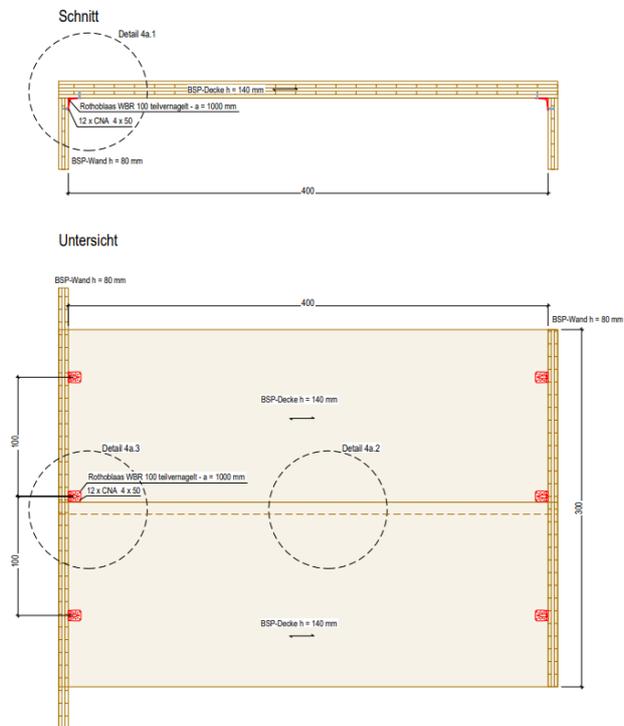
Detail 3a.2 - Schnitt



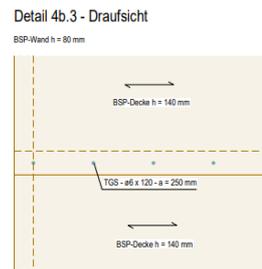
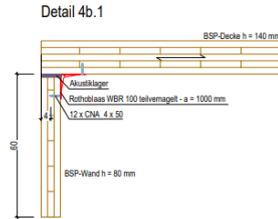
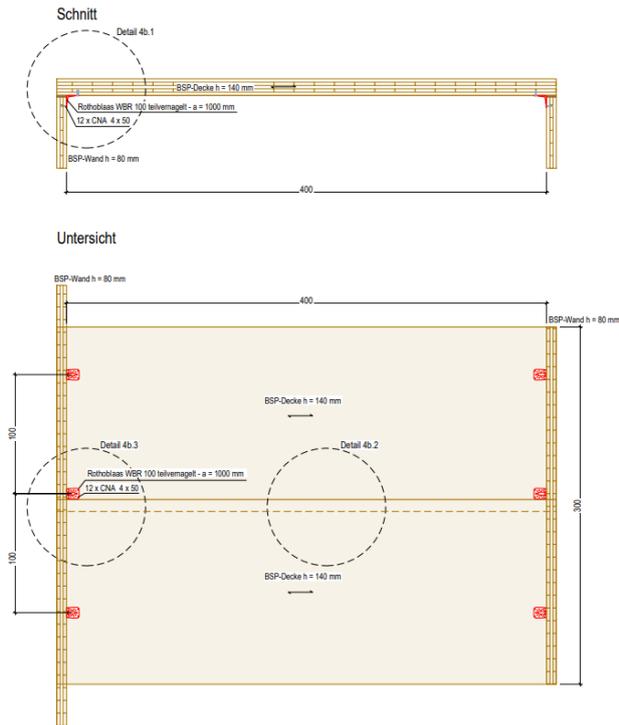
Aufbau 3b - direkte Verschraubung (verdoppelt), Stufenfalz verschraubt



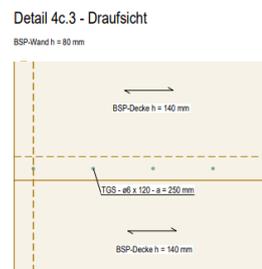
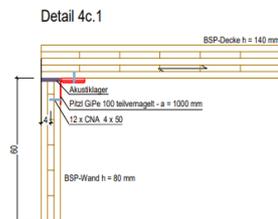
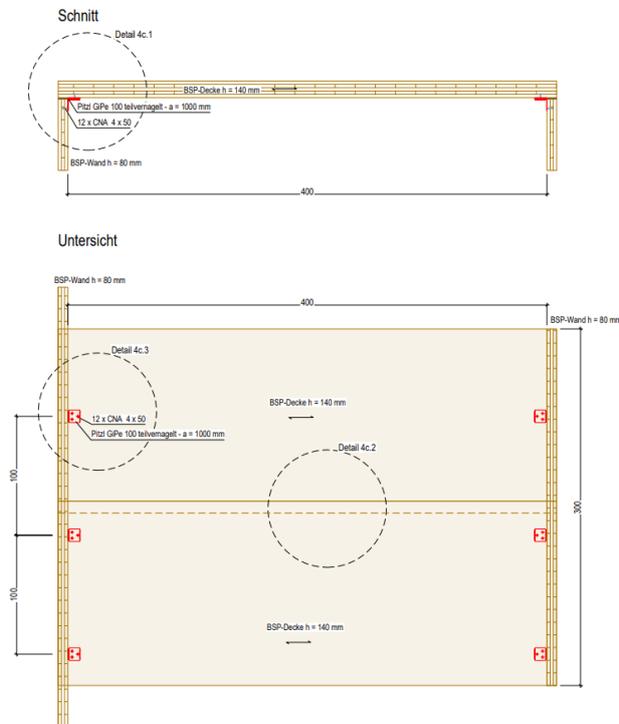
Aufbau 4a - Winkelverbindung, Stufenfalz verschraubt



Aufbau 4b - Winkelverbindung, Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt



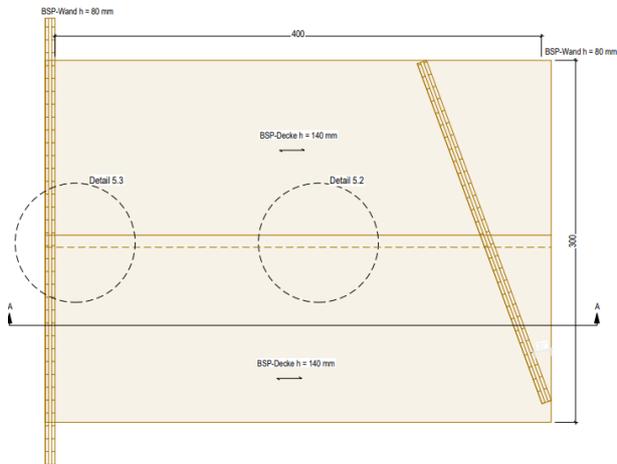
Aufbau 4c - akustische Winkelverbindung, Decke mit Akustiklager unten, Stufenfalz verschraubt



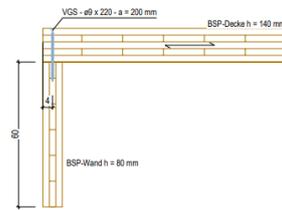
Aufbau 5 - direkte Verschraubung, Stufenfalz verschraubt, rechte Wand um 20° gedreht



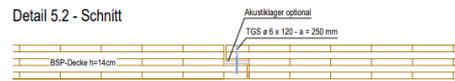
Untersicht



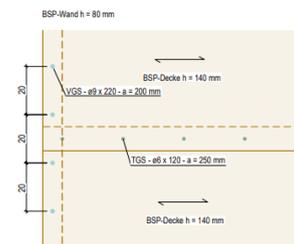
Detail 5.1



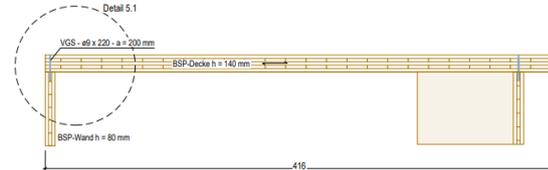
Detail 5.2 - Schnitt



Detail 5.3 - Draufsicht



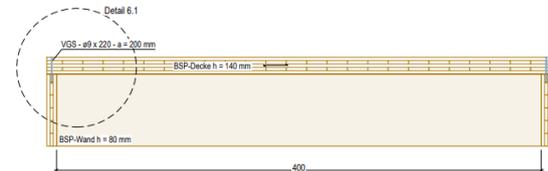
Schnitt A-A



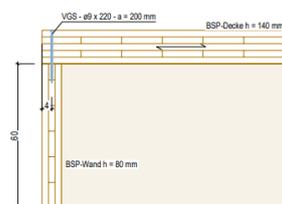
Aufbau 6 - direkte Verschraubung, Stufenfalz verschraubt, zusätzliche nicht verschraubte dritte Wand



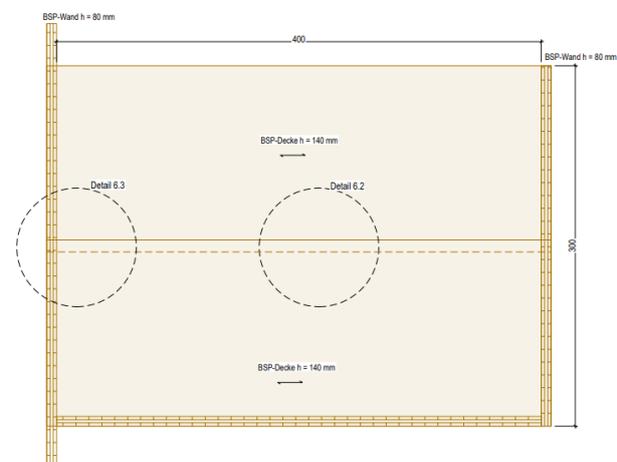
Schnitt



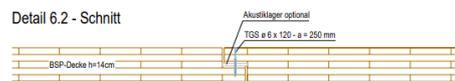
Detail 6.1



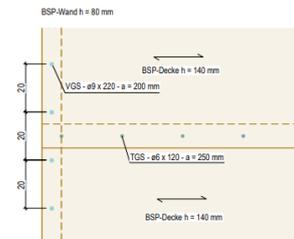
Untersicht



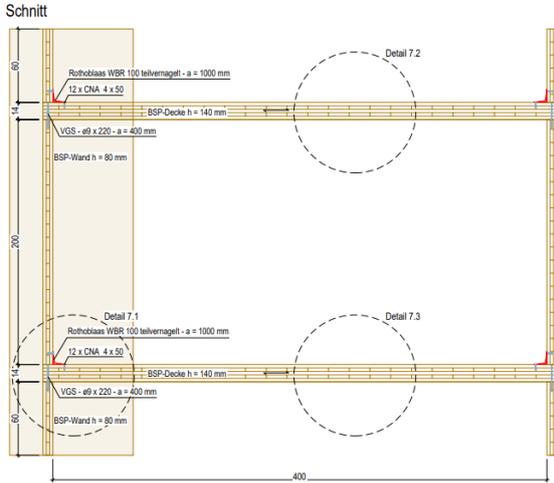
Detail 6.2 - Schnitt



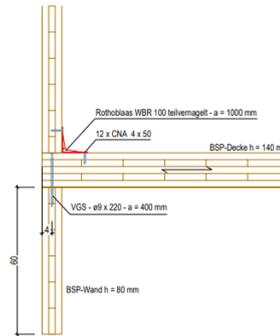
Detail 6.3 - Draufsicht



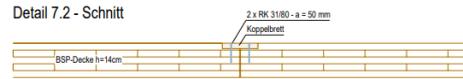
**Aufbau 7 - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung mit Winkel**



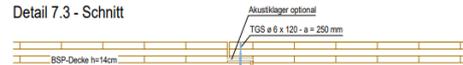
Detail 7.1



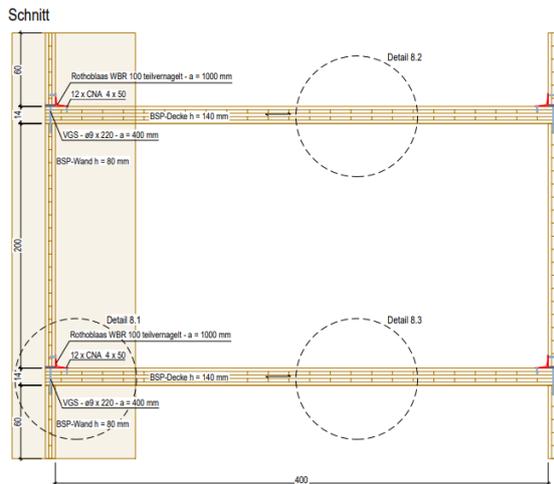
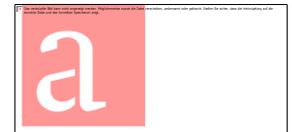
Detail 7.2 - Schnitt



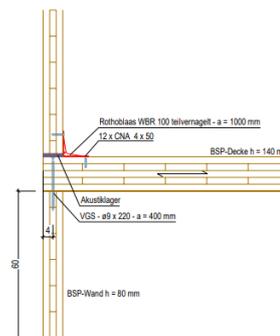
Detail 7.3 - Schnitt



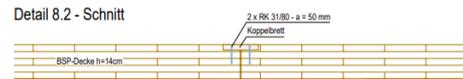
**Aufbau 8 - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung mit Winkel, akustisches Lager über der Decke**



Detail 8.1



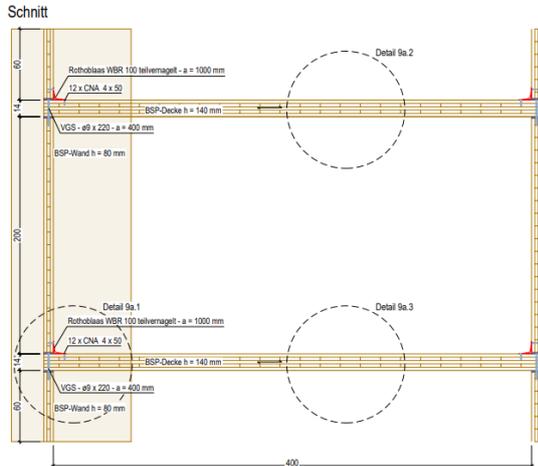
Detail 8.2 - Schnitt



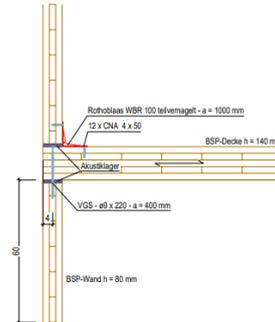
Detail 8.3 - Schnitt

Akustiklager optional
TGS ø 6 x 120 - a = 250 mm

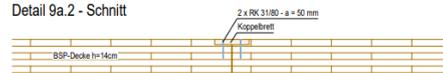
Aufbau 9a - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung mit Winkel, akustische Lager über und unter der Decke



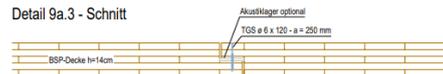
Detail 9a.1



Detail 9a.2 - Schnitt

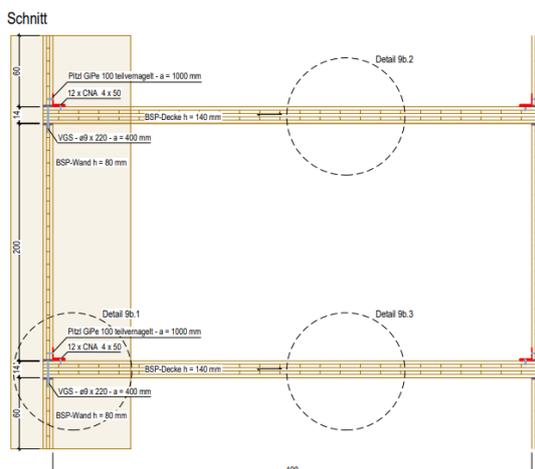
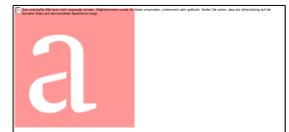


Detail 9a.3 - Schnitt

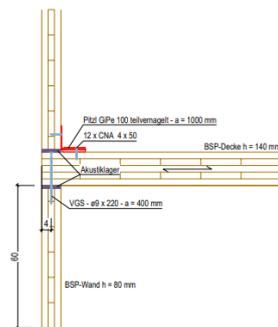


Hinweis: Für die Anbindung der aussteifenden Wände siehe Zeichnung A1;
 Der Versuch ist mit Schallschutzentkopplungen verschiedener Hersteller (Rothoblaas, Regupol, Getzner) durchzuführen;
 Für den Anschluss des Koppelbrettes können alternativ Ankernägel 4 x 75 verwendet werden

Aufbau 9b - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung mit akustischem Winkel, akustische Lager über und unter der Decke



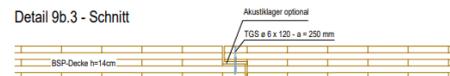
Detail 9b.1



Detail 9b.2 - Schnitt

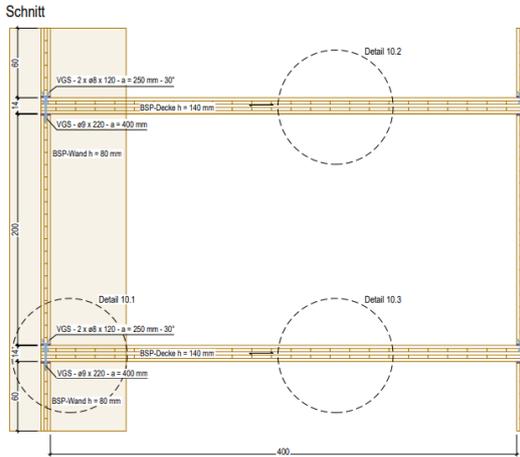


Detail 9b.3 - Schnitt

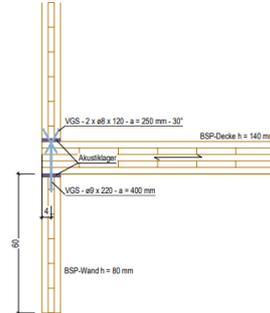


Hinweis: Für die Anbindung der aussteifenden Wände siehe Zeichnung A1;
 Der Versuch ist mit Schallschutzentkopplungen verschiedener Hersteller (Rothoblaas, Regupol, Getzner) durchzuführen;
 Für den Anschluss des Koppelbrettes können alternativ Ankernägel 4 x 75 verwendet werden

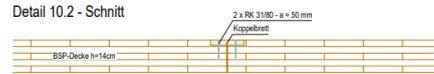
**Aufbau 10 - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke**



Detail 10.1



Detail 10.2 - Schnitt

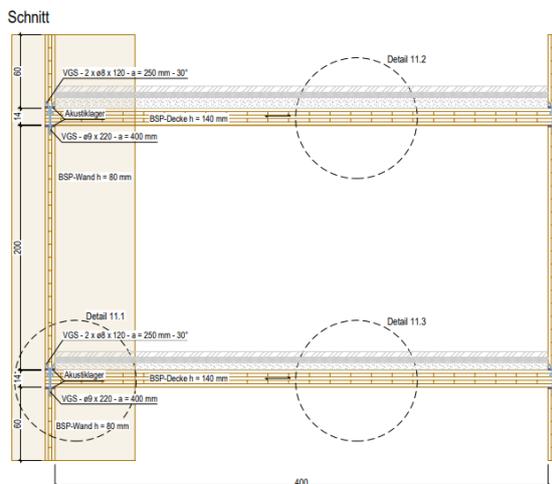


Detail 10.3 - Schnitt

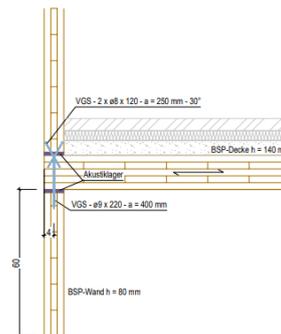


Hinweis: Für die Anbindung der aussteifenden Wände siehe Zeichnung A1;
 Der Versuch ist mit Schallschutztkopplungen verschiedener Hersteller (Rothblaas, Regupol, Getzner) durchzuführen;
 Für den Anschluss des Koppelbrettes können alternativ Ankernägel 4 x 75 verwendet werden;
 Auf das Akustiklager unterhalb der Decken kann ggf. verzichtet werden

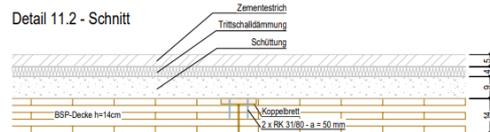
**Aufbau 11 - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke
Bodenaufbauten**



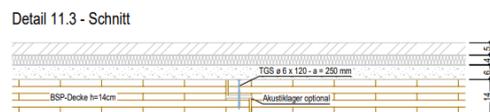
Detail 11.1



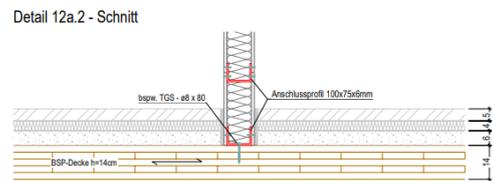
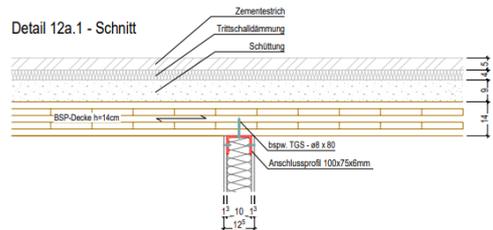
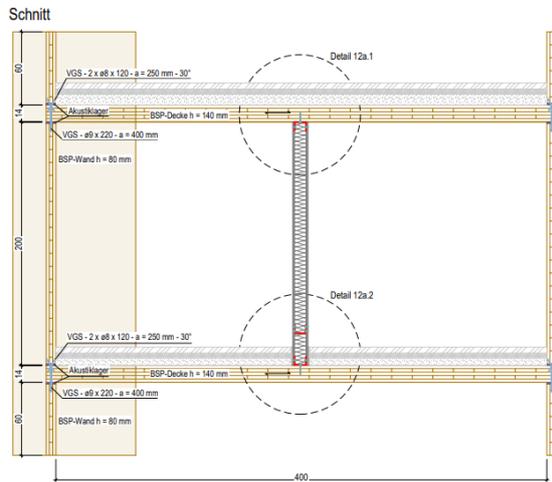
Detail 11.2 - Schnitt



Detail 11.3 - Schnitt



Aufbau 12a - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke
Bodenaufbauten, Trockenbauwand quer zur Deckenspannrichtung



Aufbau 12b - zweigeschossig, oben Koppelbrett verschraubt, unten Stufenfalz verschraubt
Decke-Wand-Verbindung durch kreuzweise Verschraubung, akustische Lager über und unter der Decke
Bodenaufbauten, Trockenbauwand parallel zur Deckenspannrichtung

