Institut für Stahlbau
Ingenieurholzbau

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D-52074 Aachen

Telefon: +49 241 80-25183
Fax: +49 241 80-22140

hoff@stb.rwth-aachen.de
www.stb.rwth-aachen.de

Versuchsbericht

Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens von Holztafelstrukturen mit Bekleidung – Testgebäude 1 – Pushover und Schwingungsverhalten

Lukas Rauber, M.Sc.
Johannes Lemmel, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister

Im Forschungsprojekt

HELEPOLIS

Impressum

Titel: Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens von Holztafelstrukturen mit Bekleidung – Testgebäude 1 – Pushover und Schwingungsverhalten

English title: *Experimental Investigations of the Load-Carrying Behaviour of Light Timber-Frame Structures with Cladding – Test Structure 1 – Pushover and Vibration Behaviour*

Autoren
Lukas Rauber, M.Sc.
Johannes Lemmel, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Benno Hoffmeister

RWTH Aachen University
Institut für Stahlbau
Fachgebiet Ingenieurholzbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
Germany

RWTH Aachen University
Templergraben 55
52062 Aachen
Germany

1. Auflage 2025

Der Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojekts HELEPOLIS, welches im Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) durch das BMEL mit dem Förderkennzeichen 2221HV075B gefördert wird.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University:
DOI: 10.18154/RWTH-2025-03782

Diese Arbeit ist lizensiert unter einer CC BY-NC-SA 3.0 DE Lizenz. Von der Lizenz ausgenommen sind Texte, Abbildungen oder anderes fremdes Material, soweit anders gekennzeichnet.

Kurzfassung

In diesem Bericht werden Versuche zum horizontalen Tragverhalten einer zweigeschossigen Struktur mit aussteifenden Holztafelwänden (HTW) mit Bekleidung vorgestellt. Diese wurden im Rahmen des Forschungsprojekts HELEPOLIS durchgeführt. Der Bericht umfasst die Untersuchungen an Testgebäude 1, an der dynamische und statische (Pushover) Untersuchungen durchgeführt wurden. Ziel der Versuche war die Untersuchung der Tragfähigkeit, Steifigkeit, Duktilität und des dynamischen Schwingungsverhaltens. Der Bericht beschreibt das Material, das Versuchsprogramm, die Datenauswertung sowie die Ergebnisse der Versuche. Im Anhang sind die einzelnen Versuchsprotokolle und Auswertungsergebnisse aufgeführt.

Schlagworte: Holztafelwände; Bekleidung; Steifigkeit; Tragfähigkeit; Versuche; Aussteifung; Pushover; Dynamik

Abstract

This report presents tests on the horizontal load-carrying behaviour of a two-storey structure braced by light timber-framed shear walls with cladding. The tests were carried out as part of the HELEPOLIS research project. This report covers test structure 1, on which dynamic and static (pushover) tests were performed. The aim of the tests was to investigate load-carrying capacity, stiffness, ductility and lateral vibration behaviour. The report describes the material used, the test program, the data evaluation and the results of the tests. The individual protocols and results are listed in the appendix.

Keywords: light timber-framed shear walls; cladding; stiffness; load-carrying capacity; experimental investigations; bracing system; pushover; dynamics

Vorwort

Im Rahmen des Forschungsprojekts *HELEPOLIS* wird der Einfluss von Bekleidungen auf das Tragverhalten von Holztafelwänden (HTW) untersucht. Aufbauend auf experimentellen Untersuchungen soll eine Berechnungsmethode für HTW mit Bekleidung entwickelt werden. Dieses Dokument umfasst die Dokumentation der experimentellen Untersuchungen an einem Testgebäude mit zwei Geschossen. Der Probekörper (G1) wurde hinsichtlich seines Aussteifungsverhaltens und der dynamischen Eigenschaften untersucht. Die Veröffentlichung dieser Dokumentation dient der Verfügbarmachung der Informationen zur Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche bedanken wir uns bei Ben Später, Julian Schmidt sowie dem gesamten Team der Versuchshalle. Wir danken auch Professor Christoph Butenweg für das Zurverfügungstellen des Shakers.

Die Durchführung des Projekts und der Versuche wäre ohne die *Projektpartner Walter + Reif Ingenieurgesellschaft mbH* und *die Adams Holzbau-Fertigbau GmbH* nicht möglich. Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit bei unseren Projektpartnern. Auch den assoziierten Partnern sei an dieser Stelle für den praxisnahen Input und für Materialspenden gedankt. Besonderer Dank gilt Herrn Richter der *Simpson Strong-Tie GmbH* für die Unterstützung bei der Auslegung der speziellen Verankerungselemente.

Wir bedanken uns auch für die Förderung des Projektes *HELEPOLIS* im Rahmen des Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe durch das BMEL (Förderkennzeichen 2221HV075B).

Aachen, im April 2025

Benno Hoffmeister und Lukas Rauber

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Probekörper 2

2.1 Materialien und Werkstoffe 2

2.2 Bemessung des Probekörpers 4

2.3 Grundstruktur des Probekörpers G1 6

2.4 Wandaufbau 8

2.5 Konstruktive Gebäudedetails 10

3 Pushover-Versuch 13

3.1 Versuchsaufbau 13

3.2 Messeinrichtung 14

3.3 Versuchsdurchführung 16

3.4 Datenauswertung 17

3.5 Ergebnisse 22

3.5.1 Einwirkung und Versagen 22

3.5.2 Last-Verformungs-Verhalten 25

3.5.3 Auswertungsparameter 27

4 Dynamische Untersuchungen 28

4.1 Versuchsaufbau 28

4.2 Messeinrichtung 29

4.3 Versuchsdurchführung 30

4.4 Versuchsauswertung 32

4.4.1 Eigenfrequenzen 32

4.4.2 Eigenmoden 33

4.4.3 Dämpfung 36

4.5 Ergebnisse 39

5 Literatur 42

A Probekörper 44

B Pushover-Versuch 48

C Dynamische Untersuchungen 54

1 Einleitung

Im Forschungsprojekt HELEPOLIS wird der Trageinfluss von Bekleidungen auf das Tragverhalten von Holztafelwänden (HTW) untersucht. Dazu werden Detailversuche, Wandversuche und Gebäudeversuche durchgeführt. Dieser Bericht beschreibt die Gebäudeversuche am Probekörper G1. Die Versuche dienen der Untersuchung des Tragverhaltens von HTW mit Bekleidung auf Stockwerks- und Gebäudeebene.

Die experimentellen Untersuchungen wurden in der Versuchshalle des *Zentrums für Metallische Bauweisen (ZMB)* der *RWTH Aachen* im Zeitraum vom 11.07.2024 bis zum 23.07.2024 durchgeführt.

Abbildung 1-1 zeigt den Ablauf der Versuche am Testgebäude 1. Die Versuchsreihe beginnt mit dynamischen Untersuchungen in unterschiedlichen Bauzuständen (ein- und zweigeschossig). Die dynamischen Tests sind zerstörungsfrei und dienen der Bestimmung der Eigenfrequenzen, Eigenmoden und Dämpfung des Testgebäudes. Der Hauptversuch der Versuchsreihe ist der Pushover-Versuch. Bei diesem wird der Probekörper horizontal belastet, um die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Testgebäudes bestimmt. Im dynamischen Test D3 werden die dynamischen Eigenschaften des geschädigten Probekörpers ermittelt.

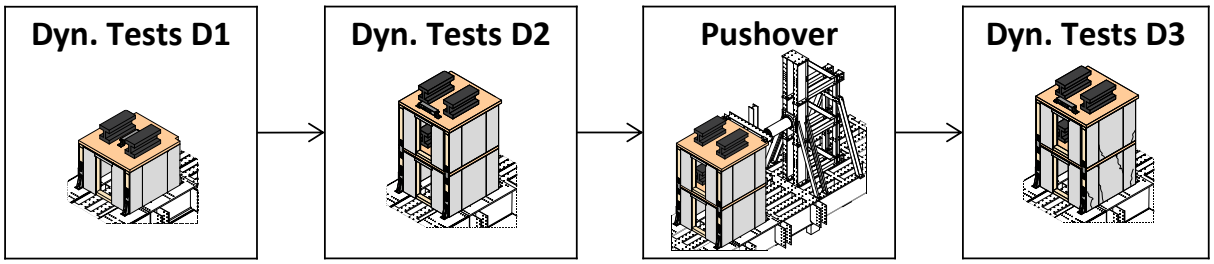


Abbildung 1-1: Ablauf der Gebäudeversuche am Probekörper G1

2 Probekörper

Bei dem Probekörper handelt es sich um einen zweistöckigen Gebäudekern in Holztafelbauweise. Nachfolgend wird der Probekörper hinsichtlich Materialien, Bemessung und Aufbau ausführlich beschrieben.

2.1 Materialien und Werkstoffe

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Materialien aufgeführt. Abbildung 2-1 zeigt die grundsätzlichen Komponenten einer HTW und deren Bezeichnung.

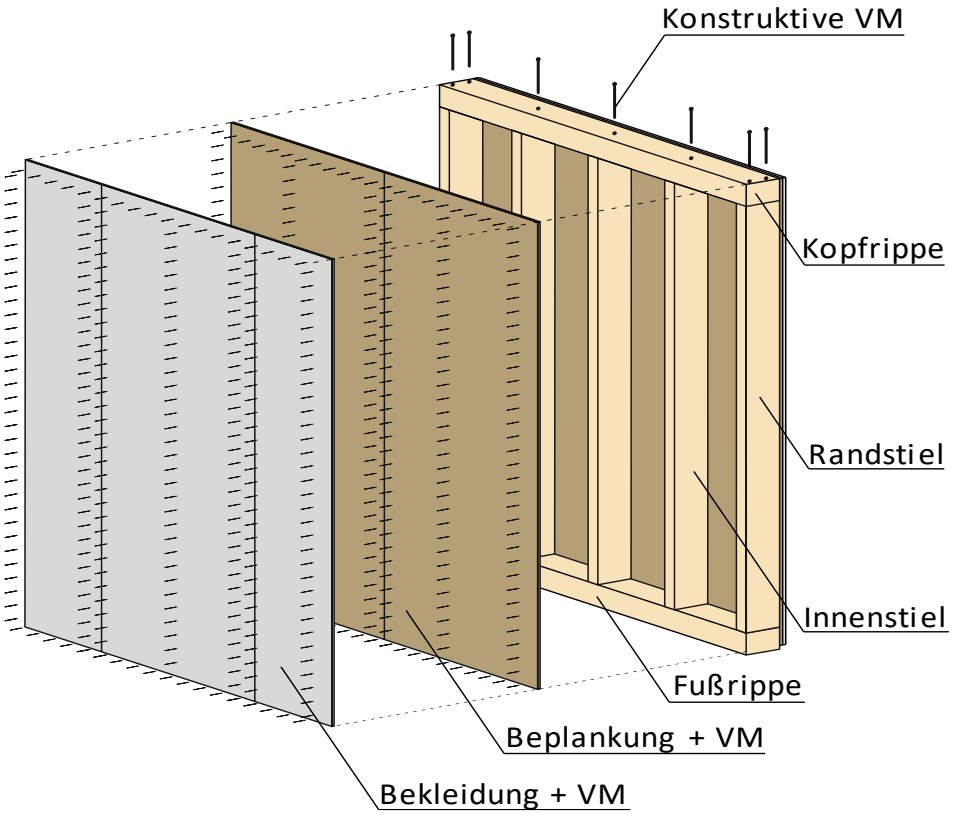


Abbildung 2-1: Komponenten einer HTW

Rahmen

Der Rahmen der Holztafelwände wird aus Konstruktionsvollholz (KVH) der Festigkeitsklasse C24 zusammengesetzt. Tabelle 2-1 zeigt die gemessenen mittleren Holzfeuchten nach *DIN EN 13183-2* [1] und die Temperaturen des Rahmens an den verschiedenen Versuchstagen. Eine ausführliche Zusammenstellung der Holzfeuchtemessungen befindet sich in Anhang A.

Tabelle 2-1: Durchschnittliche Holzfeuchte und Temperatur des Rahmens an den Versuchstagen

Versuchstag	Datum	Holzfeuchte [%]	Temperatur [°C]
Dyn. Test D1	11.07.2024	14,9	27,1
Dyn. Test D2	16.07.2024	14,2	26,5
Pushover-Versuch	18.07.2024	14,1	28,8
Dyn. Test D3	23.07.2024	13,8	27,3

Beplankung und Bekleidung

Als Beplankung werden OSB/3 Platten der Fa. *Egger Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG* nach *DOP-734-03* [2] verwendet. Die Dicke der verwendeten Beplankung beträgt 15 mm.

Die Bekleidung der Probekörper besteht aus Gipsfaserplatten (GFB) nach *ETA-03/0050* [3] vom Hersteller *James Hardie Europe GmbH (Fermacell)* und besitzen eine Dicke von 18 mm.

Verbindungsmittel

Zur Verbindung der Beplankung und Bekleidung mit dem Holzrahmen werden galvanisierte Klammern nach *ETA-16/0535* [4] des Typs *KG 764* der Fa. *Haubold* eingesetzt. Die Abmessungen der verwendeten Klammern sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

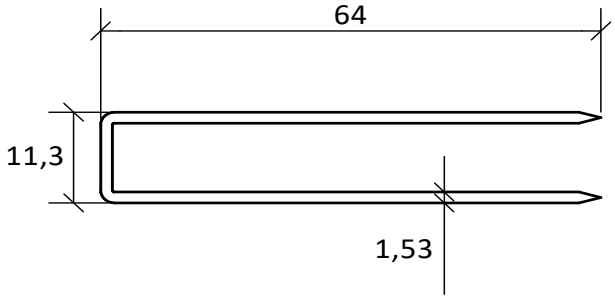


Abbildung 2-2: Abmessungen der verwendeten Klammern

Deckenscheiben

Die für den Probekörper verwendeten CLT-Deckenelemente bestehen aus dreilagigem Nadelholz der Güteklasse C24 und stammen vom Hersteller *Pfeifer Holding GmbH*.

Sonstige Materialien

Die verwendeten Materialien der Schrauben, Stahl und Aluminiumbauteile sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2-2: Materialien sonstiger Bauelemente

Bauteil	Material / Festigkeit
Zuganker	S355
Zuglasche	S350 GD
Schrägverschraubung ZYKT69	S355 J2 G3 [5]
CCS-Multifunktionsverbinder	S355 JR [6]
Balkenträger (BTALU)	AlMgSi 0,7 F26 (Aluminium) [7]
Stabdübel	S235 JR [8]
Holzschrauben (Teil- und Vollgewinde, ⌀6 bis ⌀12)	Kohlenstoffstahl
Stahlbauschrauben (M20 und M24)	10.9
Muttern (M20 und M24)	10.9

2.2 Bemessung des Probekörpers

Die Vorbemessung des Probekörper G1 wird von der *Walter Reif Ingenieurgesellschaft mbH* durchgeführt. Die Belastung des Probekörpers soll sich im Pushover-Versuch gemäß der Massen-Höhen-proportionalen Erdbebenlastverteilung nach Eurocode 8 [9] einstellen. Das statische System ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

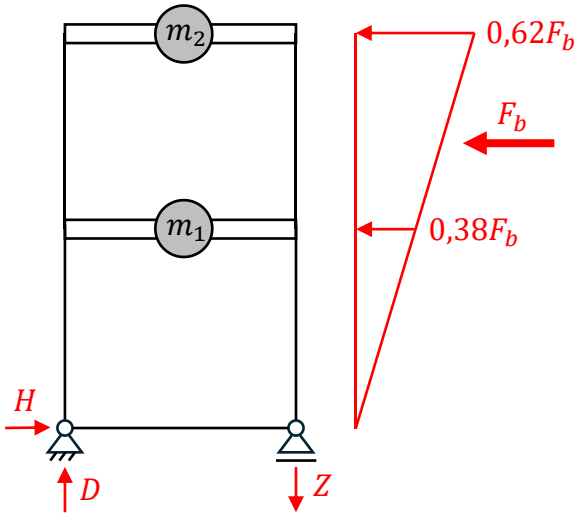


Abbildung 2-3: Massen-Höhen-proportionale Lastverteilung nach Eurocode 8 [9]

Im Pushover-Versuch wird ein duktiles Klammerversagen der Wandtafeln in beiden Stockwerken angestrebt. Aus dem statischen System ergibt sich im Obergeschoss eine geringere Last als im Erdgeschoss. Aus diesem Grund wird im Obergeschoss der Klammerabstand erhöht.

Für die Anschlüsse wird eine Kapazitätsbemessung mit einer Überfestigkeit von 20 % durchgeführt. Die im Versuch erwartete Belastung übersteigt die im Holztafelbau üblichen Lasten erheblich, so dass konventionelle Verankerungen nicht ausreichen. Aus diesem Grund werden für die Zugverankerung der Wände spezielle Zuganker und Zuglaschen gefertigt. Diese sind in Abbildung 2-4 dargestellt.

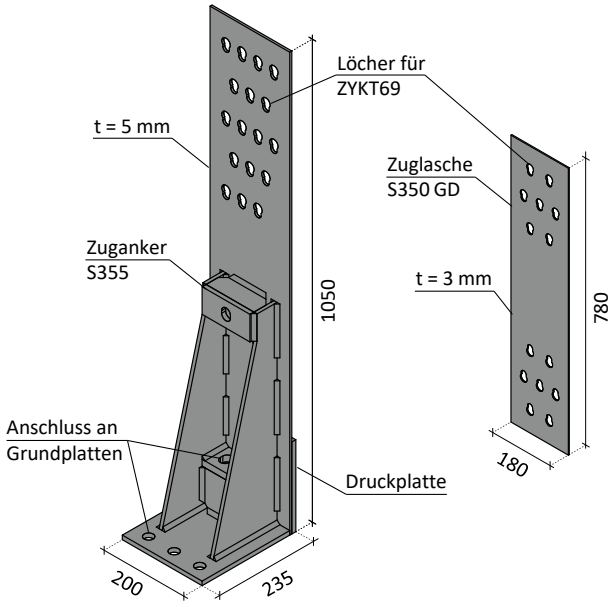


Abbildung 2-4: Entworfener Zuganker (links) und Zuglasche (rechts)

Der Zuganker nimmt neben den Zugkräften auch die horizontalen Schubkräfte auf. Die Zuglasche überträgt die Zugkräfte zwischen den Stockwerken. Die Schubübertragung zwischen den Geschossen erfolgt über einen Balkenträger und Schrauben.

2.3 Grundstruktur des Probekörpers G1

Das Testgebäude ist eine zweistöckige Struktur in Holztafelbauweise mit Bekleidung. Abbildung 2-5 zeigt den Positionsplan des Probekörpers G1.

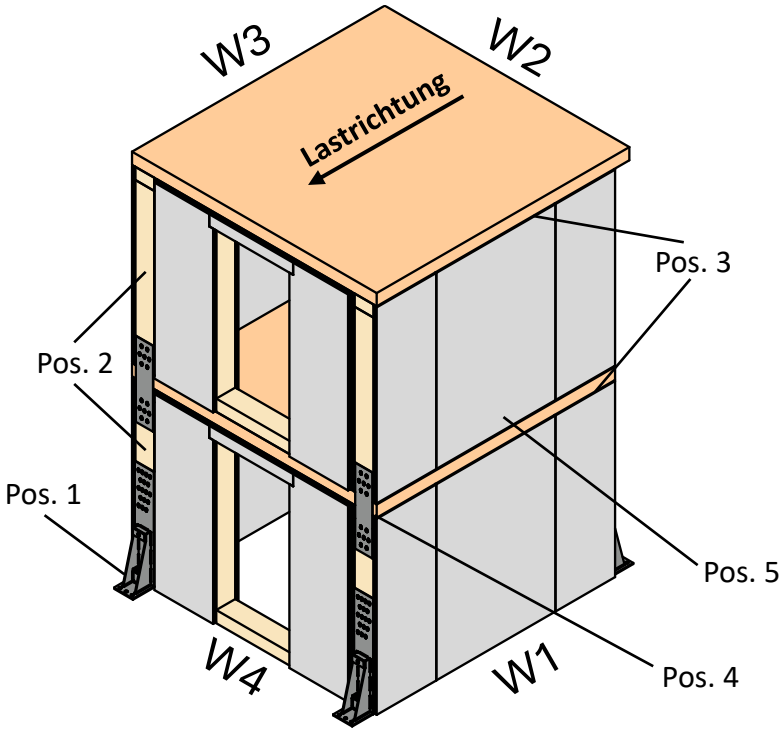


Abbildung 2-5: Positionsplan des Probekörpers G1

Die Wände in Haupttragrichtung werden im Folgenden W1 bzw. W3 genannt. Die Wand in Nebentragrichtung ohne Öffnung wird als W2 bezeichnet, die Wand mit der Öffnung wird W4 genannt. In Abbildung 2-6 sind die bemaßten Ansichten aller Wandseiten und der Grundriss des Probekörpers G1 zu sehen.

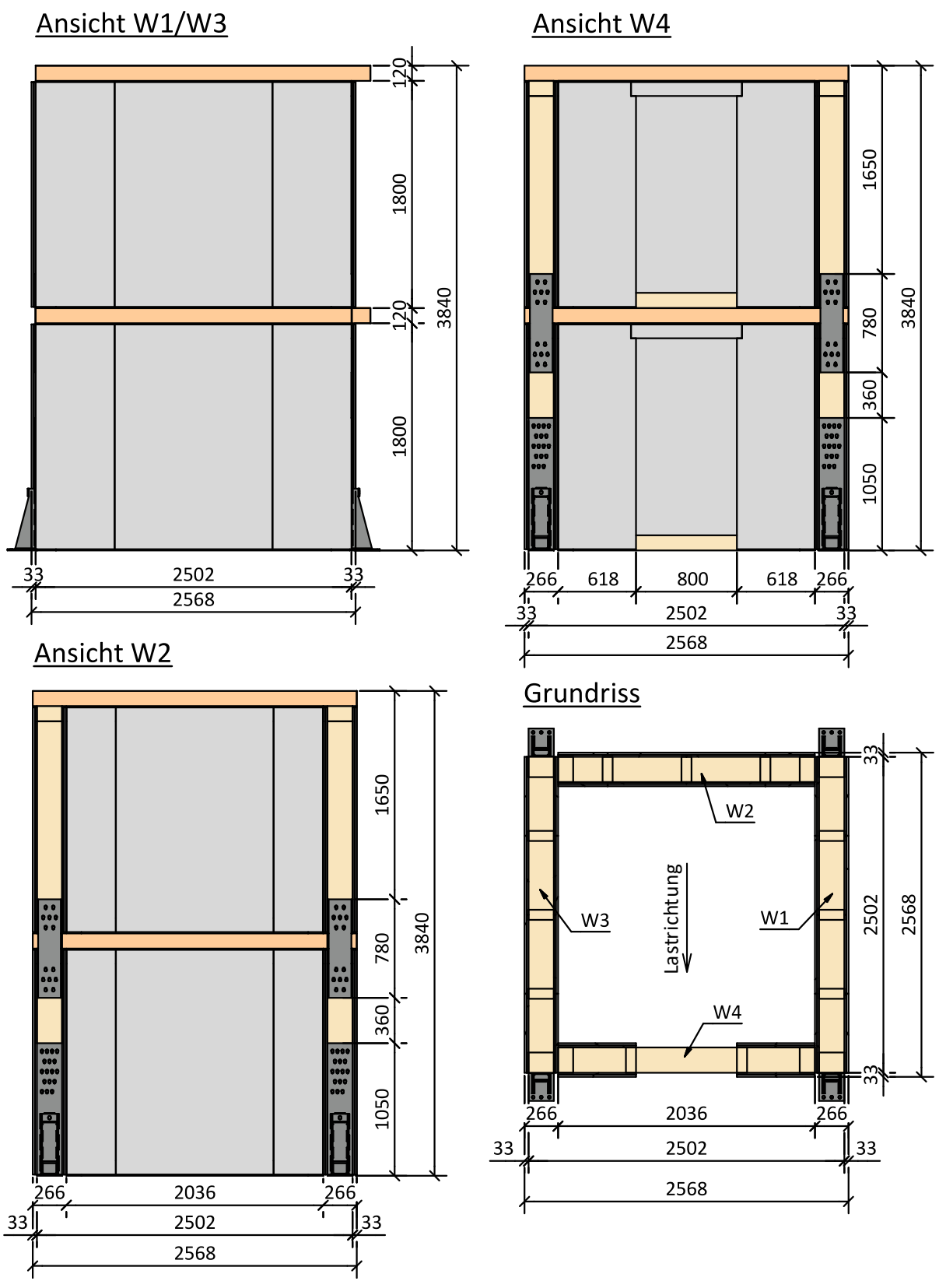


Abbildung 2-6: Ansichten und Grundriss des Probekörpers G1 mit Vermaßung

2.4 Wandaufbau

Der Wandaufbau ist hinsichtlich der Rahmen, der Beplankungs- und der Bekleidungsanordnung im Erd- und Obergeschoss jeweils derselbe. Der einzige Unterschied besteht im Klammerabstand. Durch die Symmetrie des Probekörpers sind die Wände in Haupttragrichtung identisch. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht der Wandaufbauten.

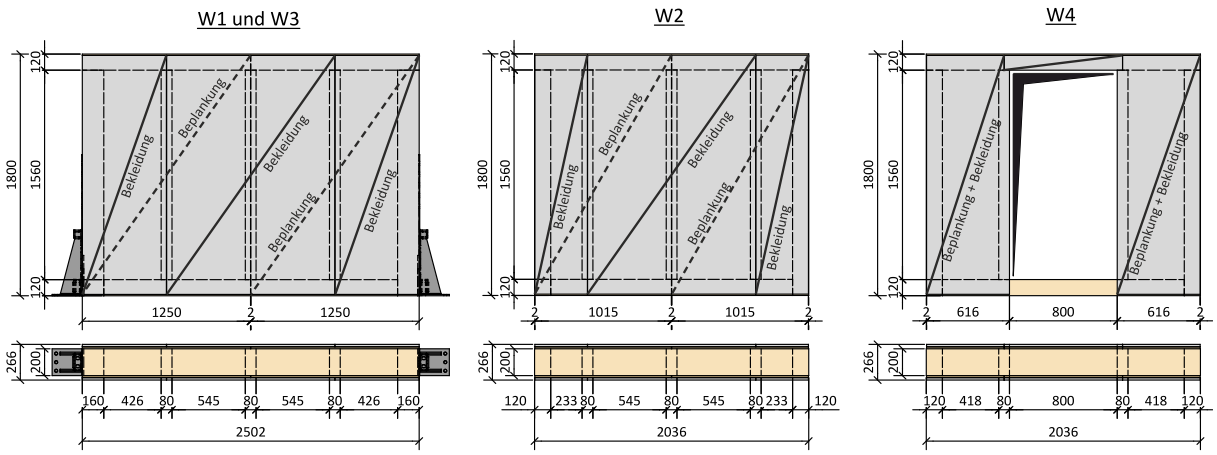


Abbildung 2-7: Übersicht der Erdgeschosswände in Haupt- und Nebentragrichtung des Probekörpers

Holzrahmen

Die Randstiele der Wände in Nebentragrichtung und die Fuß- und Kopfrippen haben Querschnittsabmessungen von 12/20 cm. Die Kopfrippe ist durchgehend, die Fußrippe geht jeweils bis zu den Randstielen. Die Randstiele der Wände in Haupttragrichtung haben die Abmessungen 16/20 cm. Diese Abmessungen sind erforderlich, um eine ausreichende Einbindetiefe der Schrauben, die zur Befestigung des Zugankers und den Zuglaschen erforderlich sind, zu gewährleisten. Die Randstiele der Wände W1 und W3 besitzen im Erdgeschoss in den unteren 20 cm eine 1 cm tiefe Ausfräsung, welche die Kontaktfläche mit der Druckplatte des Zugankers bildet. An dieser Stelle sind in den Stielen zur Querdruckverstärkung vier Vollgewindeschrauben ⌀12/300 mm eingebracht (Abbildung 2-9). Die Innenstiele haben die Abmessungen 8/20 cm. An den Anstoßstellen der Stiele an die Fuß- und Kopfrippe befindet sich eine 10 mm tiefe Ausklinkung in den Rippen. Die Innenstiele werden jeweils über eine ⌀8/200 mm Teilgewindeschraube oben und unten konstruktiv mit den Rippen verbunden. In den Randstielen sind jeweils zwei Teilgewindeschrauben zur Verbindung mit Kopf- und Fußrippe vorgesehen. Das Raster der Stiele kann Abbildung 2-7 entnommen werden.

Beplankung und Bekleidung

Die Wandtafeln W1 und W3 sind jeweils durchlaufend und besitzen eine Gesamtlänge von 250,2 cm. Bei dieser Wandlänge kann mit einem Spalt von 2 mm zwischen den beiden 125 cm breiten OSB-Platten das im Holztafelbau übliche Beplankungsraster eingehalten werden. Die Bekleidung wird eine halbe Tafelbreite versetzt angeordnet. Mit einem Spalt von 1 mm zwischen den Bekleidungstafeln resultieren daraus links und rechts zwei GFB-Platten mit einer

Breite von 62,5 cm und eine 125 cm breite GFB-Platte in der Mitte. Für die Wände W2 und W4 müssen Beplankungs- und Bekleidungsplatten entsprechend zugeschnitten werden.

Alle Beplankungs- und Bekleidungstafeln besitzen eine Höhe von 178 cm. Da die Wandhöhe 180 cm beträgt, ergibt sich im oberen und unteren Bereich der Wand ein Spalt von 1 cm (siehe Abbildung 2-12).

Die Stoßfugen der Bekleidungsplatten werden mit *PE Dampfbremsfolie artic.stop 250* von *BBG Foliengesellschaft mbH* auf der darunterliegenden OSB-Platte hinterlegt und anschließend mit *Fermacell Greenline Fugenkleber* verklebt.

Klammern

Beim Einbringen der Klammern werden die Mindestabstände zwischen den Klammern und zum Plattenrand nach DIN EN 1995-1-1/NA [10] beachtet. Bei den Obergeschosswänden beträgt der Klammerabstand $s = 150\,mm$, im Erdgeschoss ist $s = 95\,mm$. Die Beplankungs- und Bekleidungsplatten werden umlaufend mit Klammern befestigt. Darüber hinaus erfolgt eine zusätzliche Befestigung an den Stellen, an denen sich unter den Tafeln ein Stiel befindet. Die Klammerung der Bekleidung erfolgt durch die Beplankung in die Rahmenhölzer. Die Klammern werden unter einem Winkel von 30 Grad eingebracht. Die Klammern der Beplankung und Bekleidung sind jeweils um den halben Klammerabstand zueinander versetzt angeordnet. Die Klammersituation ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Es ist jedoch an dieser Stelle anzumerken, dass diese Planungsanforderungen im Herstellungsprozess nicht immer eingehalten werden können, es kann vereinzelt zu Abweichungen kommen.

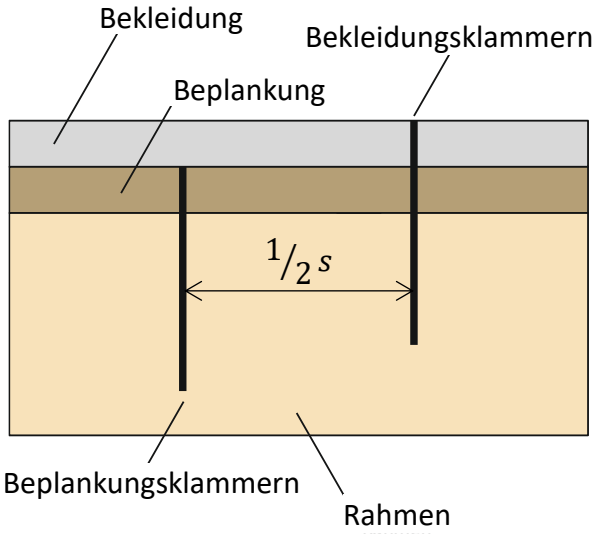


Abbildung 2-8: Klammerdetail mit Beplankung und Bekleidung

2.5 Konstruktive Gebäudedetails

Im Folgenden werden die konstruktiven Details des Gebäudes erläutert. Der Positionsplan in Abbildung 2-5 zeigt die jeweiligen Stellen, an denen diese Details vorzufinden sind.

Pos. 1: Grundverankerung

Das Testgebäude wird über die speziell angefertigten Zuganker mit der Unterkonstruktion (Spannfeld) verbunden. Der Anker wird über eine Schrägverschraubung an den Randstielen der Wände in Haupttragrichtung befestigt. Die Schrägverschraubung besteht aus *ZYKT69* Verbindern der Firma *Simpson Strong-Tie GmbH (SST)* und ⌀8/300 mm Vollgewindeschrauben. Die *ZYKT69* Einsätze erfordern eine spezielle Lochform in der Lasche des Zugankers. Außerdem ragen die Einsätze über den Anker hinaus in den Stiel des Probekörpers hinein, dort ist eine entsprechende Ausfräsung vorhanden. Die ZYKT69 Einsätze besitzen eine Führung, mit der die Schrauben unter einem Winkel von 30 Grad eingebracht werden.

Die Schrägverschraubung wird durch einen *CCS 50/110* Verbinder ergänzt, dabei handelt es sich um einen Multifunktionsverbinder von *SST*. Auch für diesen ist eine Bohrung im Randstiel vorgesehen. Der *CCS*-Verbinder wird in die Bohrung eingesetzt, mit jeweils acht *CSFT* ⌀6/110 mm im Randstiel befestigt und schließlich über eine M20 10.9 Schraube mit dem Zuganker verbunden. Der *CCS*-Verbinder ist zur Aufnahme eines Versatzmomentes im Zuganker angeordnet.

Die Zuganker werden über jeweils fünf M20 10.9 Stahlbauschrauben mit entsprechenden Grundplatten verschraubt. Die Grundverankerung ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

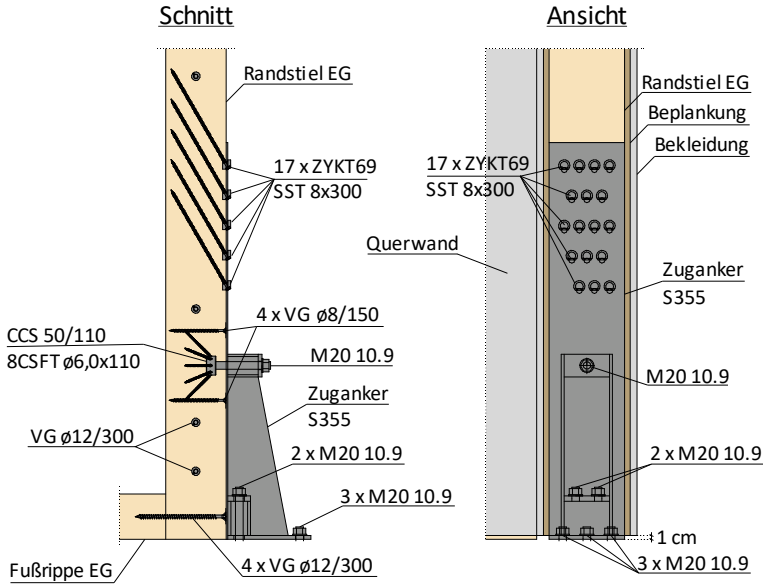


Abbildung 2-9: Detailzeichnung der Grundverankerung

Pos. 2: Eckverbindung

Im Eckbereich laufen die Wände W1 und W3 durch und werden von den Wänden in Nebentragrichtung gestoßen. Die Eckverbindung wird mit fünf über die Geschosshöhe verteilten Vollgewindeschrauben ⌀12/300 mm hergestellt. Beim Einbringen der Schrauben wird darauf geachtet, dass die Schraubenköpfe an der Wandaußenseite im Randstiel versenkt sind und nicht in die Beplankungsschicht hineinragen. Ansonsten würde das Tragverhalten der Beplankung beeinflusst werden. Bei der innenseitigen Beplankung kann dies nicht verhindert werden. Abbildung 2-10 zeigt ein Detail der Eckverbindung an einer Wand im Erdgeschoss.

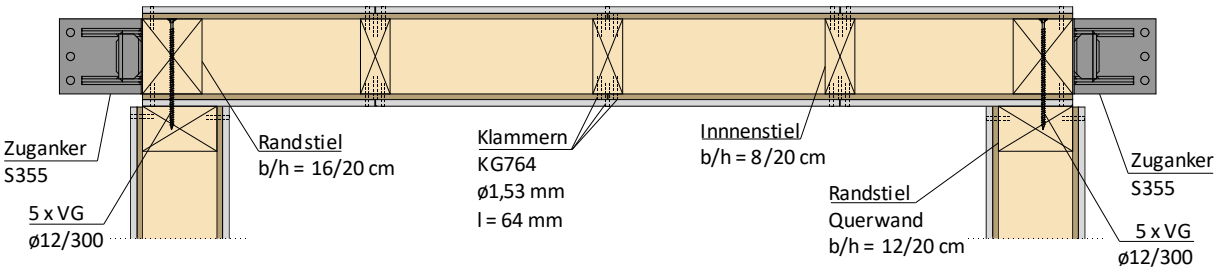


Abbildung 2-10: Detailzeichnung der Eckverbindung

Pos. 3: Deckenanschluss

Die Brettsperrholzdecken ragen an den Wänden W1 und W3 33 mm über den Holzrahmen hinaus, so schließen sie mit der Bekleidung ab. Bei der Wand W4 schließt die Decke mit dem Rahmen ab. An der Wand W2 kragt die Decke 150 mm über den Holzahmen aus. Über diesen Deckenvorsprung wird die Last im Pushover-Versuch eingeleitet. Die Erdgeschossdecke wird über eine umlaufende, zweireihige, kreuzweise Verschraubung mit 28 Vollgewindeschrauben ⌀10/320 mm mit den Kopfrippen der Erdgeschosswände verbunden. Der Anschluss der Obergeschossdecken erfolgt analog über 28 ⌀10/300 mm Vollgewindeschrauben. Der Anschluss der Decke an die Erdgeschosswände ist in Abbildung 2-12 dargestellt.

Die Verbindung der Obergeschosswände mit der Decke unterscheidet sich für die Wände in Lastrichtung und die Wände quer zur Lastrichtung. Die Wände quer zur Lastrichtung (W2 und W4) werden konstruktiv mit jeweils vier Paar kreuzweise angeordneten Vollgewindeschrauben ⌀8/160 mm mit der Decke verbunden. Die Geschossverbindung der Wände in Hauptrichtung (W1 und W3) wird in den Positionen 4 und 5 genauer erläutert.

Pos. 4: Geschossverbindung auf Zug

Die auftretenden Zugkräfte zwischen den Geschossen werden über die außenliegenden Zuglaschen übertragen. Sie verbinden den Randstiel des Erdgeschosses mit dem des Obergeschosses. Die Befestigung der Laschen erfolgt ebenfalls über eine Schrägverschraubung. Diese besteht – wie beim Anker – aus *ZYKT69* Verbindern und ⌀8/300 mm Vollgewindeschrauben. Die konstruktive Durchbildung des Anschlusses ist Abbildung 2-11 zu entnehmen.

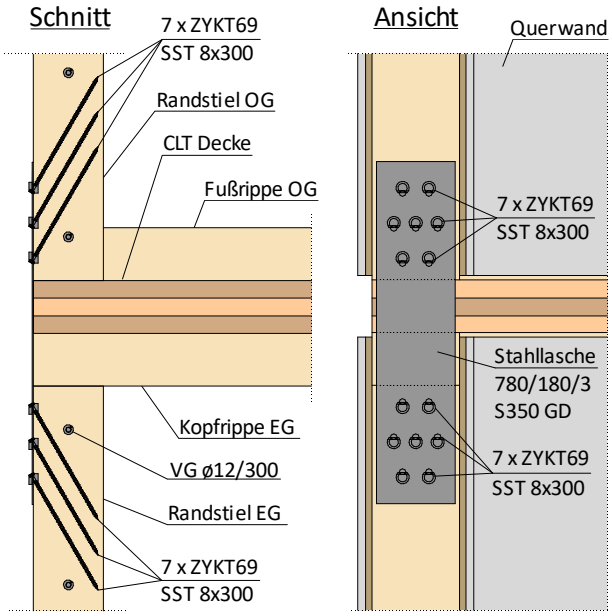


Abbildung 2-11: Detailzeichnung der Geschossverbindung zur Übertragung der Zugkräfte

Pos. 5: Geschossverbindung auf Schub

Zur Schubübertragung kommt je Wand ein *BTALU505* von *SST* zum Einsatz. Der Balkenträger ist in der Mitte der Wände W1 und W2 angeordnet, da er so planmäßig keine Zugkräfte aufnimmt, sondern nur der Schubübertragung dient. Die Balkenträger werden mit jeweils 100 *CSA* ⌀5/80 mm auf die Decke des Erdgeschosses geschraubt. In der Fußrippe der Wände des Obergeschosses ist eine Aussparung in Form der Balkenträgers eingefräst. Beim Aufbau wird das OG auf das EG gehoben, so dass der Steg des Balkenträgers in der Fußrippe der Wände des OG liegt. Es werden nun Löcher durch die Fußrippe samt Balkenträger gebohrt und zehn Stabdübel ⌀12/180 eingeschlagen. Abbildung 2-12 zeigt den Schubanschluss.

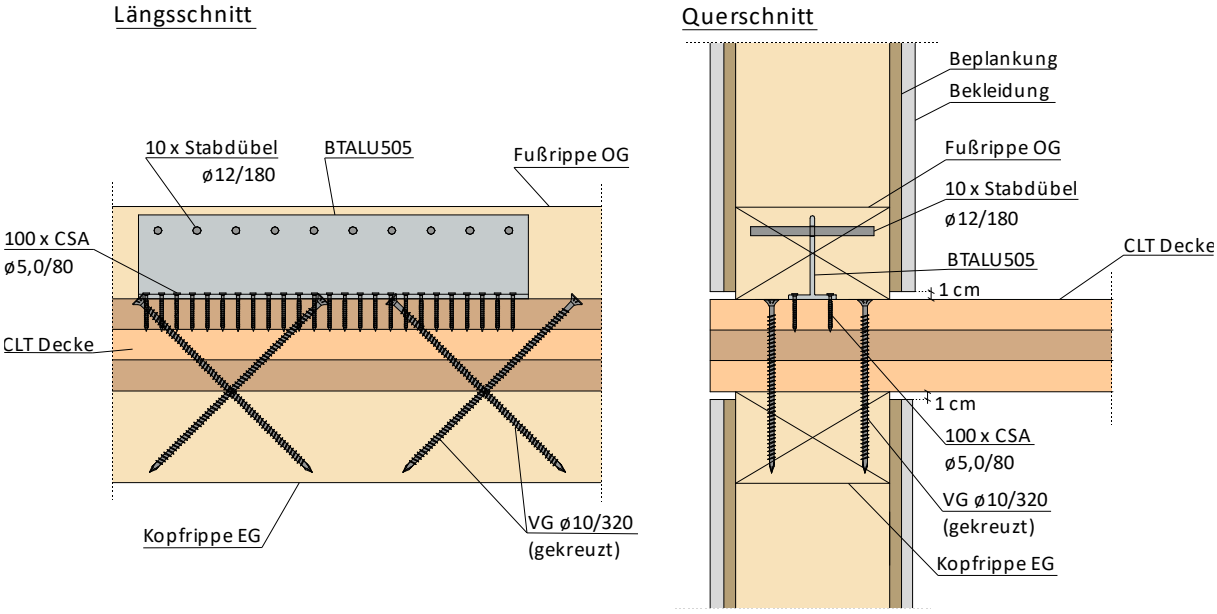


Abbildung 2-12: Detailzeichnung der Geschossverbindung zur Übertragung der Schubkräfte

3 Pushover-Versuch

Der Pushover-Versuch stellt den Hauptversuch der Versuchsreihe dar. Mit diesem Versuch können Tragfähigkeit, Stockwerksverschiebung, Steifigkeit, Fließgrenze und Duktilität ermittelt werden. Im Folgenden werden Versuchsaufbau, Messkonzept, Versuchsdurchführung und die Auswertungsmethodik erläutert.

3.1 Versuchsaufbau

Die folgende Abbildung 3-1 zeigt das 3D-Modell des Probekörper G1 im Prüfstand. Die Massen auf den Geschossdecken simulieren die Stockwerkslasten.

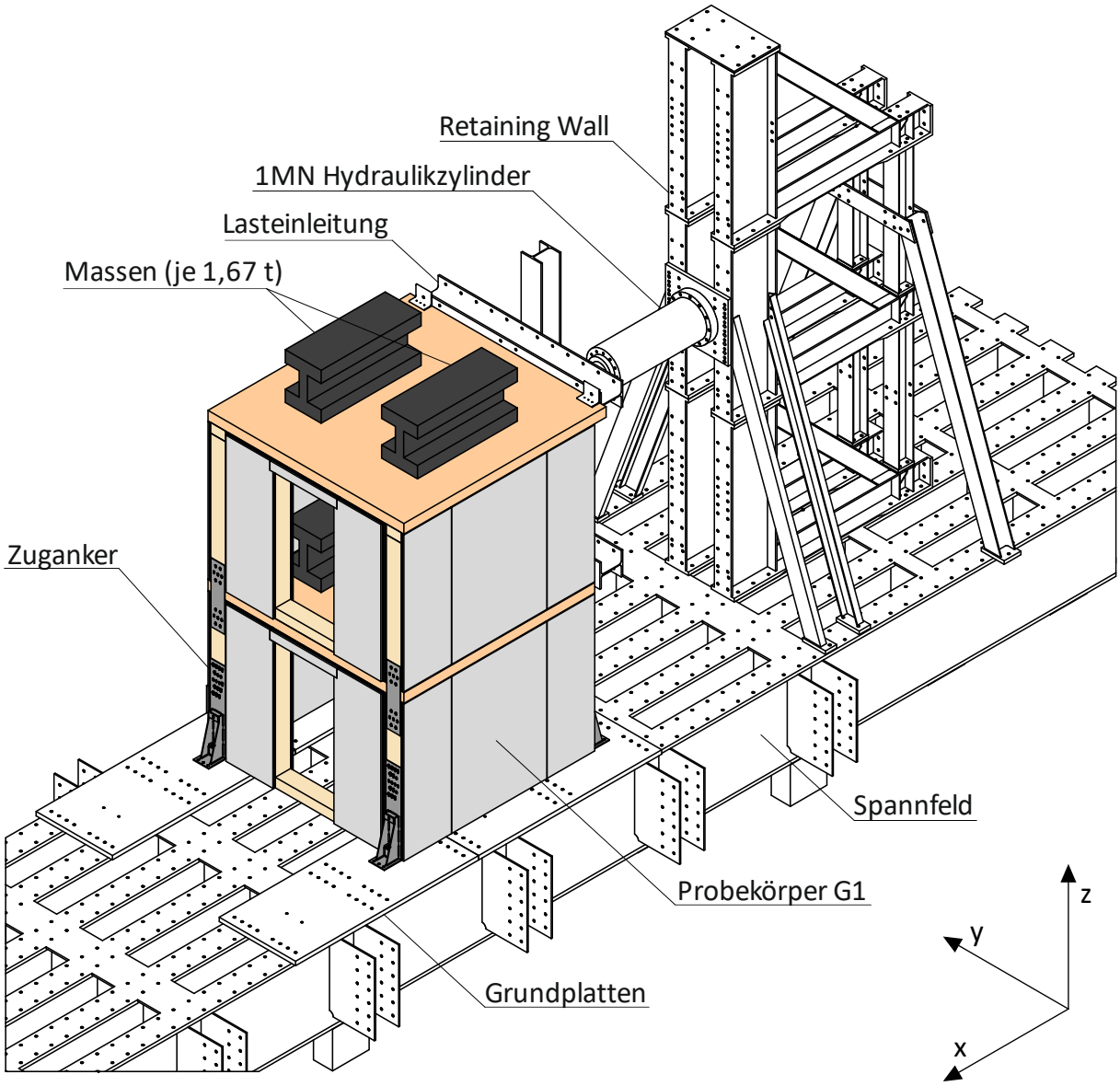


Abbildung 3-1: Übersicht des Probekörpers im Prüfstand für den Pushover-Versuch

Verankerung

Der Probekörper steht auf vier Grundplatten, welche auf dem Spannfeld mit M24 10.9 Schrauben fixiert sind. Die Zuganker sind mit jeweils fünf M20 10.9 Schrauben mit den Adapterplatten verbunden. Der Anker nimmt sowohl die auftretenden vertikalen Zugkräfte als auch die horizontalen Schubkräfte auf und leitet diese über die Adapterplatten ins Spannfeld.

Lasteinleitung

Die Lasteinleitung erfolgt ähnlich wie beim *Holzbeben* Turmversuch [11]. Die Last wird horizontal durch einen 1000 kN Hydraulikzylinder aufgebracht und in eine Traverse aus Stahlträgern übertragen. Zwischen Zylinder und Traverse befindet sich eine Stahlrolle, um die Entstehung eines Biegemoments in der Lasteinleitung zu vermeiden. Die Belastung wird durch die Traverse in die Geschossdecken eingeleitet. Die Traverse ist konstruktiv mit L-Profilen an den Deckenüberständen des Probekörpers befestigt.

Die Zylinderkraft soll der Gesamterdbebenkraft entsprechen und ist horizontal ausgerichtet. Die Befestigungshöhe des Zylinders wird jedoch durch das Lochbild der Retaining Wall bestimmt, wodurch die Lasteinleitungshöhe nicht exakt mit dem Angriffspunkt der Erdbebenresultierenden übereinstimmt. Dies führt zu einer geringen Abweichung von der in 2.2 angenommenen Lastverteilung. Das an die Montagehöhe des Zylinders angepasste statische System ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

3.2 Messeinrichtung

Auch das verwendete Messkonzept orientiert sich an dem Versuch im Projekt *Holzbeben* [11]. Es werden vorrangig Verformungsgrößen gemessen. Dabei werden Stabwegaufnehmer, Seilzüge und Dehnungsmessstreifen eingesetzt. Die Aufzeichnung der Zylinderkraft erfolgt über eine Kraftmessdose. Die Messinstrumente werden an mehrere Messdatenrekorder (*Spider*) angeschlossen, welche mit einem Mess-PC verbunden sind. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit einer Messfrequenz von 20 Hz über das Programm *Diadem* von der Firma *National Instruments.* Die Messfehler der verwendeten Messinstrumente sind in Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-1: Messfehler der verwendeten Messtechnik

Messinstrument	Funktion	Linearitätsabweichung
Wegtaster TR 100	Wegmessung	± 0,075 mm
Seilzug WDS-750-P60-CR-P	Wegmessung	± 0,75 mm
DMS FLAB-6	Dehnungsmessung	± 1 % Toleranz des Gauge Faktors
Kraftmessdose	Kraftmessung	± 0,5 - 1,0 %
Spider	Messwerterfassung	± 0,1 % von Messbereich des Sensors

Die Stabwegaufnehmer zeichnen kleine Relativverschiebungen auf. Diese Messdaten dienen in der Auswertung zur Bestimmung der einzelnen Verschiebungsanteile. Die Dehnungsmessstreifen (DMS) werden an die auf Zug beanspruchten Verankerungselementen (Zuganker und Zuglasche) geklebt. Die Seilzüge messen die absolute Horizontalverschiebung der Geschossdecken und Kopfrippen. Abbildung 3-2 zeigt den Messstellenplan. Tabelle 3-2 enthält die Messstellen und deren Funktion. Zu sehen ist in dem Plan die Ansicht der Wand W1. Die Messtellen auf dieser Seite des Probekörpers sind mit geraden Zahlen gekennzeichnet. Auf der gegenüberliegenden Seite des Probekörpers (Wand W3) werden die Messinstrumente identisch angeordnet, die Messstellen sind hier mit ungeraden Zahlen bezeichnet.

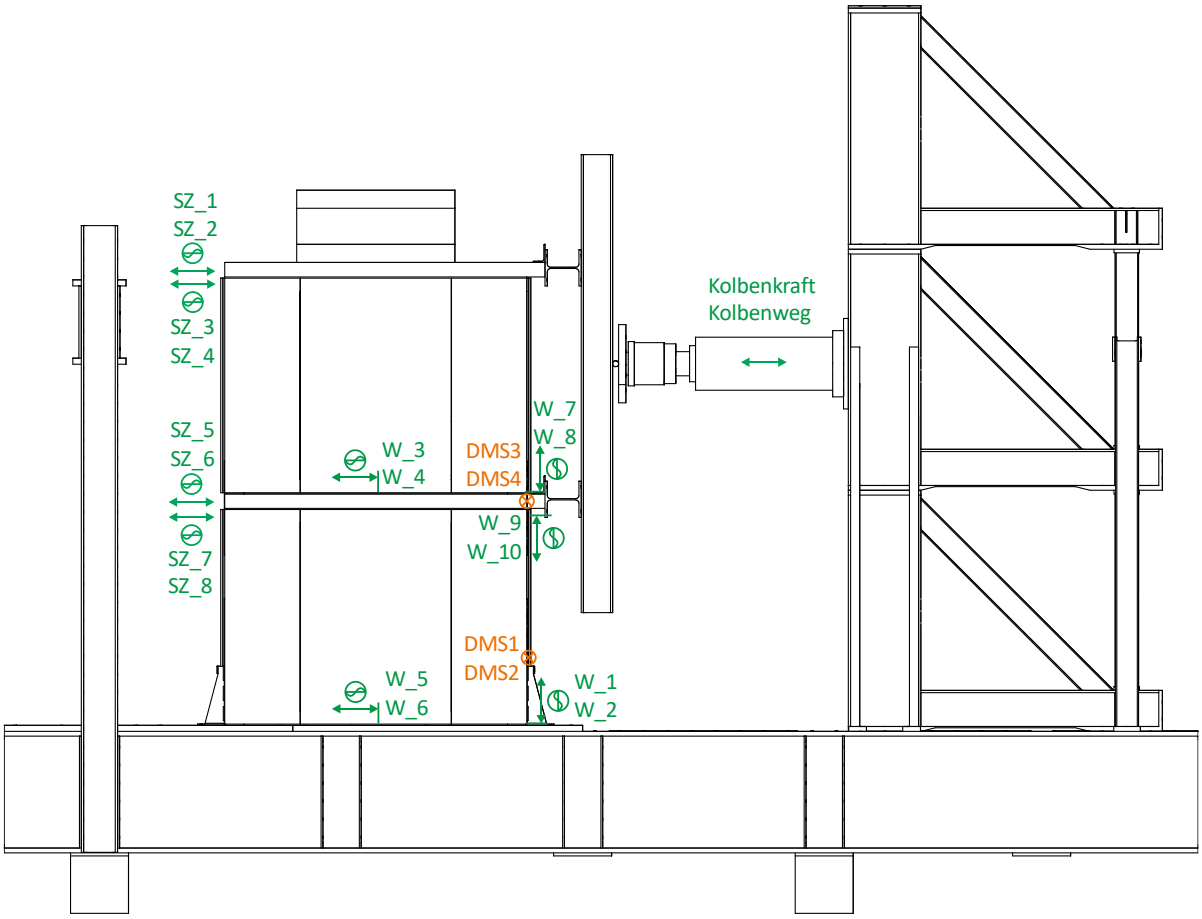


Abbildung 3-2: Messstellenplan des Pushover-Versuchs

Tabelle 3-2: Messstellen und deren Funktionen

Messstelle	Messinstrument	Einheit	Beschreibung
Kolbenkraft	Zylinder	[kN]	Aufgebrachte Zylinderkraft
Kolbenweg	Zylinder	[mm]	Aufgebrachter Zylinderweg
SZ1 & SZ2	Seilzug	[mm]	Absolute horizontale Verschiebung der Decke des OG
SZ3 & SZ4	Seilzug	[mm]	Absolute horizontale Verschiebung der Kopfrippe des OG
SZ5 & SZ6	Seilzug	[mm]	Absolute horizontale Verschiebung der Decke über dem EG
SZ7 & SZ8	Seilzug	[mm]	Absolute horizontale Verschiebung der Kopfrippe des EG
W1 & W2	Stabwegaufnehmer	[mm]	Vertikale Fußpunktverschiebung des zugbeanspruchten Randstiels des EG relativ zum Spannfeld
W3 & W4	Stabwegaufnehmer	[mm]	Horizontale Verschiebung der Fußrippe des OG relativ zur Decke des EG
W5 & W6	Stabwegaufnehmer	[mm]	Horizontale Verschiebung der Fußrippe des EG relativ zum Spannfeld
W7 & W8	Stabwegaufnehmer	[mm]	Vertikale Fußpunktverschiebung des zugbeanspruchten Randstiels des OG relativ zur Decke des EG
W9 & W10	Stabwegaufnehmer	[mm]	Vertikale Kopfverschiebung des zugbeanspruchten Randstiels des EG relativ zur Decke des EG
DMS1 & DMS2	Dehnungsmessstreifen	[µm/m]	Dehnung der zugbeanspruchten Anker
DMS3 & DMS4	Dehnungsmessstreifen	[µm/m]	Dehnung der zugbeanspruchten Laschen

3.3 Versuchsdurchführung

Als erstes wird die Lasteinleitungstraverse zwischen Probekörper und Zylinder montiert, welche für die vorangegangenen dynamischen Tests noch nicht befestigt war. Hierfür wird der Zylinder zurückgefahren, die Traverse mit dem Hallenkran eingehoben, die L-Profile am Probekörper befestigt und der Zylinder wieder ausgefahren. In Abbildung 3-3 ist der Probekörper im Prüfstand dargestellt.



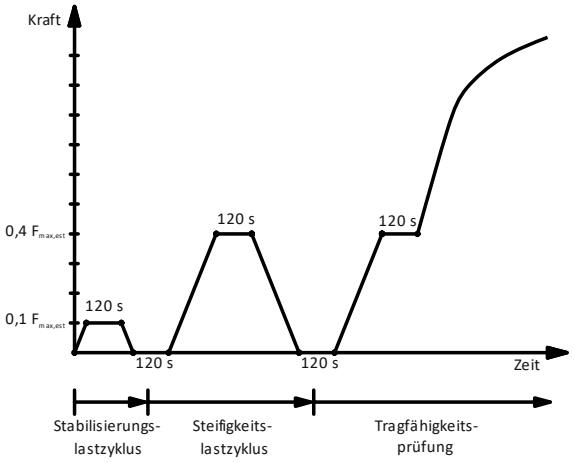


Abbildung 3-3: Probekörper im Prüfstand (links); Verkürztes monotones Lastprotokoll angelehnt an ISO 21581 (rechts) [12]

Vor Versuchsbeginn werden alle Wände des Probekörpers und alle Anschlüsse einzeln fotografiert. Danach werden Kameras aus mehreren Perspektiven aufgestellt, die während des Versuchs Zeitrafferaufnahmen des Probekörpers erstellen. Anschließend werden das Signal und der korrekte Anschluss aller Messinstrumente überprüft und die Messwerte genullt. Dann starten mehrere Personen gleichzeitig die Zeitraffer und die Aufzeichnung der Messdaten in *Diadem*. Kurz danach wird die Belastung auf den Probekörper aufgebracht.

Die Zylinderkraft wird weggesteuert in Anlehnung an das monotone Lastprotokoll nach ISO 21581 [12] aufgebracht. Die dafür erforderliche abgeschätzte Maximalkraft $F_{max,est}$ stammt aus den Vorbemessungen in 2.2 und entspricht 312 kN. Das monotone Lastprotokoll umfasst drei Belastungszyklen. Der erste Zyklus ist der Stabilisierungszyklus, hier wird die Belastung auf 10 % von $F_{max,est}$ gesteigert, kurz aufrechterhalten und wieder entlastet. Darauf folgt der Steifigkeitszyklus, bei welchem der Probekörper mit 40 % von $F_{max,est}$ belastet und anschließend wieder entlastet wird. Der letzte Zyklus ist die Traglastprüfung. Hier wird die Kraft zunächst auf 40 % von $F_{max,est}$ erhöht, dort gehalten und schließlich bis zum Versagen des Probekörpers gesteigert. Der Belastungsverlauf ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Der Stabilisierungszyklus und der Steifigkeitszyklus werden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,02 mm/s durchgeführt. Für den Traglastzyklus wird die Geschwindigkeit auf 0,1 mm/s erhöht. Der Zylinderweg wird erhöht, bis die Zylinderkraft nach Erreichen der Tragfähigkeit F_{max} auf 70 % von F_{max} abgefallen ist.

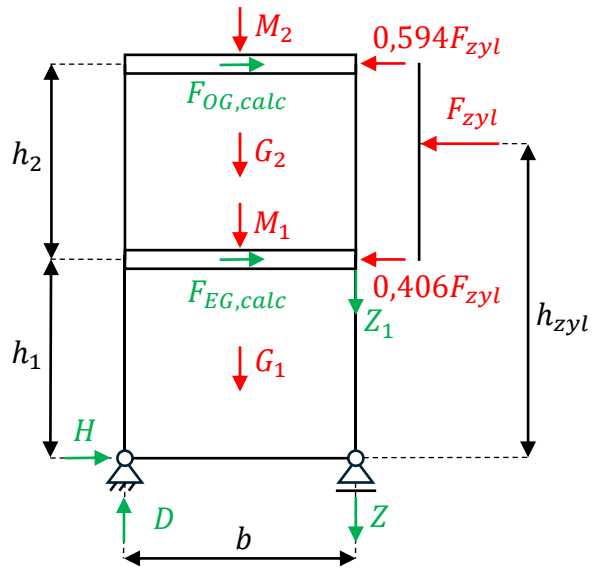
Anschließend wird die Zylinderkraft weggesteuert auf 0 kN abgesenkt. Danach werden die Zeitrafferaufnahmen und die Aufzeichnung in *Diadem* zeitgleich gestoppt. Die Daten werden schließlich gesichert. Abschließend werden erneut Fotos von allen Wänden gemacht und entstandene Schäden fotografiert. Der Versuch endet mit dem Messen der Holzfeuchte und Temperatur.

3.4 Datenauswertung

Zur Auswertung der Messdaten wird das Programm *Flexpro 2021* der Firma *Weisang GmbH* verwendet. Im Folgenden wird die Auswertungsmethodik erläutert. Zunächst wird das statische System erklärt, das sich aus dem Versuchsaufbau ergibt. Anschließend wird die Ermittlung der Verformungsanteile erläutert. Abschließend werden einige Definitionen für Auswertungsparameter eingeführt.

Einwirkungsgrößen

Abbildung 3-4 zeigt das statische System und die Einwirkungen auf die einzelnen Komponenten des Testgebäudes. Diese Kräfte werden in den Last-Verformungs-Diagrammen in 3.5 wieder aufgegriffen. M_1 und M_2 sind die Eigengewichte der Stahlmassen auf den Decken. G_1 ist das Eigengewicht des Erdgeschosses und G_2 das Eigengewicht des Obergeschosses.



$M_1 = 2 \cdot 16{,}4\ kN = 32{,}8\ kN$

$M_2 = M_1 = 32{,}8\ kN$

$G_1 = 18{,}0\ kN$

$G_2 = 18{,}0\ kN$

$h_1 = 1{,}86\ m$

$h_2 = 1{,}92\ m$

$h_{zyl} = 3{,}00\ m$

$b = 2{,}50\ m$

Abbildung 3-4: Statisches System zur Berechnung der Stockwerkslasten und Auflagerkräfte

Einwirkungen auf die Stockwerke

$$F_{EG,calc} = F_{zyl} \tag{3.1}$$

$$F_{OG,calc} = 0{,}594 \cdot F_{zyl} \tag{3.2}$$

Einwirkungen je Wand in Lastrichtung

$$F_{Wand,EG,calc} = 0{,}5 \cdot F_{EG,calc} = 0{,}5 \cdot F_{zyl} \tag{3.3}$$

$$F_{Wand,OG,calc} = 0{,}5 \cdot F_{OG,calc} = 0{,}297 \cdot F_{zyl} \tag{3.4}$$

Einwirkungen auf Zuganker und Zuglaschen

$$F_{ZA,calc} = 0{,}5 \cdot Z = 0{,}5 \cdot \left(\frac{h_{zyl}}{b} \cdot F_{zyl} - \frac{M_1 + G_1 + M_2 + G_2}{2}\right) = 0{,}6 \cdot F_{zyl} - 25{,}4\ kN \tag{3.5}$$

$$F_{ZL,calc} = 0{,}5 \cdot Z_1 = 0{,}5 \cdot \left(\frac{h_2}{b} \cdot 0{,}594 \cdot F_{zyl} - \frac{M_2 + G_2}{2}\right) = 0{,}23 \cdot F_{zyl} - 12{,}7\ kN \tag{3.6}$$

Verformungsgrößen

Durch das Aufbringen der Kraft kommt es zur Verformung des Probekörpers. Die Gesamtverformung ist die Summe der drei Komponenten: Starrkörperrotation, Starrkörperverschiebung und Schubverformung der Wände. Durch das umfassende Messsystem aus Stabwegaufnehmern und Seilzügen können die einzelnen Verformungsanteile bestimmt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Schubverformung.

Für eine einheitliche Analyse der Messergebnisse wird zunächst die Vorzeichenkonvention definiert, die in der kommenden Auswertung verwendet wird. Je nach Ausrichtung des Messinstruments wird das Vorzeichen korrigiert. Davon betroffen sind alle Seilzüge und die Stabwegaufnehmer W_7 bis W_10. In Abbildung 3-1 ist das Koordinatensystem festgelegt.

Die folgende Abbildung zeigt die einzelnen Verformungsanteile exemplarisch für die Vorderseite des Probekörpers (Wand W1). Die Berechnung der Verformungsanteile wird im Anschluss ebenfalls für die Vorderseite durchgeführt. Dies ist durch den Index V gekennzeichnet.

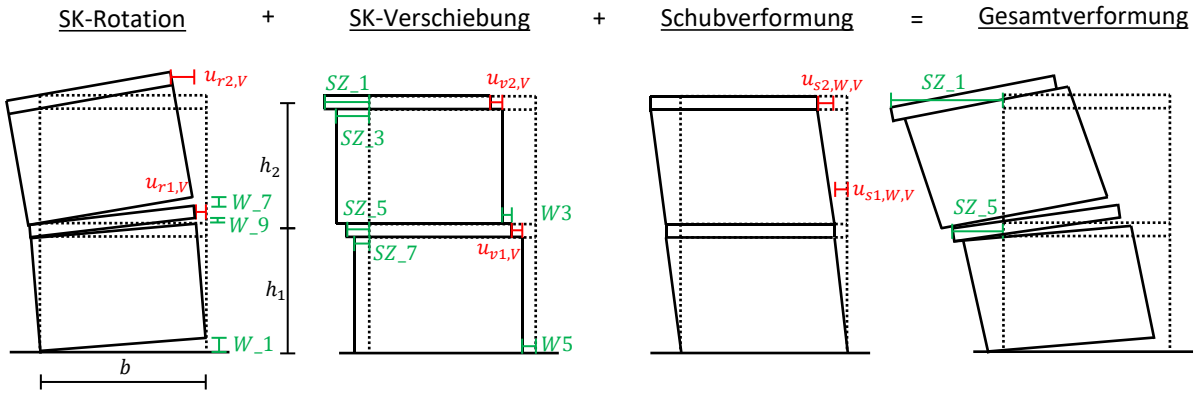


Abbildung 3-5: Zusammensetzung der Gesamtverformung; gemessene Größen in grün dargestellt

Bis auf die Wandschubverformung werden alle Verformungsanteile durch die Messtechnik erfasst. Die Geschossverformung ergibt sich aus den Messdaten von SZ_1 und SZ_5 zu:

$$u_{ges1,V} = SZ_5 \tag{3.7}$$

$$u_{ges2,V} = SZ_1 - SZ_5 \tag{3.8}$$

Der horizontale Anteil u_{r1} und u_{r2} der Starrkörperrotation kann wie folgt berechnet werden:

$$u_{r1,V} = W_1 \cdot \frac{h_1}{b} = W_1 \cdot \frac{1{,}86\ m}{2{,}50\ m} \tag{3.9}$$

$$u_{r2,V} = \frac{1}{2{,}50\ m} \cdot (W_1 \cdot 1{,}92\ m + W_7 \cdot 1{,}86\ m + W_9 \cdot 1{,}98\ m) \tag{3.10}$$

Die Starrkörperverschiebung der Geschossdecken relativ zur Wand u_{v1} und u_{v2} ergibt sich aus dem folgenden Zusammenhang:

$$u_{v1,V} = SZ_5 - SZ_7 \tag{3.11}$$

$$u_{v1,V} = SZ_1 - SZ_3 \tag{3.12}$$

Die Wandschubverformung ergibt sich zu:

$$u_{s1,W,V} = u_{ges1,V} - u_{r1,V} - u_{v1,V} - W_5 \tag{3.13}$$

$$u_{s2,W,V} = u_{ges2,V} - u_{r2,V} - u_{v2,V} - W_3 \tag{3.14}$$

Die Geschossschubverformung ist definiert als:

$$u_{s1,G,V} = u_{ges1,V} - u_{r1,V} - W_5 \tag{3.15}$$

$$u_{s2,G,V} = u_{ges2,V} - u_{r2,V} \tag{3.16}$$

Die Gesamtschubverformung des Testgebäudes ist dann entsprechend:

$$u_{s,W,V} = u_{s1,W,V} + u_{s2,W,V} \tag{3.17}$$

$$u_{s,G,V} = u_{s1,G,V} + u_{s2,G,V} \tag{3.18}$$

Die Formeln gelten analog mit folgenden Anpassungen für die Rückseite des Probekörpers:

$$W_1 \mathrel{\widehat{=}} W_2 \qquad W_7 \mathrel{\widehat{=}} W_8 \qquad W_9 \mathrel{\widehat{=}} W_10$$

$$SZ_1 \mathrel{\widehat{=}} SZ_2 \qquad SZ_3 \mathrel{\widehat{=}} SZ_4 \qquad SZ_5 \mathrel{\widehat{=}} SZ_6 \qquad SZ_7 \mathrel{\widehat{=}} SZ_8$$

Die berechneten Verformungsanteile der Rückseite werden mit dem Index R gekennzeichnet. Für die Auswertung der Last-Verformungsbeziehungen wird der Mittelwert von Vorder- und Rückseite gebildet.

Stockwerksverschiebung

Die Stockwerksverschiebung ist die relative Horizontalverschiebung einer Geschossdecke, dividiert durch die Geschosshöhe. Im Rahmen der Auswertung entspricht die Horizontalverschiebung der Gesamtverformung eines Geschosses also u_{ges1} beziehungsweise u_{ges2}. Die Stockwerksverschiebung wird in Prozent angegeben. Die Berechnung erfolgt mit folgender Formel:

$$v_i = \frac{u_{ges,i}}{h_i} \cdot 100\ \% \tag{3.19}$$

Mit: v_i Stockwerksverschiebung des Stockwerks i [%]

$u_{ges,i}$ Relative Horizontalverschiebung des Stockwerks i [mm]

h_i Höhe des Stockwerks i [mm]

Auswertungsparameter

Im Folgenden werden Definitionen für die Auswertungsparameter gegeben:

- Tragfähigkeit F_{max}
- Steifigkeit K
- Duktilität D
- Grenzverschiebung l_u
- Fließgrenze l_y

Bei der Auswertung werden die Vorgaben der ISO 21581 [12] beachtet. Diese Norm regelt monotone und zyklische Versuche an Wandtafeln in Holzbauweise. Obwohl die Norm nicht für Gebäudeversuche konzipiert ist, bietet sie Definitionen für Steifigkeit, Grenzverformung und Tragfähigkeit, welche im Rahmen der Auswertung mit einigen Anpassungen verwendet werden. Der in der Norm definierte Ganztafelweg entspricht im Gebäudeversuch der Horizontalverschiebung der Kopfrippen.

Tragfähigkeit und Grenzverschiebung

Tragfähigkeit F_{max} und Grenzverschiebung l_u werden nach ISO 21581 [12] an der Last-Verformungs-Kurve bestimmt. Bei einem duktilen Verhalten, wie es in diesem Versuch erwartet wird, ist F_{max} als maximal erreichte Belastung definiert. Die Grenzverschiebung ist die Verformung des Bauteils, die bei 80 % der maximalen Tragfähigkeit nach Erreichen von F_{max} auftritt.

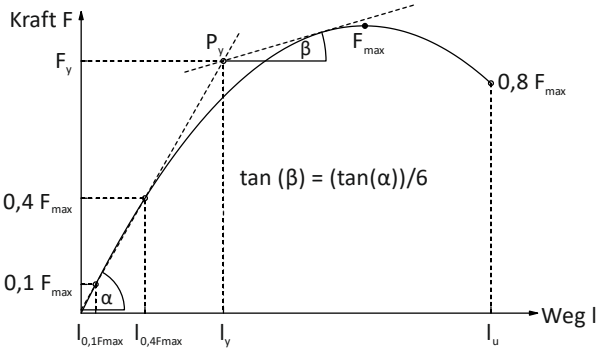
Steifigkeit

Die Steifigkeit wird gemäß ISO 21581 [12] als Steigung einer definierten Sekante berechnet. Die Berechnungspunkte liegen bei Erreichen von $0{,}1 \cdot F_{max}$ und $0{,}4 \cdot F_{max}$ in der Belastungsphase. Die Steifigkeitssekante ist in Abbildung 3-6 zu sehen. Mit folgender Formel wird die Steifigkeit berechnet:

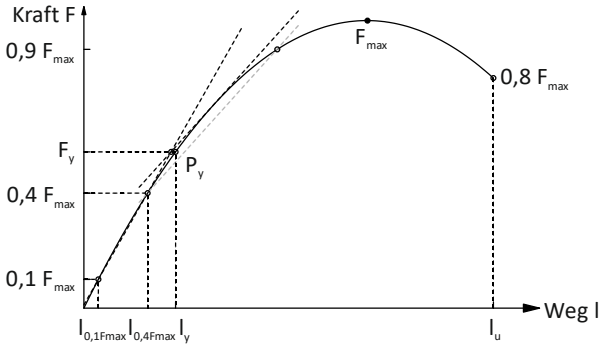
$$K = \frac{(0{,}4 - 0{,}1) \cdot F_{max}}{l_{0{,}4F_{max}} - l_{0{,}1F_{max}}} \tag{3.20}$$

Fließgrenze:

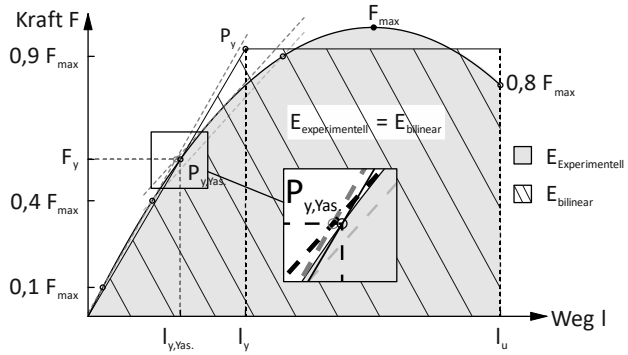
Da die Fließgrenze l_y international nicht eindeutig festgelegt ist und die Definitionen zu signifikanten Werteunterschieden der Fließgrenzen führt, wird die Fließgrenze aufgrund der Grundlage von drei festgelegten Definitionen ermittelt: Definition nach DIN EN 12512 [13], Definition nach Yasumura et al. 1998 [14], Definition nach Kobayashi et al. 2011 [15].



DIN EN 12512 [13]



Yasumura et al. 1998 [14]



Kobayashi et al. 2011 [15]

Abbildung 3-6: Ausgewählte Definitionen der Fließgrenze nach Optimberquake [16]

Duktilität

Die Duktilität ergibt sich aus dem Verhältnis der Grenzverschiebung zur Fließgrenze:

$$D = \frac{l_u}{l_y} \tag{3.21}$$

3.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Pushover-Versuchs vorgestellt. Dafür wird zunächst die aufgebrachte Einwirkung und das daraus resultierende Versagensbild beschrieben. Im Anschluss wird das Last-Verformungs-Verhalten des Testgebäudes genauer untersucht.

3.5.1 Einwirkung und Versagen

Abbildung 3-7 zeigt den Kolbenweg und die entsprechende Kolbenkraft über die Versuchsdauer. In der Abbildung sind der Stabilisierungs-, der Steifigkeitszyklus und die Tragfähigkeitsprüfung deutlich zu erkennen. Der Verlauf bietet einen Überblick über den Einwirkungsverlauf im Versuch.

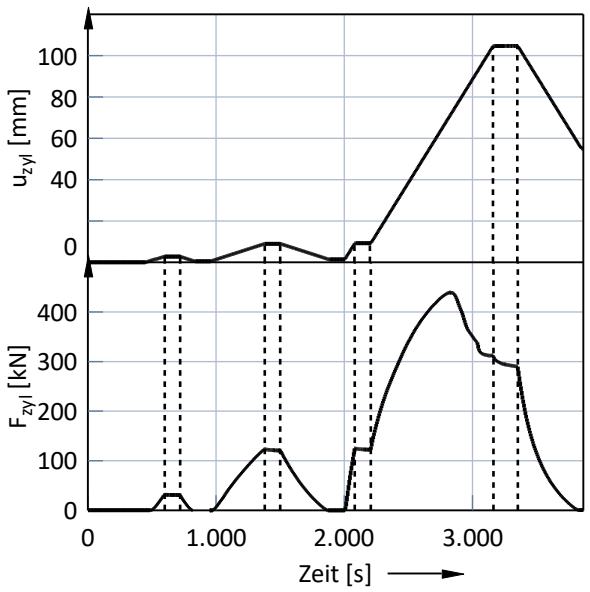


Abbildung 3-7: Zeitverläufe des Zylinderwegs (oben) und der Zylinderkraft (unten)

Versagensmechanismen

Das Versagen des Probekörpers ist duktil und tritt im Erdgeschoss auf. Es kommt zu einem Durchdrücken der Kopfrippe der Erdgeschosswände in Haupttragrichtung, was eine starke Verformung der Zuglaschen mit sich zieht. Infolge dieser Verformung verschiebt sich das Obergeschoss samt Zwischendecke und Kopfrippe des Erdgeschosses.

Bei den Erdgeschosswänden in Haupttragrichtung kommt es beim Erreichen der Traglast zum Verbindungsmittelversagen im oberen Bereich der Wandtafeln. Dabei kann sowohl ein Herausziehen der Klammern der Bekleidung als auch ein Durchziehen des Klammerrückens durch die Beplankung beobachtet werden. Außerdem können Schrägrisse in den Bekleidungstafeln festgestellt werden, diese sind im Erdgeschoss auf der Innenseite stärker ausgeprägt. Vereinzelte Risse sind auch im Obergeschoss erkennbar. Beplankung und Bekleidung verdrehen sich im Erdgeschoss als eine zusammenhängende Einheit. Infolge dieser Drehung kommt es zum Kontakt der Plattenränder mit dem Deckenvorsprung beziehungsweise den Grundplatten. Die folgende Abbildungen zeigen die beschriebenen Phänomene.



a) b)

Abbildung 3-8: Fotos des Probekörpers: a) Vor der Belastung b) Versagensbild nach Belastung



a) b) c)

Abbildung 3-9: Versagensmodi: a) Klammerherausziehen und -durchziehen an der Kopfrippen im EG b) Durchdrücken der Kopfrippe und dadurch verformte Zuglasche c) Riss der innenseitigen Bekleidung im EG

Infolge des Durchdrückens der Kopfrippe kommt es zu einem Ablösen der Wegaufnehmer 9 und 10. Diese liefern deshalb nur bis zu diesem Zeitpunkt Messergebnisse.

3.5.2 Last-Verformungs-Verhalten

Im Folgenden wird das Last-Verformungsverhalten des Probekörpers beleuchtet. Dafür wird zunächst die Kraft-Weg-Kurve des gesamten Probekörpers vorgestellt. Nachfolgend wird auf die Stockwerksverschiebung der Geschosse eingegangen. Darauf folgt die Präsentation des Kraft-Weg-Verlaufs auf Wandebene. Abschließend werden die in 3.4 definierten Auswertungsparameter und die Ergebnisse der Dehnungsmessungen vorgestellt.

Kraft-Weg – Gebäudeebene

Der Kraft-Weg-Verlauf des Testgebäudes ist in Abbildung 3-10 dargestellt. Auf der y-Achse ist die Zylinderkraft aufgetragen, die x-Achse enthält die mittlere Horizontalverschiebung der Decke des Obergeschosses.

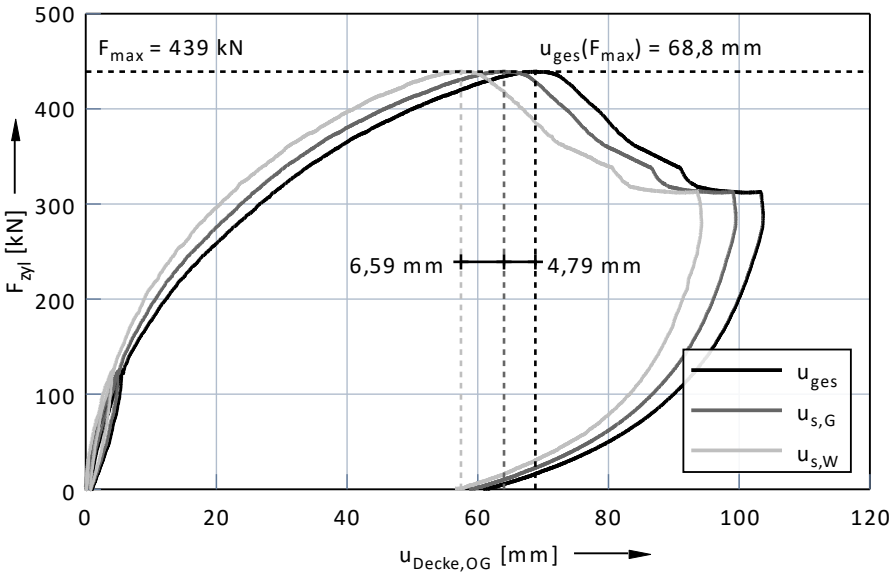


Abbildung 3-10: Kraft-Weg-Kurve auf Gebäudeebene

Das Diagramm zeigt den Verlauf der Gesamtverformung, der Geschossschubverformung und der Wandschubverformung bei entsprechender Einwirkungskraft. In der Grafik sind die maximal erreichte Zylinderkraft und die Gesamtverformung bei dieser Kraft gekennzeichnet. Außerdem sind die Verformungsdifferenzen zu diesem Zeitpunkt markiert. Im Versuch wird eine maximale Zylinderkraft von 439 kN erreicht.

Stockwerksverschiebung

Abbildung 3-11 zeigt den Verlauf der Stockwerksverschiebung bei entsprechender Einwirkung. Die y-Achse enthält die in 3.4 definierte Stockwerkskraft. Auf der x-Achse ist die Stockwerksverschiebung aufgetragen. Zusätzlich sind in dem Diagramm die Structural Performance Levels *Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS)* und *Collapse Prevention (CP)* nach FEMA 356 [17] gekennzeichnet.

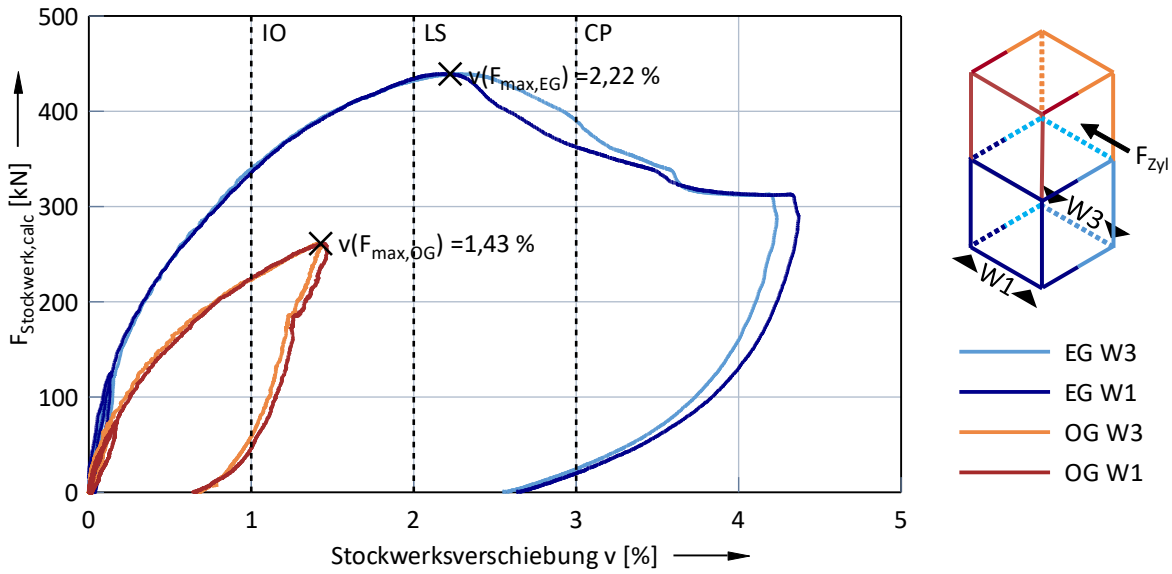


Abbildung 3-11: Kraft-Stockwerksverschiebung

Das Diagramm zeigt die Verläufe der Stockwerksverschiebung für das Erdgeschoss und das Obergeschoss. Dabei sind die Verschiebungen der beiden Geschosse, basierend auf den Messdaten der Seilzüge 1 und 5 (Vorderseite, Wand W1) sowie der Seilzüge 2 und 6 (Rückseite, Wand W3) dargestellt. Die gekennzeichneten Stockwerksverschiebungen bei maximaler Kraft entsprechen dem Mittelwert von Wand 1 und Wand 3.

Kraft-Weg – Wandebene

In Abbildung 3-10 ist der Kraft-Weg-Verlauf der Wände im Erd- und Obergeschoss dargestellt. Auf der y-Achse ist die gemäß 3.4 berechnete Wandkraft aufgetragen. Sie basiert auf der Annahme, dass die beiden Wände in Lastrichtung jeweils die Hälfte der Stockwerkskraft aufnehmen. Auf der x-Achse ist die mittlere Verformung der Kopfrippe der Wände dargestellt.

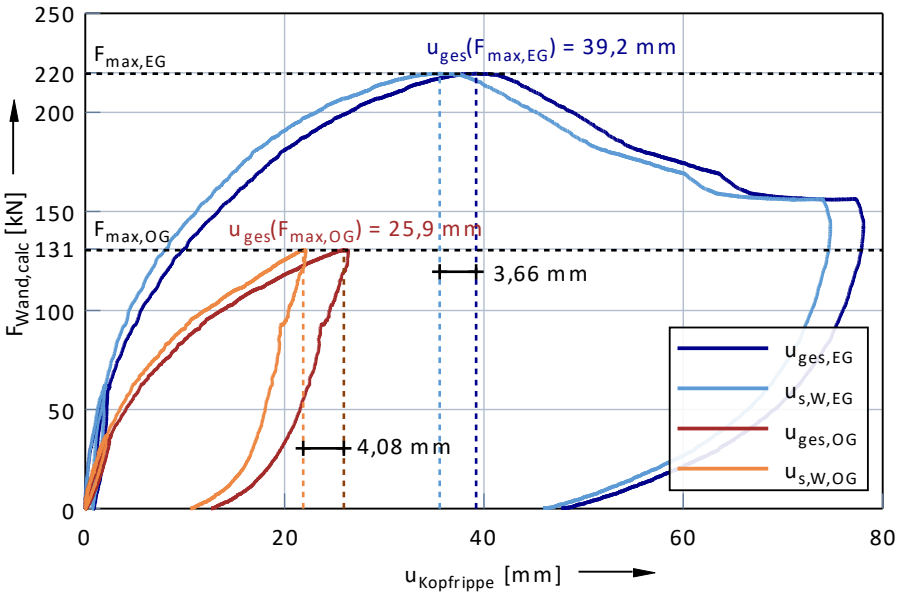


Abbildung 3-12: Kraft-Weg-Kurve auf Wandebene

In dem Diagramm wird die Gesamtverformung und Wandschubverformung der Wände verglichen. Es sind die Kraft (halbe Geschosskraft) und die Verformung je Wand dargestellt. Außerdem ist jeweils der Unterschied zwischen Schub- und Gesamtverformung gekennzeichnet.

Die Maximalkraft je Erdgeschosswand beträgt 220 kN. Im Obergeschoss ist die Maximalkraft 131 kN je Wand. Der Anteil der Schubverformung an der Gesamtverformung beträgt bei maximaler Kraft 91 % bei den Erdgeschosswänden und 84 % bei den Obergeschosswänden.

3.5.3 Auswertungsparameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den in 3.4 definierten Auswertungsparametern vorgestellt. Die Werte werden auf Wandebene bestimmt und lassen sich für die Obergeschosswände nicht bestimmen, weil deren Tragfähigkeit im Versuch nicht erreicht wird. Die Parameter werden einmal auf Grundlage der Gesamtverformung und einmal auf Basis der Schubverformung der Wände bestimmt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Auswertung für das Erdgeschoss

	F_{max} [kN]	K [kN/mm]	l_u [mm]	$l_{y,DIN}$ [mm]	$l_{y,Yas}$ [mm]	$l_{y,Kob}$ [mm]	D_{Din} [-]	D_{Yas} [-]	D_{Kob} [-]
u_{ges}	220	19,8	59,0	6,96	7,09	12,5	8,48	8,32	4,73
$u_{s,w}$	220	25,5	55,5	5,17	5,79	10,1	10,7	9,58	5,49

4 Dynamische Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen ist es, die dynamischen Eigenschaften des Testgebäudes zu bestimmen. Untersucht werden primär die Eigenfrequenzen, die Eigenmoden bzw. Schwingformen und die Dämpfung. Im Folgenden werden der Versuchsaufbau, das Messkonzept, die Versuchsdurchführung und der Auswertungsvorgang beschrieben.

4.1 Versuchsaufbau

Die Verankerung des Probekörpers erfolgt auf dieselbe Weise wie im Pushover-Versuch. Die Massen sind für die dynamischen Untersuchungen bereits auf den Geschossdecken vorhanden.

Für die dynamischen Untersuchungen wird der Schwingungserreger (Shaker) *BD.5* der Firma *Wölfel Engineering GmbH & Co. KG* verwendet. Der Shaker ist eine Metallkonstruktion. Er besitzt zwei Schienen mit einem darauf beweglichen Schlitten. Der Schlitten ist mit Massen bestückt und wird durch einen Linearmotor angetrieben. Der Shaker ist mit einem Steuer-PC verbunden, mit diesem können Anregungsfrequenz, - kraft und -dauer vorgegeben werden. Beim Start der Anregung beginnt der Shaker, den Schlitten entsprechend zu bewegen. Durch die Bewegung der Massen entstehen Trägheitskräfte, welche in die Struktur eingeleitet werden. Der in den dynamischen Untersuchungen eingesetzte Shaker ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

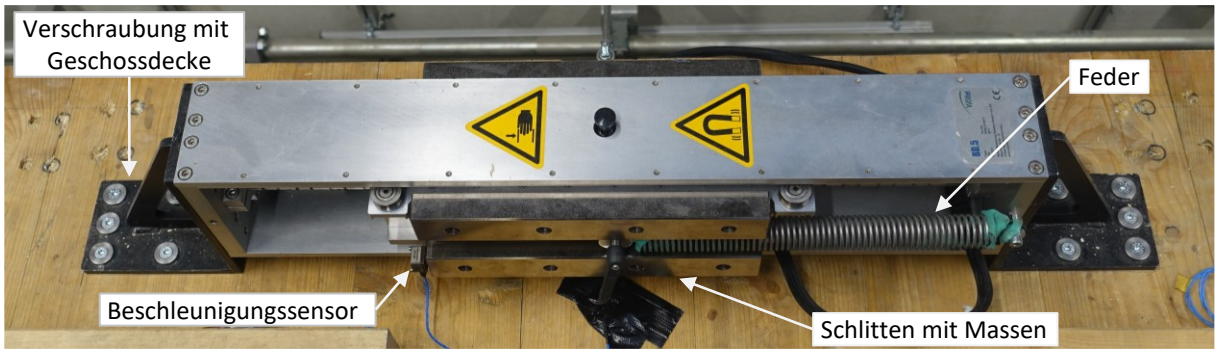


Abbildung 4-1: Schwingungserreger BD.5 im Horizontalbetrieb

Der Schwingungserreger wird immer auf die höchste Geschossdecke geschraubt. Die Messungen werden für eine Richtung durchgeführt, dann wird der Shaker um 90 Grad gedreht und dieselben Messungen wiederholt. Der Shaker wird dabei für die Anregung in der Haupttragrichtung (x-Richtung) mittig platziert. Für die Anregung in der Nebentragrichtung (y-Richtung) wird der Shaker ausmittig befestigt. So kann auch das Torsionsverhalten des Probekörpers untersucht werden. Bei den dynamischen Untersuchungen D1 wird auch in y-Richtung zentrisch angeregt. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 4-2 einmal für die Versuchsreihe D1 mit Anregung in x-Richtung und einmal für D2 mit ausmittiger Anregung in y-Richtung dargestellt. Die Versuchsaufbauten für die übrigen dynamischen Untersuchungen können Anhang C entnommen werden.

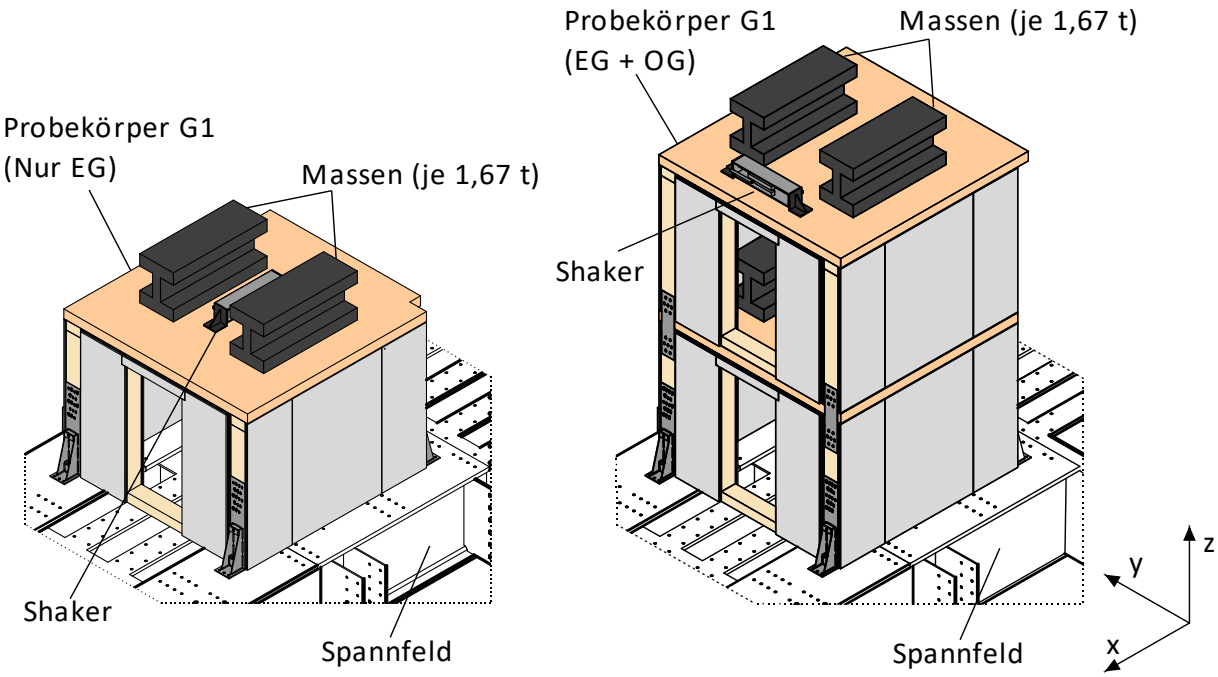


Abbildung 4-2: Versuchsaufbau der dynamischen Untersuchungen mit zentrischer Anregung in x-Richtung der Versuchsreihe D1 (links) und exzentrischer Anregung in y-Richtung der Versuchsreihe D2 (rechts)

4.2 Messeinrichtung

Das Messkonzept besteht bei den dynamischen Versuchen im Wesentlichen aus Beschleunigungssensoren. Die verwendeten Beschleunigungssensoren besitzen jeweils eine Messrichtung.

Im Laufe der dynamischen Untersuchungen werden teilweise Beschleunigungssensoren von den Geschossdecken entfernt und am Shaker montiert. Dies bietet Aufschlüsse über die Erregungsfrequenz. Dabei verbleiben immer mindestens drei Sensoren auf jeder Decke, deren Messrichtungen sich nicht in einem Punkt schneiden. Unter der Annahme einer starren Deckenscheibe werden so alle drei Freiheitsgrade abgedeckt. Drei Sensoren genügen also, um die horizontale Bewegung der Decken ganzheitlich abzubilden. Vertikale Beschleunigungen werden nicht gemessen. Die folgende Tabelle beinhaltet die verwendete Messtechnik.

Tabelle 4-1: Übersicht der bei den dynamischen Untersuchungen verwendeten Messinstrumente

Anzahl	Messinstrument	Messbereich	Bezeichnung
8	Beschleunigungssensor	±3 g	a_x1, a_y1, a_x2, a_y2, a_x3, a_y3, a_x4, a_y4,

Das Messkonzept unterscheidet sich für den Test D1, bei dem nur das Erdgeschoss steht, von den Tests D2 und D3, bei denen der vollständige Probekörper aufgebaut ist. Bei D1 werden alle Beschleunigungssensoren auf der Erdgeschossdecke montiert, bei dem zweigeschossigen Aufbau auf beide Geschossdecken verteilt. In Abbildung 4-3 sind die Positionen und Messrichtungen der Beschleunigungssensoren für die dynamischen Untersuchungen dargestellt. Die Sensoren befinden sich jeweils eine Wanddicke (266 mm) vom Deckenrand eingerückt. So zeichnen die Messinstrumente bei D1 und D2 beziehungsweise D3 im Erdgeschoss die Beschleunigungen an derselben Stelle auf.

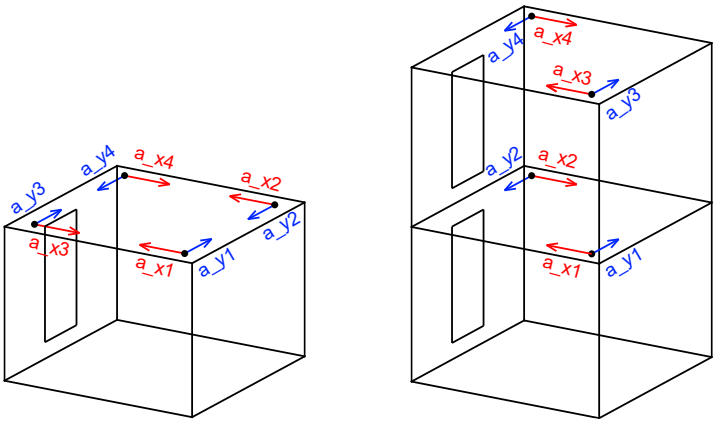


Abbildung 4-3: Positionierung der Beschleunigungssensoren und deren positive Messrichtung für die Versuche D1 (Links) und D2 und D3 (Rechts) der Versuchsreihe G1

Die Messdaten werden mit einer Messfrequenz von 500 Hz über einen Messdatenrekorder, welcher mit einem Mess-PC verbunden ist, aufgezeichnet. Die Daten werden mit *Diadem* erfasst und abgespeichert. *Diadem* bietet auch die Möglichkeit zur Analyse der Daten vor Ort.

4.3 Versuchsdurchführung

Die dynamischen Tests beginnen mit dem Start der Aufzeichnung der Messdaten in *Diadem*. Anschließend wird die Shaker-Anregung gestartet. Durch den Steuer-PC des Shakers können verschiedene Anregungsmuster vorgegeben werden. Folgende Muster werden im Rahmen der Untersuchungen verwendet:

Sweep

Es wird ein Frequenzbereich abgefahren. Es wird bei einer Startfrequenz gestartet und bis zu einer Zielfrequenz die Anregungsfrequenz linear erhöht. Die Erregerkraft wird dabei konstant gehalten. Messungen mit diesem Anregungsmuster werden zur Analyse der Schwingform und zur Bestimmung der Dämpfung mit der Halbwertsbreitenmethode verwendet.

Noise

Es wird ein Frequenzbereich vorgegeben. Die Frequenzen innerhalb dieses Bereiches werden zufällig angesteuert. Die Anregungskraft ist hierbei nicht konstant. Messungen mit dieser Anregungsart werden zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und für die Kontrolle mittels FDD verwendet.

Single

Es wird gezielt eine Frequenz angesteuert. Die Anregungskraft ist konstant. Messungen mit diesem Anregungsmuster werden zur Bestimmung der Dämpfung anhand einer Ausschwingkurve verwendet.

Eine Übersicht aller durchgeführten Messungen befindet sich in Anhang C. In dieser Arbeit werden die Messungen gemäß Tabelle 4-2 bezeichnet:

Tabelle 4-2: Schlüssel zur Bezeichnung der Messungen

Beispiel: M00_n_x_c_01_02_500

M00	Laufende Nummerierung der Messungen
_n	Noise
_s	Sweep
_e	Einzelfrequenzanregung (Single)
_i	Impuls
_a	Ambient
_x	Anregung in x-Richtung (Haupttragrichtung)
_y	Anregung in y-Richtung (Nebentragrichtung)
_c	Zentrische Anregung
_e	Exzentrische Anregung
_01	Untere Frequenzgrenze [Hz]/ Anregungsfrequenz [Hz] bei Einzelfrequenzanregung
_02	Obere Frequenzgrenze [Hz] / Entfällt bei Einzelfrequenzanregung
_500	Anregungskraft [N]

Der Ablauf der dynamischen Untersuchungen variiert bei den ersten Messungen. Die Einstellungen des Schwingungserregers werden zunächst schrittweise optimiert, weshalb insbesondere die Anregungskraft bei dem Test D1 niedrig gewählt wird. Das grundlegende Vorgehen kann aber wie folgt beschrieben werden:

Es wird mit einer Noise-Anregung (1-30 Hz) und einer Sweep-Anregung (2-30 Hz) begonnen. Im Anschluss wird in *Diadem* eine FFT der Messsignale durchgeführt. So können die Eigenfrequenzen des Probekörpers schnell identifiziert werden. Danach werden die Eigenfrequenzen gezielt als Einzelfrequenz angeregt. Die Anregung wird einige Zeit aufrechterhalten, sodass der Probekörper sich einschwingt. Schließlich wird die Anregung gestoppt und der Probekörper kann frei ausschwingen (Ausschwingversuch). Nach der Anregung der Einzelfrequenzen wird im Frequenzbereich um die Eigenfrequenz ein engerer Sweep mit einer Anregungskraft von 500 N durchgeführt (Resonanzversuch). In Tabelle 4-3 ist der Versuchsablauf der dynamischen Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Ablauf der dynamischen Untersuchungen

Schritt	Vorgang
1	Anregung der Struktur mit White Noise (1 bis 30 Hz, bis 300 N) Anregung der Struktur mit Sweep (2 bis 30 Hz, bis 300 N)
2	Durchführung einer FFT in Diadem zur Identifizierung von Peaks
3	Gezielte Einzelfrequenzanregung (500 N) → Ausschwingversuch Anregung der Struktur mit Sweep (500 N) im engeren Bereich um die Eigenfrequenz → Resonanzversuch

4.4 Versuchsauswertung

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Eigenfrequenzen, Eigenmoden und Dämpfung erläutert. Die Analyse beginnt mit dem Import der Messdaten in *Flexpro*. Nach dem Import der Messdaten liegen die Datensätze jedes Beschleunigungssensors und ein Datensatz mit der Zeit vor. Die folgende Prozedur wird für die Messdaten jedes Beschleunigungssensors einzeln durchgeführt.

4.4.1 Eigenfrequenzen

Für die Identifikation der Eigenfrequenzen wird eine Noise Messung mit 1 bis 30 Hz untersucht. Der Datensatz mit den gemessenen Beschleunigungen wird zunächst an die Vorzeichenkonvention angepasst. Die Messrichtung von a_x1 und a_y1 wird als positiv definiert. Wie aus Abbildung 4-3 hervorgeht, weicht die positive Messrichtung einiger Sensoren von dieser ab. Die betroffenen Messwerte werden durch Multiplikation mit -1 invertiert. Im nächsten Schritt werden Beschleunigungsdaten der einzelnen Sensoren mit den Zeitdaten zu einem Signal mit x- und y-Werten zusammengefasst, nachfolgend als Beschleunigungs-Zeit-Signal (BZS) bezeichnet.

Anschließend beginnt die Bereinigung der Messdaten. Dabei wird zunächst der Offset des BZS mit einem Hochpassfilter entfernt, dessen Grenzfrequenz bei 0,5 Hz liegt. Danach wird ein Tiefpassfilter auf das BZS angewendet, welcher Frequenzen über 50 Hz herausfiltert, da diese nicht relevant sind. Der nächste Vorgang ist die Erstellung eines Leistungsdichtespektrums (PSD) des Signals. In dem PSD werden die Ausschläge (Peaks) identifiziert und die Frequenzen, bei denen diese auftreten, extrahiert. Diese Frequenzen entsprechen mutmaßlich den Eigenfrequenzen des Probekörpers. Dabei wird der Mittelwert über alle Sensoren gebildet.

4.4.2 Eigenmoden

Die Gesamtbeschleunigung der Decke setzt sich unter der Annahme kleiner Beschleunigungen und einer starren Deckenscheibe aus drei Anteilen zusammen: Rotation, Translation in x-Richtung und Translation in y-Richtung. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang.

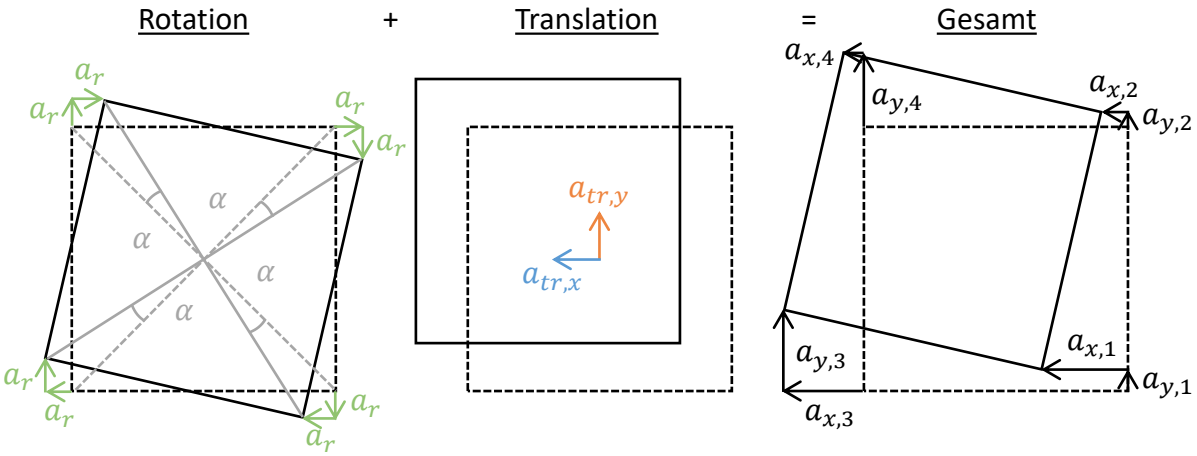


Abbildung 4-4: Zerlegung der Gesamtbeschleunigung in Rotations- und Translationsanteile

Die Gesamtbeschleunigung entspricht den Messergebnissen der Beschleunigungssensoren. Mit den Beschleunigungsmessdaten wird die Rotation a_r und Translation a_{tr} der Deckenscheiben berechnet. Die detaillierte Berechnung ist im Anhang C aufgeführt.

Um nun festzustellen, welcher Eigenmode bei einer Eigenfrequenz vorliegt, wird die Schwingform analysiert. Dafür wird das BZS eines Sweeps mit 500 N im Bereich um die Eigenfrequenz untersucht. Es wird ein Bandpassfilter mit einem Frequenzfenster von ±0,5 Hz um die Eigenfrequenz auf das BZS der berechneten Rotations- und Translationsanteile gelegt. Das gefilterte Signal besitzt jetzt nur noch Beschleunigungen, die im Frequenzbereich der Eigenfrequenz schwingen. Nun wird der Zeitbereich des Sweeps betrachtet. Dort ist eine deutliche Überhöhung zu dem Zeitpunkt, bei dem die Erregerfrequenz der Eigenfrequenz entspricht, zu erkennen. Dieser Bereich wird betrachtet. Die Schwingform ist in diesem Zeitabschnitt deutlich zu erkennen. Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch ein solches Diagramm mit der entsprechenden Schwingform.

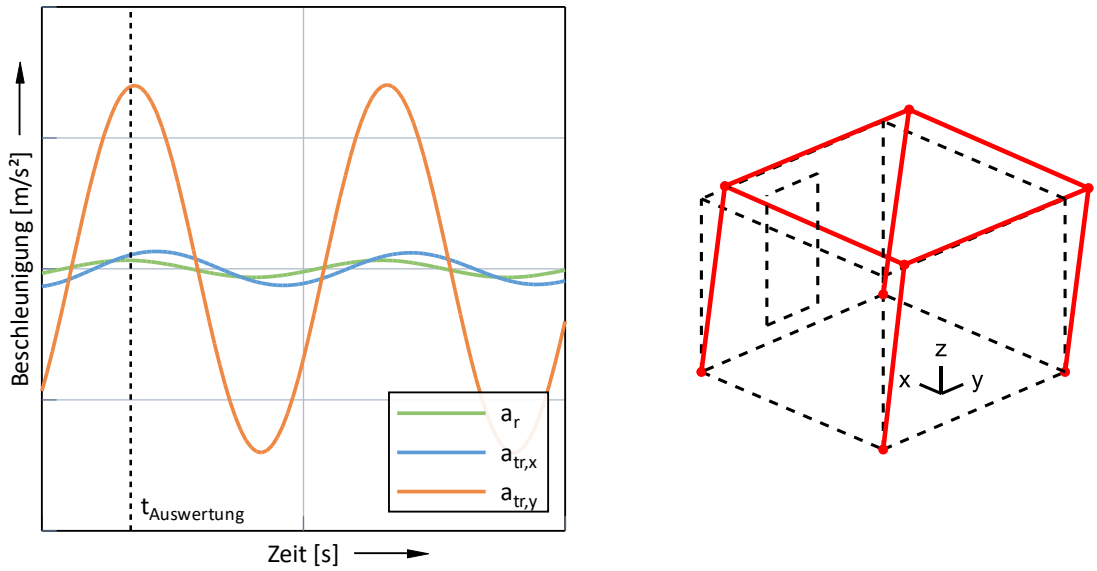


Abbildung 4-5: Schwingformanalyse und Visualisierung des Eigenmode

Die im Diagramm dargestellte gestrichelte Linie ist der Auswertungszeitpunkt. Es werden die Beschleunigungswerte zu diesem Zeitpunkt ausgelesen und auf 1 normiert. Die normierten Werte sind die Eingangswerte für die Visualisierung der Schwingform und stellen den Eigenvektor dar. Der Eigenvektor kann in Form der Rotations- und Translationsanteile oder mit den Beschleunigungswerten der einzelnen Sensoren ausgedrückt werden. Die Eigenvektoren mit den Verformungsanteilen sind wie folgt definiert:

Eingeschossiger Aufbau

$$\vec{\varphi} = \begin{pmatrix} a_{tr,x,EG} \\ a_{tr,y,EG} \\ a_{r,EG} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Zweigeschossiger Aufbau

$$\vec{\varphi} = \begin{pmatrix} a_{tr,x,EG} \\ a_{tr,y,EG} \\ a_{r,EG} \\ a_{tr,x,OG} \\ a_{tr,y,OG} \\ a_{r,OG} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Abschließend erfolgt die Validierung mit der FDD-Methode. Dafür werden auf Grundlage einer Noise Messung die Eigenvektoren mittels FDD bestimmt. Diese werden mit den konventionell bestimmten Eigenvektoren verglichen. Der Vergleich erfolgt über das Modal Assurance Criterion (MAC). Dabei handelt es sich um einen statistischen Indikator, welcher die Ähnlichkeit von zwei Eigenvektoren quantifiziert. Das MAC kann Werte zwischen 0 (keine Ähnlichkeit), und 1 (volle Ähnlichkeit) annehmen. Ab einem Wert von 0,9 spricht man von einer hohen Ähnlichkeit. Dieser Wert wird deshalb als Grenzwert für den Vergleich gewählt [18]. Das MAC wird folgendermaßen berechnet:

$$MAC = \frac{|\vec{\varphi}_{FDD}^{T} \vec{\varphi}_{kon}|^2}{(\vec{\varphi}_{FDD}^{T} \vec{\varphi}_{FDD}) \cdot (\vec{\varphi}_{kon}^{T} \vec{\varphi}_{kon})} \quad (4.3)$$

Im Folgenden ist das Vorgehen zur Bestimmung der Eigenfrequenz und Eigenmoden als Prozessschema dargestellt.

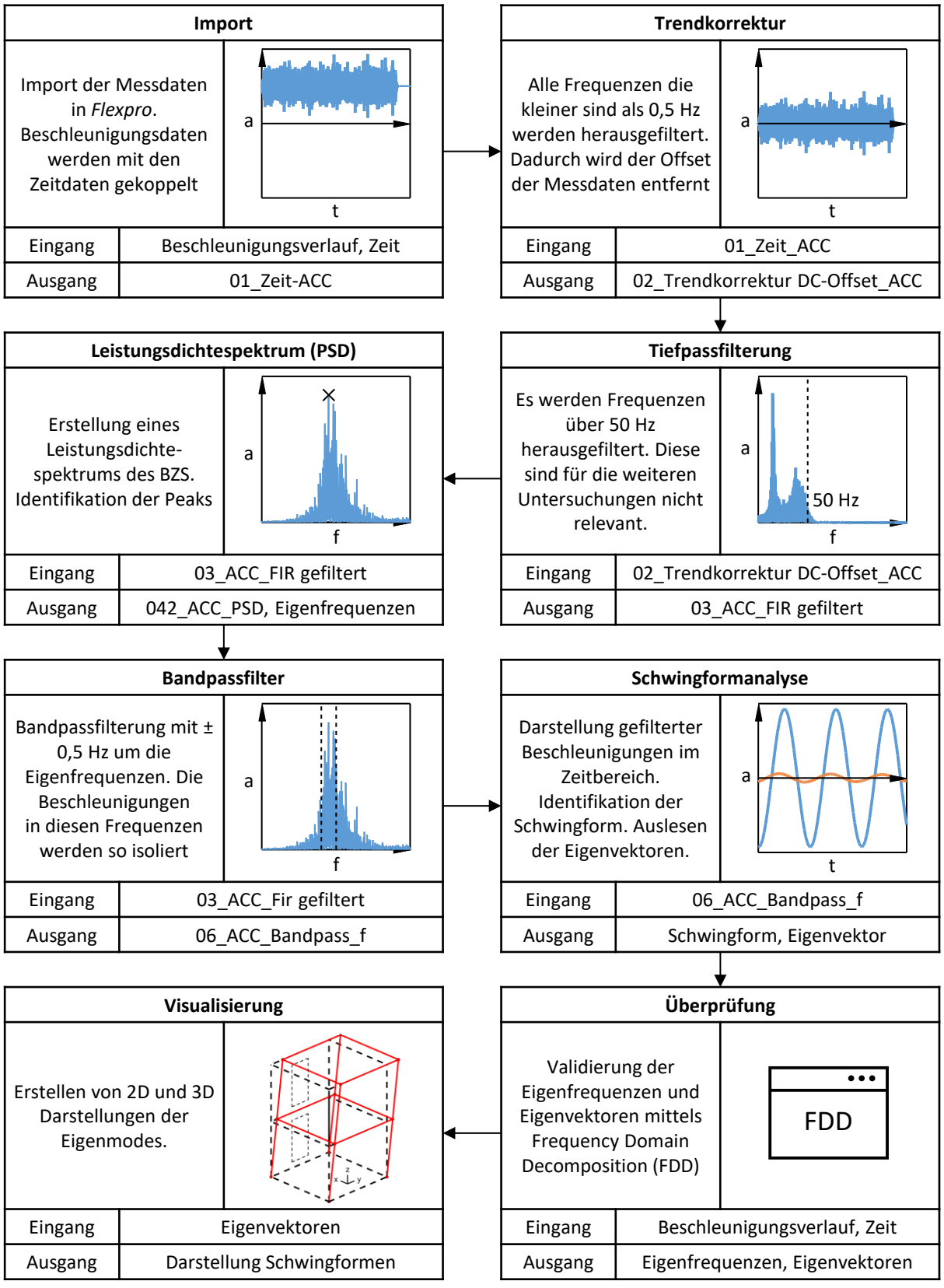


Abbildung 4-6: Fließschema zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und Schwingformen

4.4.3 Dämpfung

Die Dämpfung wird auf Grundlage von zwei Ansätzen ermittelt, zum einen basierend auf einer Ausschwingkurve, zum anderen auf Basis einer Resonanzkurve.

Dämpfungsermittlung mittels Ausschwingversuch

Grundlage für diese Auswertung ist die Messung einer 500 N Einzelanregung mit der Eigenfrequenz. Auch hier beginnt die Analyse in *Flexpro* mit dem Zusammenfügen der Datensätze zu einem BZS und einer anschließenden Entfernung des Offsets mit einem Hochpassfilter. Auf das gefilterte BZS wird ein Bandpassfilter mit einem Frequenzfenster von ±0,25 Hz um die Eigenfrequenz angewendet.

Anschließend wird die Ausschwingkurve dargestellt und der Ausschwingbereich betrachtet. In dem Ausschwingbereich werden die aufeinander folgenden lokalen Maxima und Minima erfasst. Es wird dabei nur der Zeitraum nach dem Wendepunkt der Ausschwingkurve berücksichtigt, da der anfängliche Abklingvorgang nicht dem exponentiellen Verlauf folgt und dadurch die Berechnung des Dämpfungsmaßes verfälschen würde. Abbildung 4-8 zeigt exemplarisch eine Ausschwingkurve.

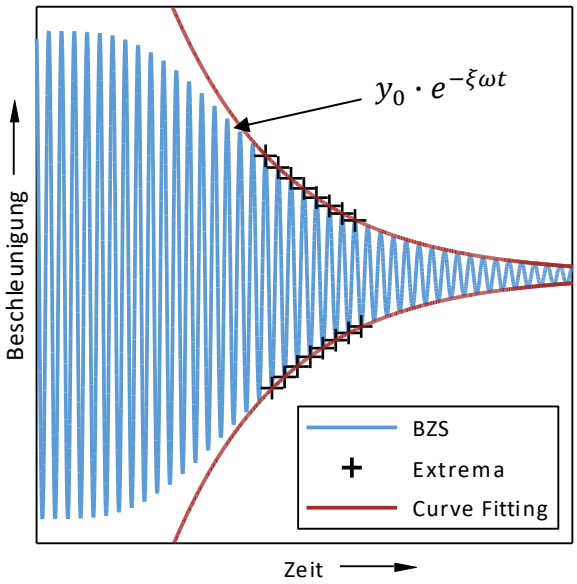


Abbildung 4-7: Ausschwingkurve mit lokalen Extrema und den approximierten Einhüllenden

Mit den ermittelten Extrema wird nun mit zwei Methoden die Dämpfung ermittelt: über das logarithmische Dekrement und mittels Curve Fitting.

Logarithmisches Dekrement

Das logarithmische Dekrement ist der natürliche Logarithmus des Quotienten aus zwei aufeinanderfolgenden Maxima oder Minima im Ausschwingbereich. Das Lehrsche Dämpfungsmaß kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden: [19]

$$\xi = \frac{1}{\mathrm{m}} \cdot \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+m}}\right) \cdot \frac{1}{2\pi} \tag{4.4}$$

Mit: m Anzahl der Schwingungszyklen, die zwischen den beiden betrachteten Extrema liegen

A_n Erstes für die Berechnung betrachtetes Extremum

A_{n+m} Extremum m Schwingungszyklen nach A_n

Die Anzahl der Extrema ist je nach untersuchter Frequenz unterschiedlich. Es wird das logarithmische Dekrement jeder möglichen Kombination aus zwei Werten berechnet und anschließend der Mittelwert aller Kombinationen bestimmt. Dieser Vorgang, wird einzeln für jeden Beschleunigungssensor durchgeführt. Schließlich wird der Mittelwert der Dämpfung über alle Sensoren berechnet. Das Ergebnis ist ξ_{LD}.

Curve Fitting

Das Curve Fitting basiert auf demselben Prinzip wie das logarithmische Dekrement. Die obere beziehungsweise untere Einhüllende einer allgemeinen Ausschwingkurve besitzt folgenden Funktionsausdruck:

$$y_h(t) = y_0 \cdot \mathrm{e}^{-\xi\omega\mathrm{t}} \tag{4.5}$$

Mit: ξ Lehrsches Dämpfungsmaß

ω Eigenkreisfrequenz

y_0 Phasenwinkel

Die ermittelten Extrema im Ausschwingbereich dienen als Stützstellen zur Approximierung der oberen beziehungsweise unteren Einhüllenden. Aus dem Funktionsausdruck der approximierten Kurven kann schließlich die Dämpfung bestimmt werden. Die Einhüllenden sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

Auch dieser Vorgang wird für alle Sensoren durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet. Das Ergebnis ist ξ_{CF}. Der Mittelwert von ξ_{LD} und ξ_{CF} wird als ξ_{AK} bezeichnet.

Werden für die Approximation der Hüllkurve und die Berechnung des logarithmischen Dekrements dieselben Werte verwendet, so würde in einem idealen System die berechnete Dämpfung übereinstimmen. Die approximierte Funktion würde dann exakt $y_h(t)$ entsprechen.

Dämpfungsermittlung mittels Resonanzversuch

Zur Ermittlung der Dämpfung mittels Resonanzversuch wird die Halbwertsbreitenmethode (HWBM) nach VDI 3830 Blatt 5 [20] angewendet. Die für die HWBM benötigte Resonanzkurve wird mit einem 500 N Sweep um die Eigenfrequenz erzeugt. Zunächst wird der Offset der Messdaten entfernt. Anschließend wird das BZS einmal integriert, um ein Geschwindigkeits-Zeit-Signal (GZS) zu erhalten. Von dem GZS wird im Anschluss die FFT berechnet. Da die FFT ein starkes Rauschen enthält, wird die Kurve durch einen laufenden Mittelwert geglättet. Dabei wird immer der Mittelwert von 80 Datenpunkten berechnet. Die geglättete Kurve entspricht der Resonanzkurve. Eine auf diese Weise bestimmte Resonanzkurve ist in Abbildung 4-8 dargestellt.

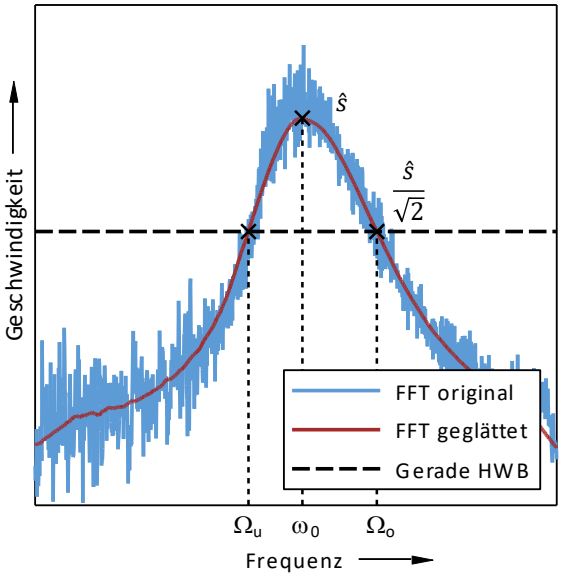


Abbildung 4-8: Anwendung der HWBM nach VDI 3830 Blatt 5 [20] auf eine Resonanzkurve

An der Resonanzkurve wird mit folgender Formel die Dämpfung berechnet:

$$\xi = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{\Omega_o}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega_o} \right) - \left(\frac{\Omega_u}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega_u} \right) \right] \tag{4.6}$$

Das Vorgehen wird für jeden Sensor einzeln durchgeführt und die Dämpfung anschließend über alle Sensoren gemittelt. Diese Dämpfung wird nachfolgend ξ_{RK} genannt.

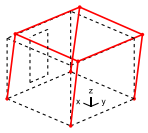
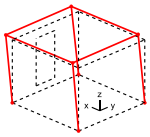
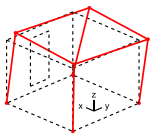
4.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen vorgestellt.

Einstöckiger Aufbau – D1

Die folgende Tabelle enthält die dynamischen Eigenschaften des einstöckigen Aufbaus.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen D1 (nur Erdgeschoss)

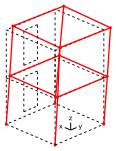
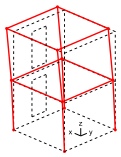
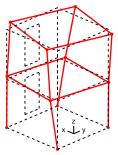
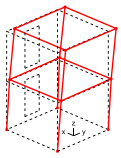
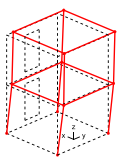
$\boldsymbol{Mode}$	$\boldsymbol{f}\ [\boldsymbol{Hz}]$	$\boldsymbol{T}\ [\boldsymbol{s}]$	$\boldsymbol{\xi_{AK}}\ [\%]$	$\boldsymbol{\xi_{RK}}\ [\%]$	$\vec{\boldsymbol{\varphi}}[-]$	*Visual.*
1	10,6	0,094	1,79	4,88	$\begin{pmatrix}0{,}08\\1\\0{,}05\end{pmatrix}$	
2	21,0	0,048	1,11	2,50	$\begin{pmatrix}1\\0{,}29\\-0{,}04\end{pmatrix}$	
3	26,5	0,038	-	2,81[1)]	$\begin{pmatrix}0{,}03\\1\\0{,}41\end{pmatrix}$	

1) ξ_{RK} basiert auf einer Anregung mit 50 N

Zweistöckiger Aufbau – D2

Die folgende Tabelle enthält die dynamischen Eigenschaften des zweistöckigen Aufbaus vor dem Pushover-Versuch im unbeschädigten Zustand.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen D2 (Beide Geschosse, intakt)

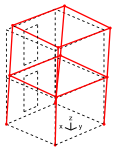
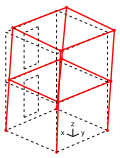
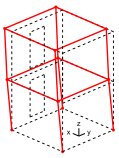
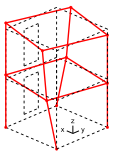
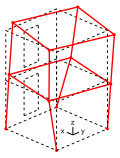
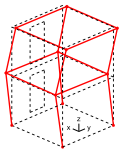
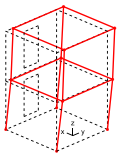
$Mode$	$f\ [Hz]$	$T\ [s]$	$\xi_{AK}\ [\%]$	$\xi_{RK}\ [\%]$	$\vec{\varphi}[-]$	*Visual.*
1	6,53	0,153	4,33	8,72	$\begin{pmatrix}0{,}03\\0{,}54\\0{,}06\\0{,}03\\1\\0{,}15\end{pmatrix}$	
2[1)]	14,2	0,071	2,66	5,49	$\begin{pmatrix}0{,}38\\0{,}05\\-0{,}01\\1\\0{,}01\\0\end{pmatrix}$	
3	20,8	0,048	1,06	2,54	$\begin{pmatrix}0\\0{,}05\\0{,}53\\-0{,}06\\0{,}46\\1\end{pmatrix}$	
5[2)]	25,8	0,039	-	-	$\begin{pmatrix}0{,}13\\0{,}54\\-0{,}06\\-0{,}10\\1\\-0{,}02\end{pmatrix}$	
6	27,1	0,037	-	-	$\begin{pmatrix}-0{,}18\\0{,}56\\-0{,}07\\0{,}07\\1\\-0{,}03\end{pmatrix}$	

1) Es kann ein weiterer Peak bei 10,4 Hz festgestellt werden, nach ausführlicher Untersuchung kann dieser Peak jedoch als zweite Eigenfrequenz ausgeschlossen werden.
2) Der vierte Eigenmode (ein entgegengesetztes Auslenken in x-Richtung) kann bei dieser Untersuchung im untersuchten Frequenzbereich nicht festgestellt werden.

Beschädigter Zweistöckiger Aufbau – D3

Die folgende Tabelle enthält die dynamischen Eigenschaften des geschädigten Probekörpers.

Tabelle 4-6: Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen D3 (Beide Geschosse, geschädigt)

$Mode$	$f\ [Hz]$	$T\ [s]$	$\xi_{AK}\ [\%]$	$\xi_{RK}\ [\%]$	$\vec{\varphi}[-]$	
1.1	5,27	0,190	-	-	$\begin{pmatrix}0{,}03\\0{,}50\\0{,}15\\0{,}09\\1\\0{,}23\end{pmatrix}$	
1.2	6,19	0,161	4,56	9,00	$\begin{pmatrix}0{,}03\\0{,}51\\0{,}12\\0{,}02\\1{,}00\\0{,}21\end{pmatrix}$	
2	8,59	0,116	3,19	12,3	$\begin{pmatrix}0{,}67\\0\\0{,}01\\1\\-0{,}01\\0{,}03\end{pmatrix}$	
3.1	17,2	0,058	0,716	3,58	$\begin{pmatrix}0\\-0{,}01\\0{,}69\\0{,}01\\0{,}01\\1\end{pmatrix}$	
3.2	19,4	0,052	-	2,78	$\begin{pmatrix}-0{,}04\\0{,}43\\0{,}77\\-0{,}18\\0{,}80\\1\end{pmatrix}$	
4	24,5	0,041	1,21	1,82	$\begin{pmatrix}1\\0{,}17\\0{,}08\\-0{,}44\\0{,}12\\0{,}02\end{pmatrix}$	
5	25,8	0,039	-		$\begin{pmatrix}-0{,}12\\0{,}61\\-0{,}05\\-0{,}03\\1\\-0{,}03\end{pmatrix}$	

5 Literatur

[1] DIN EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe Juli 2002.

[2] DOP-734-03: Leistungserklärung. Egger Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG, Ausgabe Mai 2023.

[3] ETA-03/0050: fermacell® Gipsfaser-Platten. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Ausgabe Mai 2022.

[4] ETA-16/0535: ETA-16/0535. Haubold-Klammern d = 1,53 - 1,80 - 2,00 mm als Verbindungsmittel im Holzbau für lange oder ständige Belastung auf Herausziehen. Zulassung, Ausgabe Januar 2024.

[5] *Simpson Strong-Tie GmbH:* Technisches Datenblatt ZYKT-Schraegverschraubung, 2024.

[6] *Simpson Strong-Tie GmbH:* Technisches Datenblatt CCS-Multifunktionsverbinder, 2024.

[7] *Simpson Strong-Tie GmbH:* Technisches Datenblatt BTALU Balkentraeger-ALU, 2024.

[8] *Simpson Strong-Tie GmbH:* Technisches Datenblatt STD Stabdübel - galvanisch verzinkt, 2024.

[9] DIN EN 1998-1:2010-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. Norm, Ausgabe Dezember 2010.

[10] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Norm, Ausgabe August 2013.

[11] *Rauber, L.; Balaskas, G.; Wilden, V. et al.:* Light Timber Frame Shear Walls in Multi-Storey Buildings - Experimental Full-Scale Tests. WCEE, 2024.

[12] ISO 21581: Timber structures - Static and cyclic lateral load test methods for shear walls. International Organization for Standardization, Ausgabe Juni 2010.

[13] DIN EN 12512: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln: Deutsche Fassung EN 12512:2001 + A1:2005. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.,

[14] *Yasumura, M.; Kawai, N.:* Estimating seismic performance of wood–framed structures. *In:* World Conference on Timber Engineering (1998).

[15] *Kobayashi, K.; Yasumura, M.:* Evaluation of plywood sheated shear walls with screwed joints tested according to ISO 21581. *In:* International council for research and innovation in building and construction - working commission w18 - timber structures (2011).

[16] *Seim, W.; Vogt, T.:* OptimberQuake - Deliverable 2B – Timber framed wall elements – monotonic and cyclic testing. Universität Kassel, Kassel Ausgabe Dezember 2013.

[17] FEMA 356: Prestandard and Commentary for the seismic Rehabilitation of Buildings. Ausgabe 2000.

[18] *Pastor, M.; Binda, M.; Harčarik, T.:* Modal Assurance Criterion. *In:* Procedia Engineering 48 (2012), S. 543-548. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551.

[19] *Petersen, C.; Werkle, H.:* Dynamik der Baukonstruktionen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.

[20] VDI 3830 Blatt 5: Werkstoff und Bauteildämpfung. VDI-Richtlinie, Ausgabe November 2005.

A Probekörper

Holzfeuchte

Vorderansicht (W4 & W1)

Rückansicht (W2 und W3)

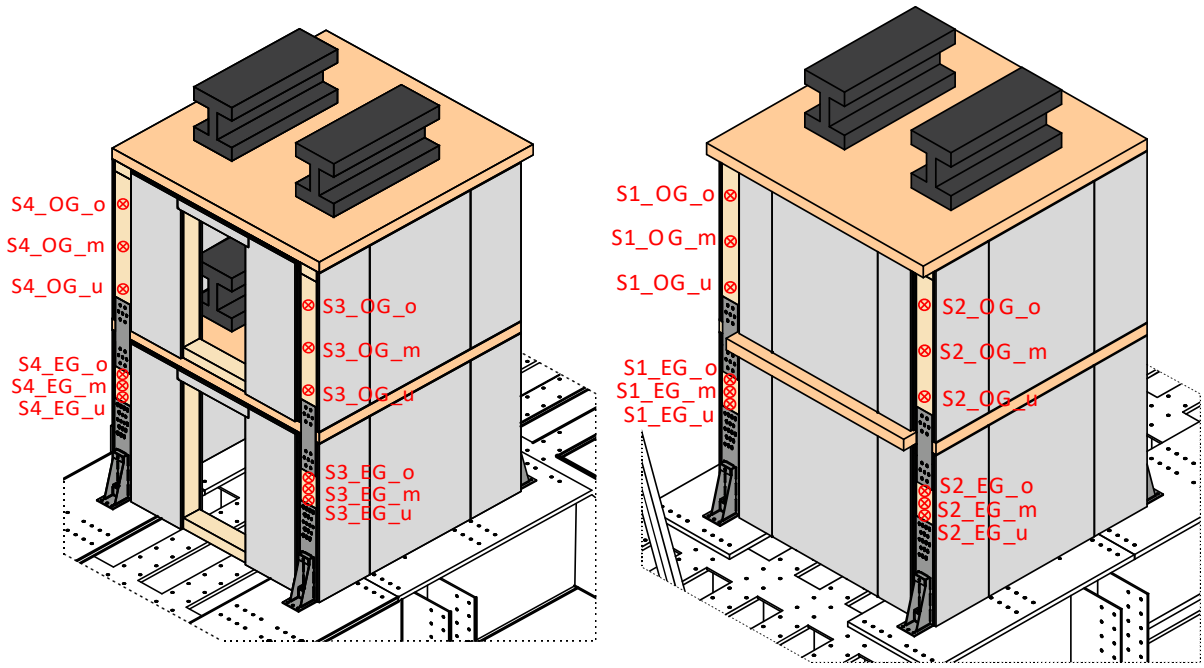


Abbildung A-1: Übersicht der Messpunkte für die Holzfeuchtemessungen

Tabelle A-1: Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen – D1

Prüfkörperteil	Holzfeuchte [%]	Temperatur [°C]
S1_EG_o	15,6	27,7
S1_EG_m	15,8	27,2
S1_EG_u	15,0	26,5
S2_EG_o	15,1	26,4
S2_EG_m	15,0	27,1
S2_EG_u	14,1	26,8
S3_EG_o	12,8	27,1
S3_EG_m	15,4	27,2
S3_EG_u	15,5	27,2
S4_EG_o	13,9	27,1
S4_EG_m	14,8	27,6
S4_EG_u	15,2	27,2
Mittelwert:	14,9	27,1

Tabelle A-2: Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen – D2

Prüfkörperteil	Holzfeuchte [%]	Temperatur [°C]
S1_EG_o	13,7	26,0
S1_EG_m	15,2	26,0
S1_EG_u	14,6	26,1
S2_EG_o	14,9	25,5
S2_EG_m	14,5	25,4
S2_EG_u	14,4	25,6
S3_EG_o	14,3	26,4
S3_EG_m	14,4	25,4
S3_EG_u	14,2	26,3
S4_EG_o	14,2	26,9
S4_EG_m	13,8	26,8
S4_EG_u	14,5	26,7
S1_OG_o	13,4	26,3
S1_OG_m	14,1	26,4
S1_OG_u	14,0	25,8
S2_OG_o	14,1	26,4
S2_OG_m	14,9	26,2
S2_OG_u	14,9	27,1
S3_OG_o	13,4	27,5
S3_OG_m	14,4	26,8
S3_OG_u	14,1	27,4
S4_OG_o	13,0	27,2
S4_OG_m	14,5	27,5
S4_OG_u	14,2	28,0
Mittelwert:	14,2	26,5

Tabelle A-3: Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen – Pushover-Versuch

Prüfkörperteil	Holzfeuchte [%]	Temperatur [°C]
S1_EG_o	14,4	27,8
S1_EG_m	14,6	29,3
S1_EG_u	14,3	28,2
-S2_EG_o	14,1	28,2
S2_EG_m	13,9	28,1
S2_EG_u	14,2	28,0
S3_EG_o	14,3	28,4
S3_EG_m	14,5	28,1
S3_EG_u	14,7	28,3
S4_EG_o	13,4	28,2
S4_EG_m	14,0	28,2
S4_EG_u	14,1	29,0
S1_OG_o	13,6	28,8
S1_OG_m	13,8	29,7
S1_OG_u	13,7	29,0
S2_OG_o	14,3	29,5
S2_OG_m	14,9	29,8
S2_OG_u	14,7	29,5
S3_OG_o	13,7	29,3
S3_OG_m	13,6	29,8
S3_OG_u	13,3	29,0
S4_OG_o	13,8	29,2
S4_OG_m	14,2	28,8
S4_OG_u	13,8	30,0
Mittelwert:	14,1	28,8

Tabelle A-4: Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen – D3

Prüfkörperteil	Holzfeuchte [%]	Temperatur [°C]
S1_EG_o	14,0	26,9
S1_EG_m	13,6	26,9
S1_EG_u	14,2	27,3
S2_EG_o	14,0	26,8
S2_EG_m	13,9	27,1
S2_EG_u	14,0	26,2
S3_EG_o	13,6	27,2
S3_EG_m	13,9	27,6
S3_EG_u	14,0	27,1
S4_EG_o	13,6	27,5
S4_EG_m	13,7	26,9
S4_EG_u	14,1	27,3
S1_OG_o	13,5	27,0
S1_OG_m	13,6	27,7
S1_OG_u	13,2	27,4
S2_OG_o	14,3	28,1
S2_OG_m	14,4	28,0
S2_OG_u	14,6	27,9
S3_OG_o	13,5	27,5
S3_OG_m	13,6	28,2
S3_OG_u	13,3	27,1
S4_OG_o	13,1	28,0
S4_OG_m	13,8	27,1
S4_OG_u	13,7	27,1
Mittelwert:	13,8	27,3

B Pushover-Versuch

Steifigkeit

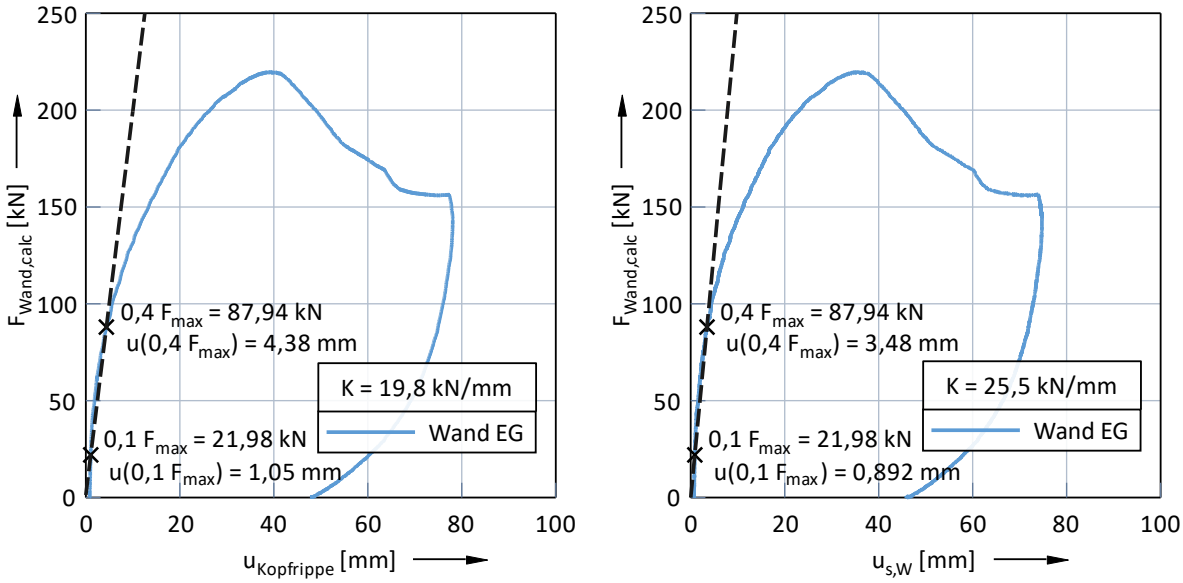


Abbildung B-1: Mittlere Wandsteifigkeit im EG nach ISO 21581 [12] ermittelt mit Gesamtverformung (links) und Wandschubverformung (rechts)

Fließgrenze und Duktilität

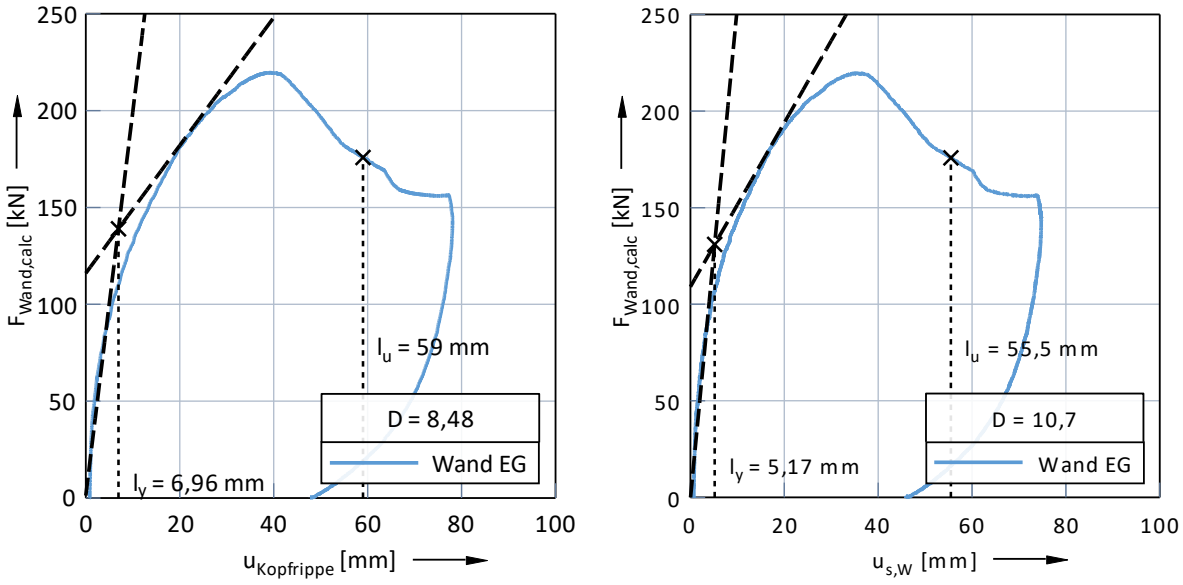


Abbildung B-2: Mittlere Fließgrenze und Duktilität der Wände im EG ermittelt nach DIN EN 12512 [13] mit Gesamtverformung (links) und Wandschubverformung (rechts)

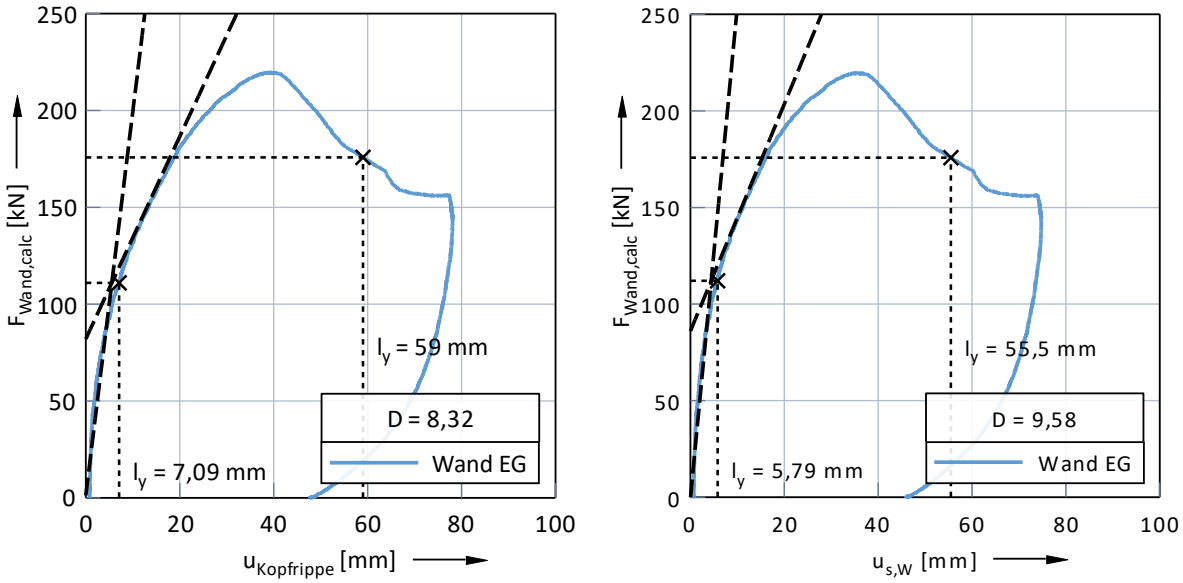


Abbildung B-3: Mittlere Fließgrenze und Duktilität der Wände im EG ermittelt nach Yasumura [14] mit Gesamtverformung (links) und Wandschubverformung (rechts)

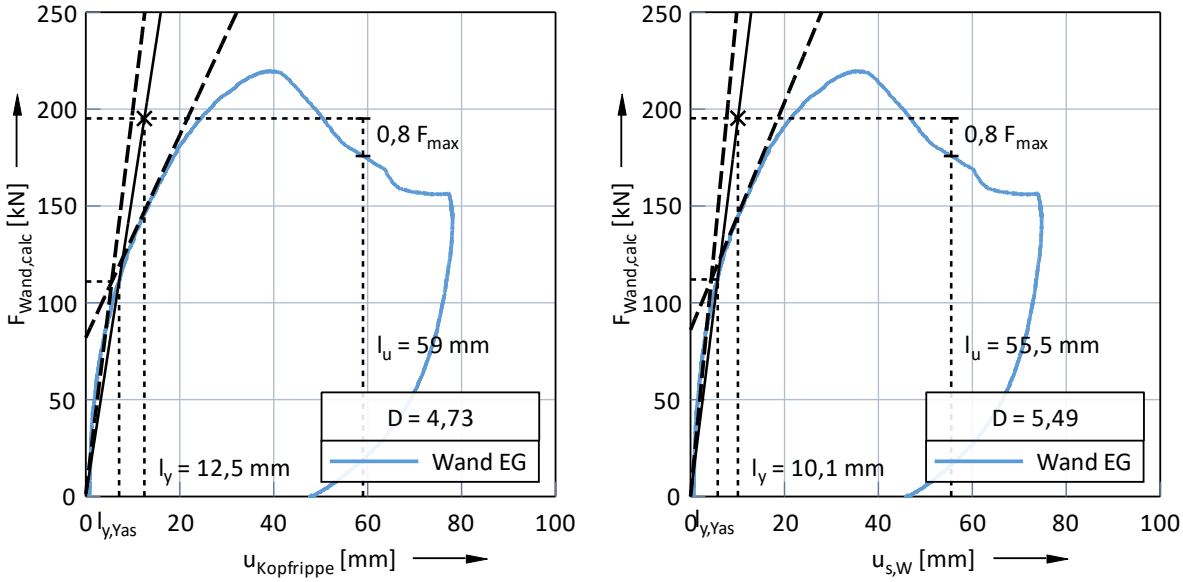


Abbildung B-4: Mittlere Fließgrenze und Duktilität der Wände im EG ermittelt nach Kobayashi [15] mit Gesamtverformung (links) und Wandschubverformung (rechts)

Zeitverläufe

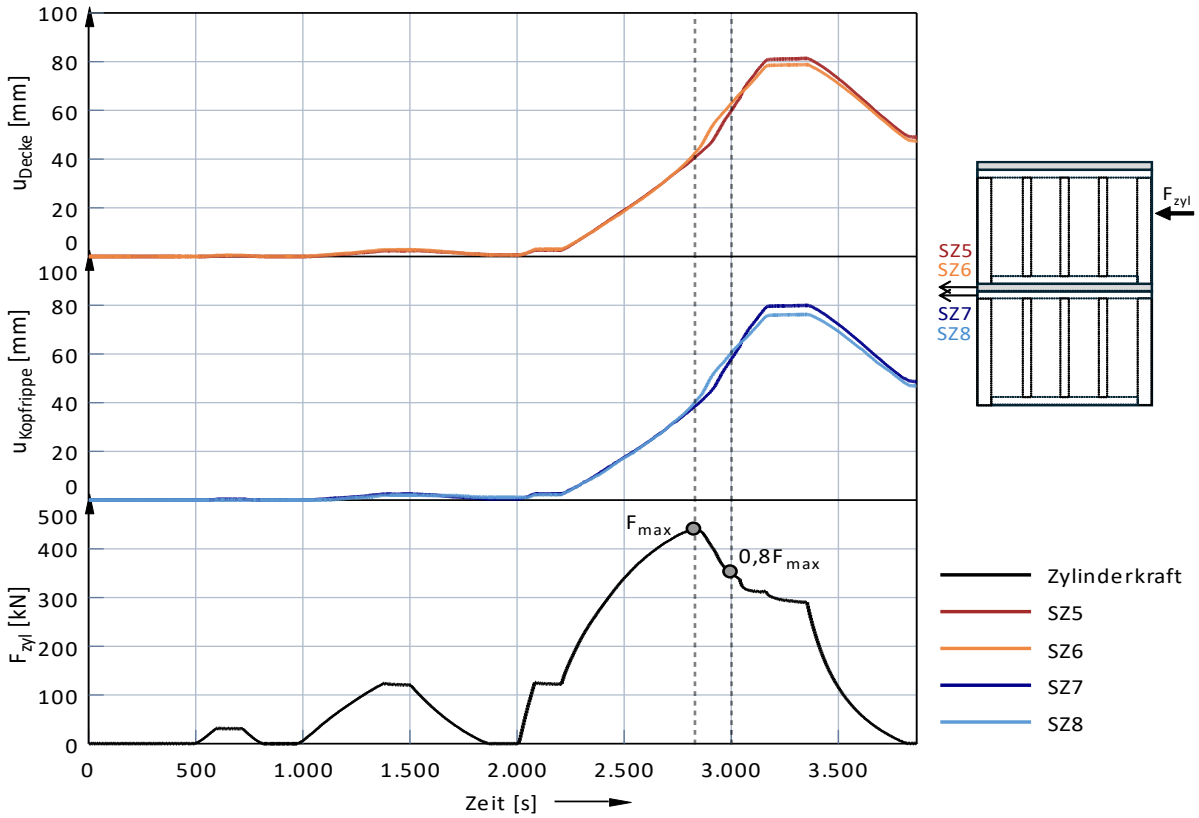


Abbildung B-5: Zeitverläufe der Zylinderkraft und der Seilzüge im Obergeschoss

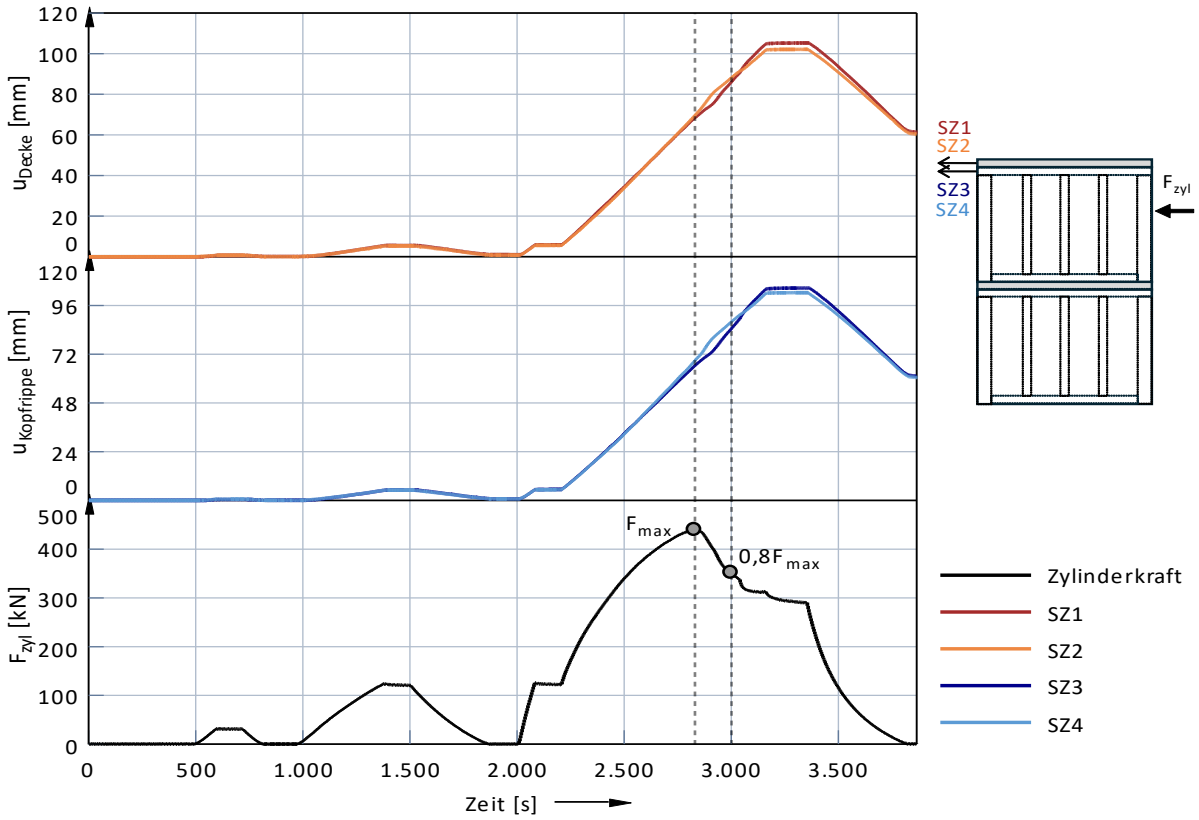


Abbildung B-6: Zeitverläufe der Zylinderkraft und der Seilzüge im Obergeschoss

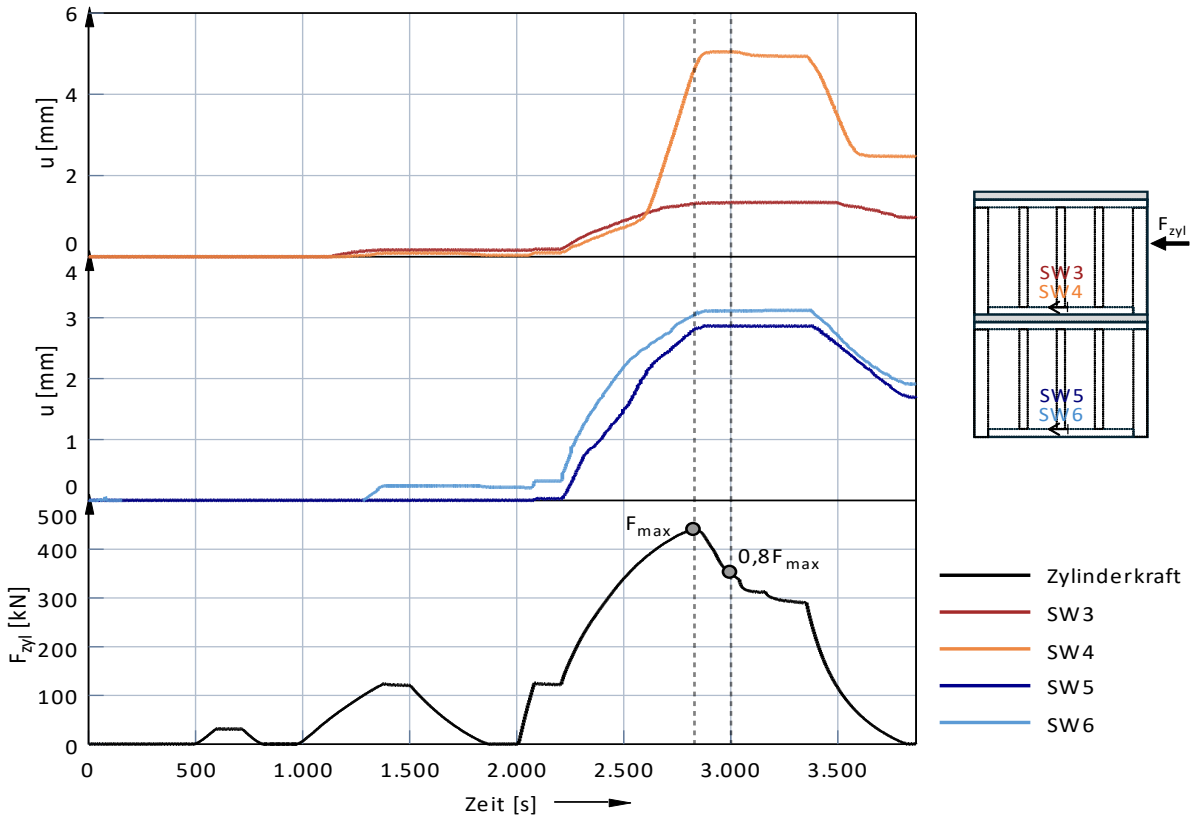


Abbildung B-7: Zeitverläufe der Zylinderkraft und der horizontal ausgerichteten Stabwegaufnehmer

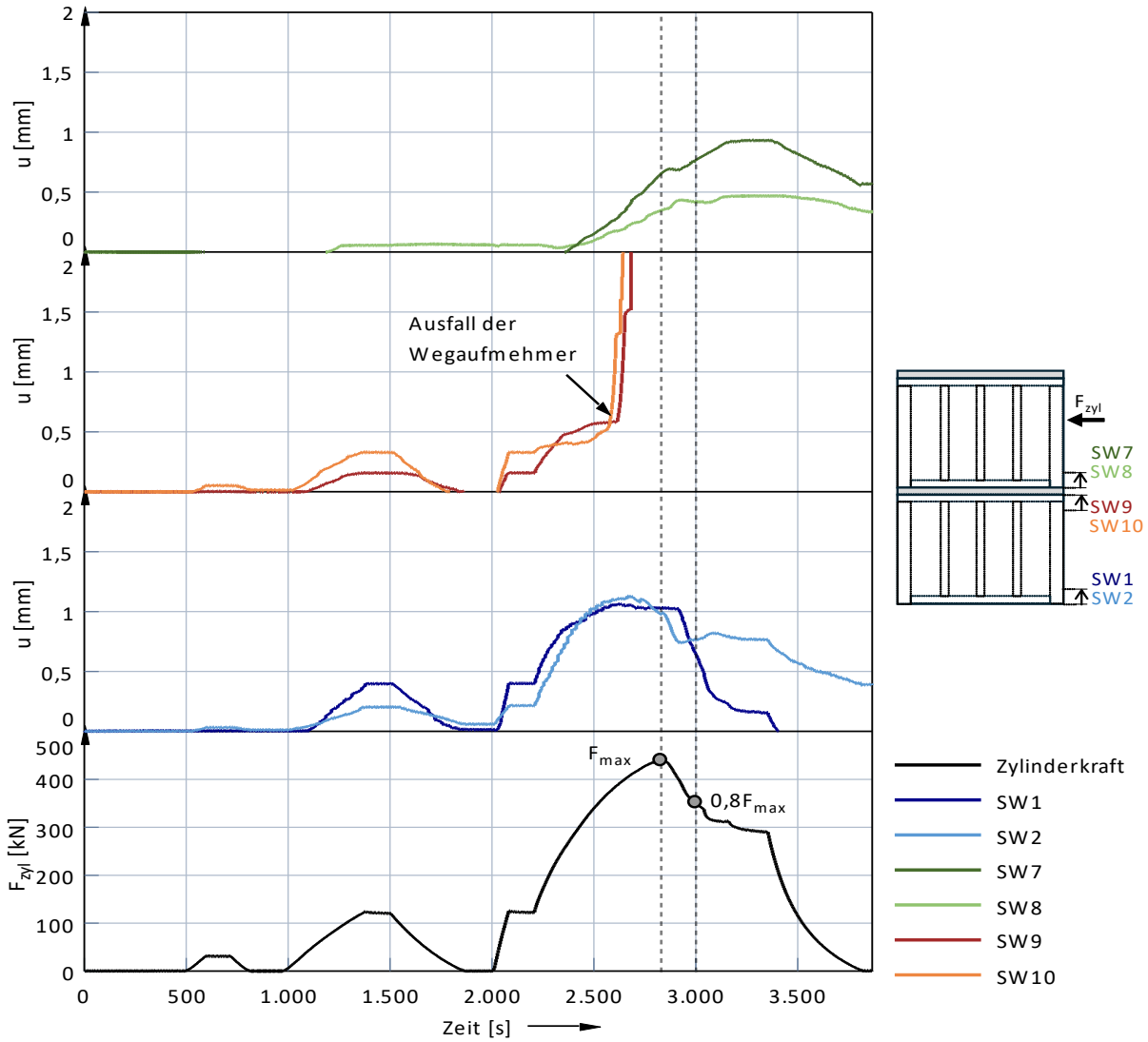


Abbildung B-8: Zeitverläufe der Zylinderkraft und der vertikal ausgerichteten Stabwegaufnehmer

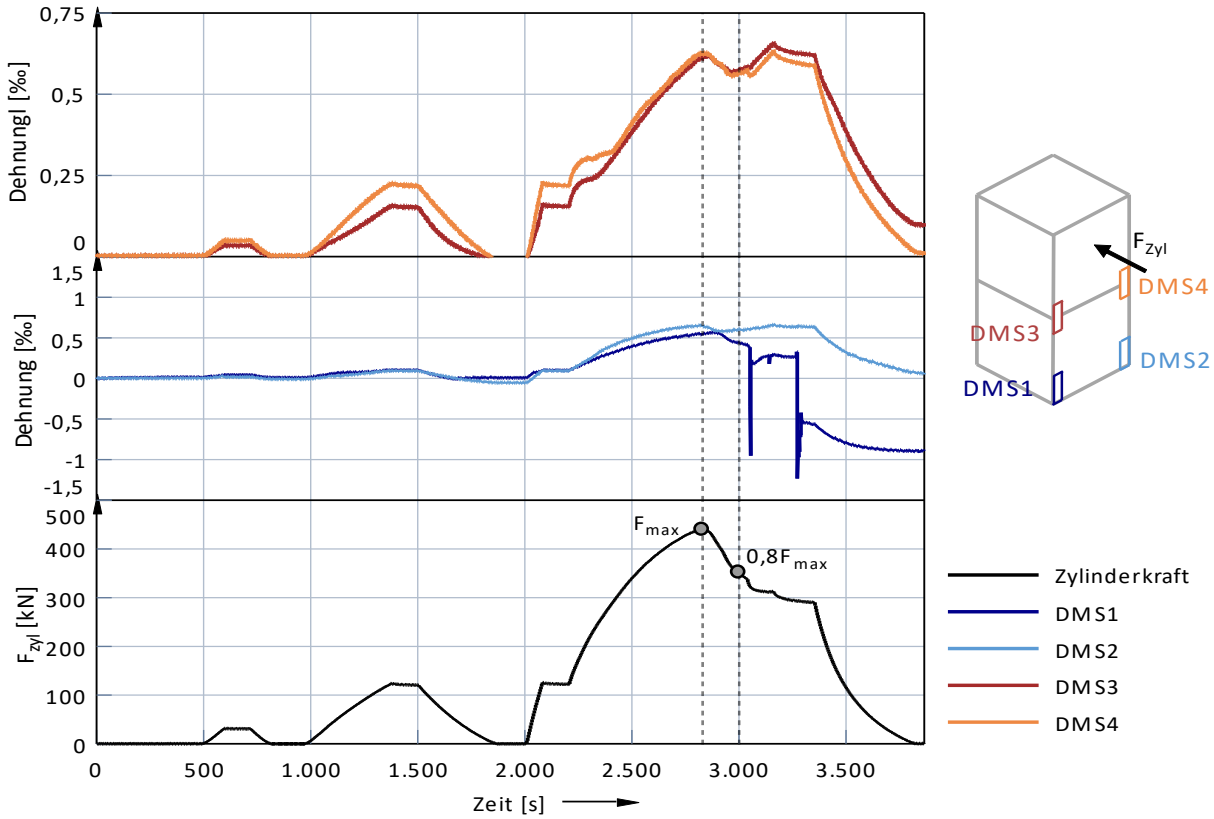


Abbildung B-9: Zeitverläufe der Zylinderkraft und der Dehnungsmessstreifen an Zuganker und Zuglasche

C Dynamische Untersuchungen

Berechnung der Bewegungsanteile

Im Folgenden wird die Berechnung der Bewegungsanteile für den eingeschossigen Aufbau gezeigt.

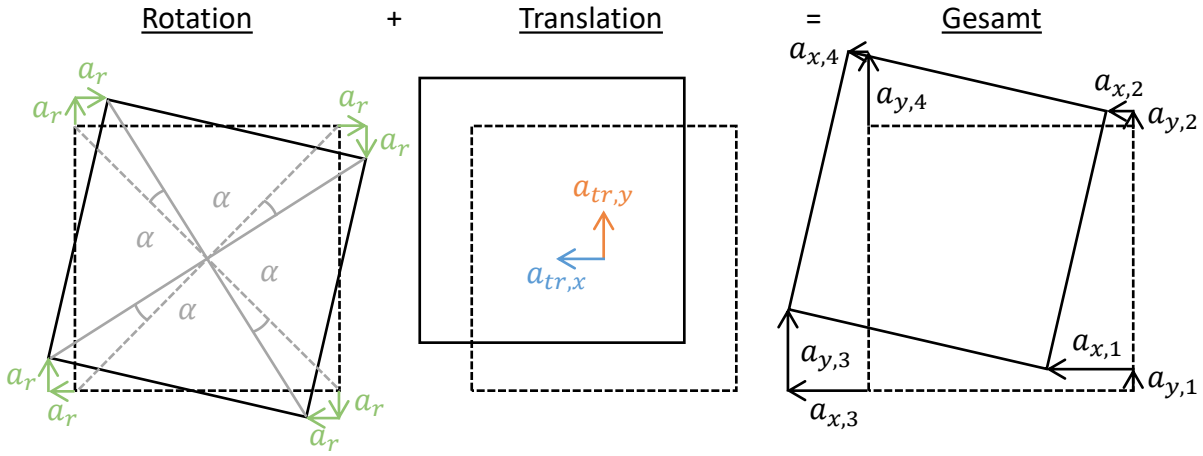


Abbildung C-1: Zerlegung der Gesamtbeschleunigung und Rotations- und Translationsanteil (EG, eingeschossiger Aufbau)

$$a_{x,1} = a_{tr,x} + a_r \quad \text{(C.1)} \qquad a_{y,1} = a_{tr,y} - a_r \quad \text{(C.2)}$$

$$a_{x,2} = a_{tr,x} - a_r \quad \text{(C.3)} \qquad a_{y,2} = a_{tr,y} - a_r \quad \text{(C.4)}$$

$$a_{x,3} = a_{tr,x} + a_r \quad \text{(C.5)} \qquad a_{y,3} = a_{tr,y} + a_r \quad \text{(C.6)}$$

$$a_{x,4} = a_{tr,x} - a_r \quad \text{(C.7)} \qquad a_{y,4} = a_{tr,y} + a_r \quad \text{(C.8)}$$

Ineinander Einsetzen der Gleichungen für die Translation in x-Richtung liefert:

$$a_{tr,x} = \frac{a_{x,1} + a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.9)} \qquad a_{tr,x} = \frac{a_{x,1} + a_{x,4}}{2} \quad \text{(C.10)}$$

$$a_{tr,x} = \frac{a_{x,3} + a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.11)} \qquad a_{tr,x} = \frac{a_{x,3} + a_{x,4}}{2} \quad \text{(C.12)}$$

Ineinander Einsetzen der Gleichungen für die Translation in y-Richtung liefert:

$$a_{tr,y} = \frac{a_{y,1} + a_{y,3}}{2} \quad \text{(C.13)} \qquad a_{tr,y} = \frac{a_{y,1} + a_{y,4}}{2} \quad \text{(C.14)}$$

$$a_{tr,y} = \frac{a_{y,2} + a_{y,3}}{2} \quad \text{(C.15)} \qquad a_{tr,y} = \frac{a_{y,2} + a_{y,4}}{2} \quad \text{(C.16)}$$

Ineinander Einsetzen der Gleichungen für die Rotation liefert:

$$a_r = \frac{a_{x,1} - a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.17)} \qquad a_r = \frac{a_{x,1} - a_{x,4}}{2} \quad \text{(C.18)}$$

$$a_r = \frac{a_{x,3} - a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.19)} \qquad a_r = \frac{a_{x,3} - a_{x,4}}{2} \quad \text{(C.20)}$$

$$a_r = \frac{a_{y,3} - a_{y,1}}{2} \quad \text{(C.21)} \qquad a_r = \frac{a_{y,3} - a_{y,2}}{2} \quad \text{(C.22)}$$

$$a_r = \frac{a_{y,4} - a_{y,2}}{2} \quad \text{(C.23)} \qquad a_r = \frac{a_{y,4} - a_{y,2}}{2} \quad \text{(C.24)}$$

In *Flexpro* wird jeweils der Mittelwert der Werte gebildet. Wenn ein Sensor am Shaker befestigt ist, wird der betroffene Term nicht berücksichtigt.

Nachfolgend die entsprechende Berechnung für zwei Geschosse (exemplarisch am EG):

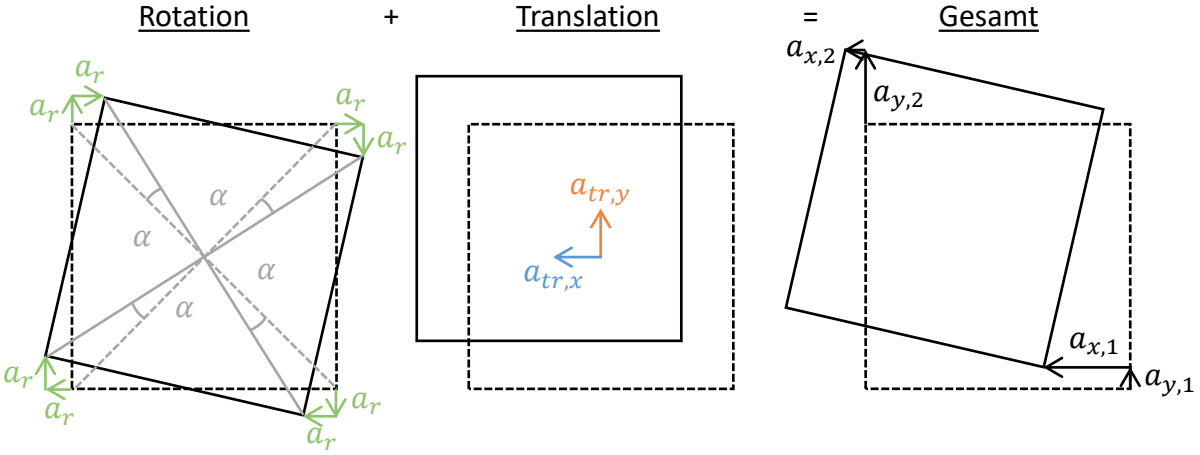


Abbildung C-2: Zerlegung der Gesamtbeschleunigung in Rotations- und Translationsanteil (EG, zweigeschossiger Aufbau)

$$a_{x,1} = a_{tr,x} + a_r \quad \text{(C.25)} \qquad a_{y,1} = a_{tr,y} - a_r \quad \text{(C.26)}$$

$$a_{x,2} = a_{tr,x} - a_r \quad \text{(C.27)} \qquad a_{y,2} = a_{tr,y} + a_r \quad \text{(C.28)}$$

Ineinander Einsetzen der Gleichungen für die Translation liefert:

$$a_{tr,x} = \frac{a_{x,1} + a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.29)} \qquad a_{tr,y} = \frac{a_{y,1} + a_{y,2}}{2} \quad \text{(C.30)}$$

Ineinander Einsetzen der Gleichungen für die Rotation liefert:

$$a_r = \frac{a_{x,1} - a_{x,2}}{2} \quad \text{(C.31)} \qquad a_r = \frac{a_{y,2} - a_{y,1}}{2} \quad \text{(C.32)}$$

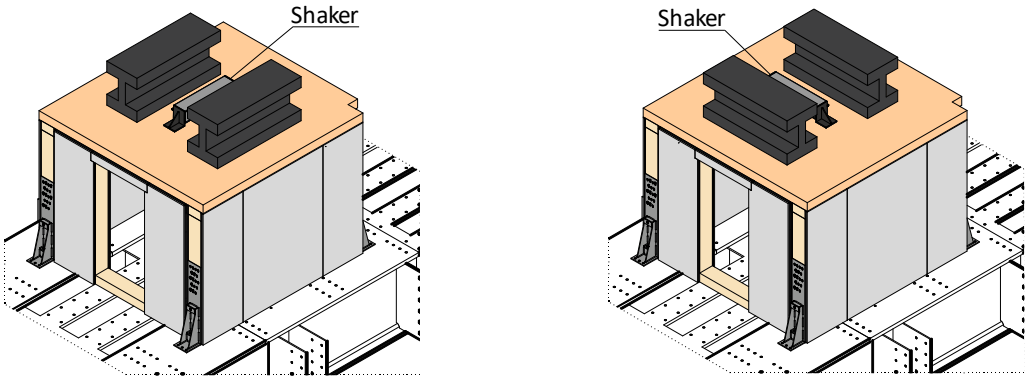
Für die Rotation wird der Mittelwert der beiden Werte gebildet.

Die Formeln (C.25) bis (C.32) gelten analog mit folgenden Anpassungen für die Sensoren im Obergeschoss:

$$a_{x,1} \mathrel{\widehat{=}} a_{x,3} \qquad a_{y,1} \mathrel{\widehat{=}} a_{y,3} \qquad a_{x,2} \mathrel{\widehat{=}} a_{x,4} \qquad a_{y,2} \mathrel{\widehat{=}} a_{y,4}$$

Dynamische Untersuchungen D1

Versuchsaufbau



Anregung in x-Richtung

Anregung in y-Richtung

Abbildung C-3: Versuchsaufbau – D1

Messprotokoll

Tabelle C-1: Messprotokoll – D1

Messprotokoll – D1	
Datum: 11.07.2024	
Allgemeine Anmerkungen: • Zentrische Anregung in x- und y-Richtung • a_x1 beziehungsweise a_y1 sind am Rahmen des Shakers befestigt, nicht an den sich bewegenden Massen • Massen wurden beim Drehen des Shakers gedreht	
Messung	**Bemerkung**
M01_a_y	10:18 – 10:26
(M02_n_y_c_01_30_003)	Abgebrochen
(M03_s_y_c_01_30_150)	Abgebrochen
M04_s_y_c_01_30_050	
M05_i_y_c	Impuls mit Impulshammer, rechte Seite
M06_e_y_c_10,5_500	
M07_s_y_c_08-30_500	Bis ca. 18 Hz, dann Abbruch; a_x1 am Shaker
M08_s_y_c_08-12_500	a_x1 am Shaker
M09_a_x	11:54 bis 12:00; a_x1 am Shaker
(M10_s_x_c_01_30_050)	Abgebrochen; a_x1 am Shaker
(M11_s_x_c_01_30_050)	a_x1 am Shaker
M12_s_x_c_01_30_050	a_x1 am Shaker
M13_s_x_c_19,5_23,5_500	a_y1 am Shaker
M14_s_x_c_21,6_25,8_500	a_y1 am Shaker
M15_n_x_c_01_30_050	a_y1 am Shaker
M16_i_x_c	Hammer Impuls Mitte; a_y1 am Shaker
M17_i_x_e	Hammer Impuls Ecke; a_y1 am Shaker
M18_i_y_c	Hammer Impuls Mitte; a_y1 am Shaker
M19_i_y_e	Hammer Impuls Ecke; a_y1 am Shaker
M20_s_x_c_01_30_050	600s Sweep; a_y1 am Shaker
M21_e_x_c_21,45_500	a_y1 am Shaker
M22_e_x_c_23,6_500	a_y1 am Shaker

Leistungsdichtespektren (PSD)

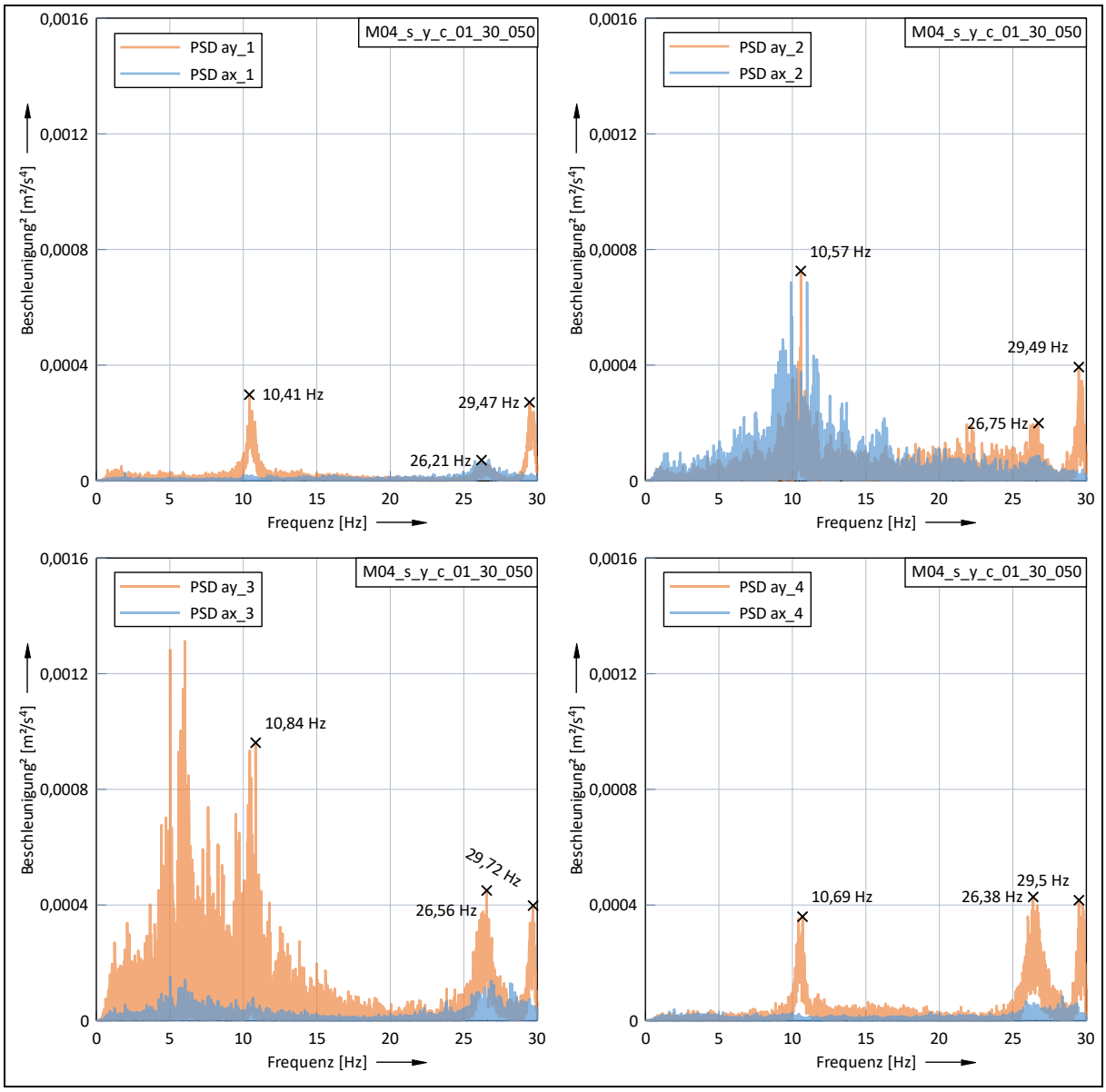


Abbildung C-4: PSDs der Einzelsensoren bei zentrischer Anregung in y-Richtung – D1

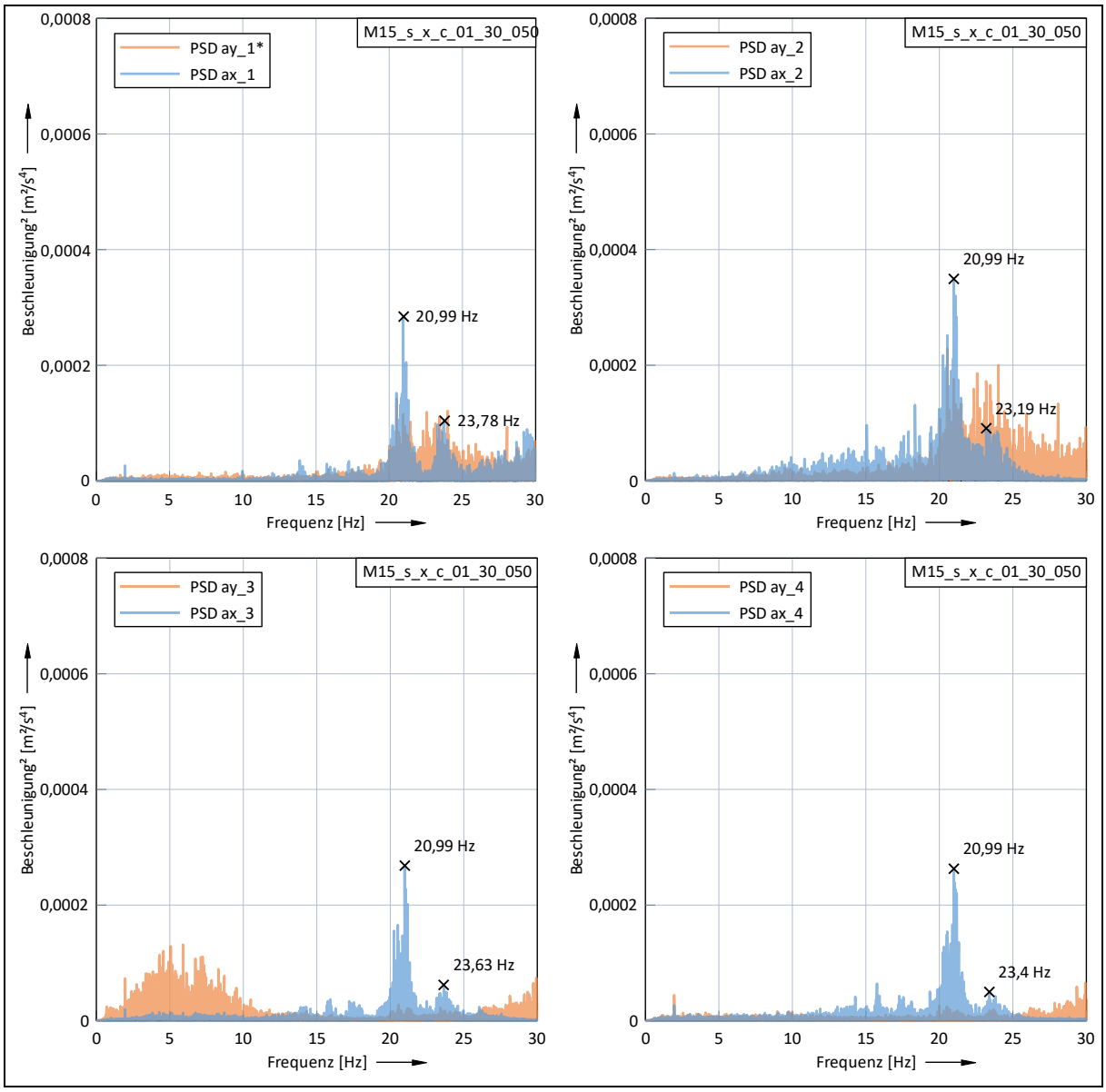
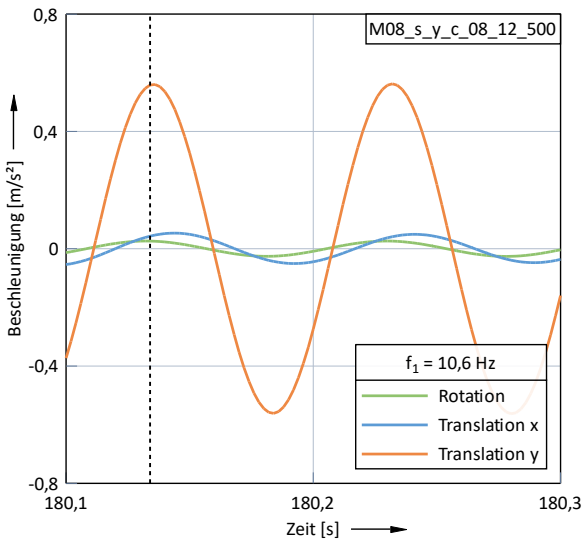
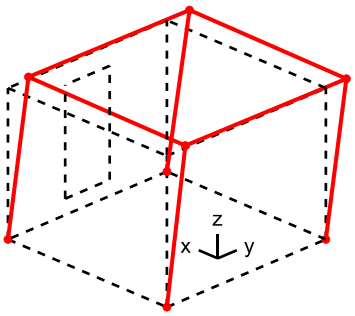


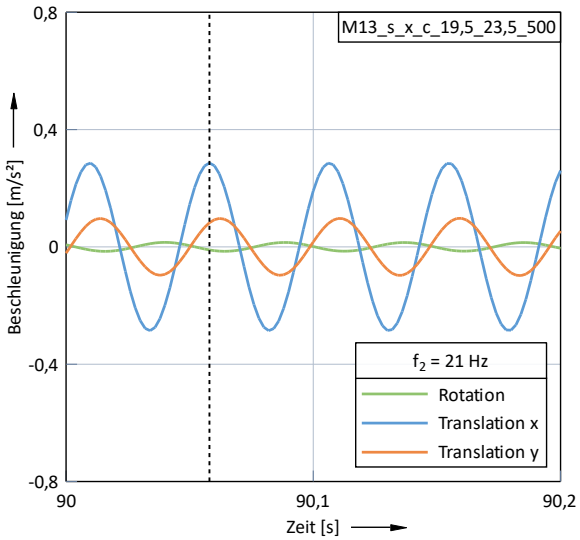
Abbildung C-5: PSDs der Einzelsensoren bei zentrischer Anregung in x-Richtung – D1

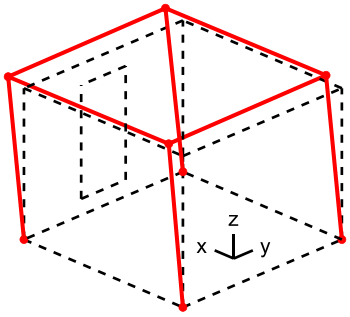
Eigenmoden



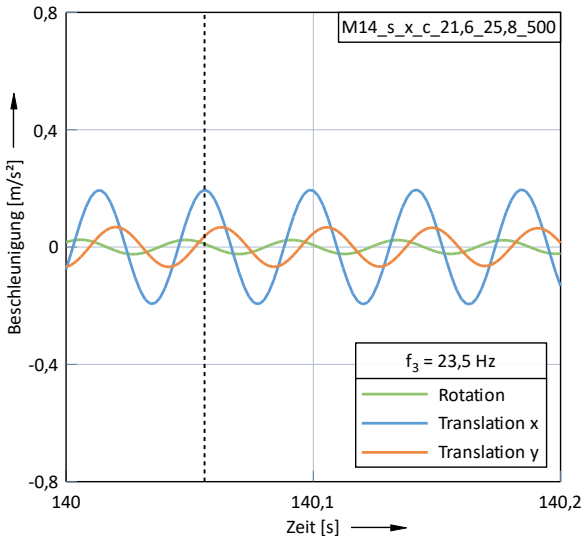


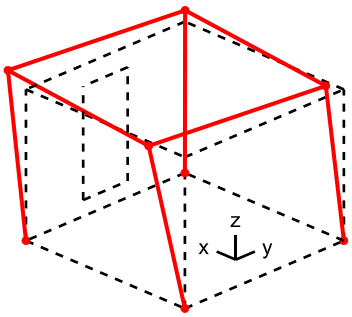
$MAC = 0{,}979$





$MAC = 0{,}991$





$MAC = 0{,}691$

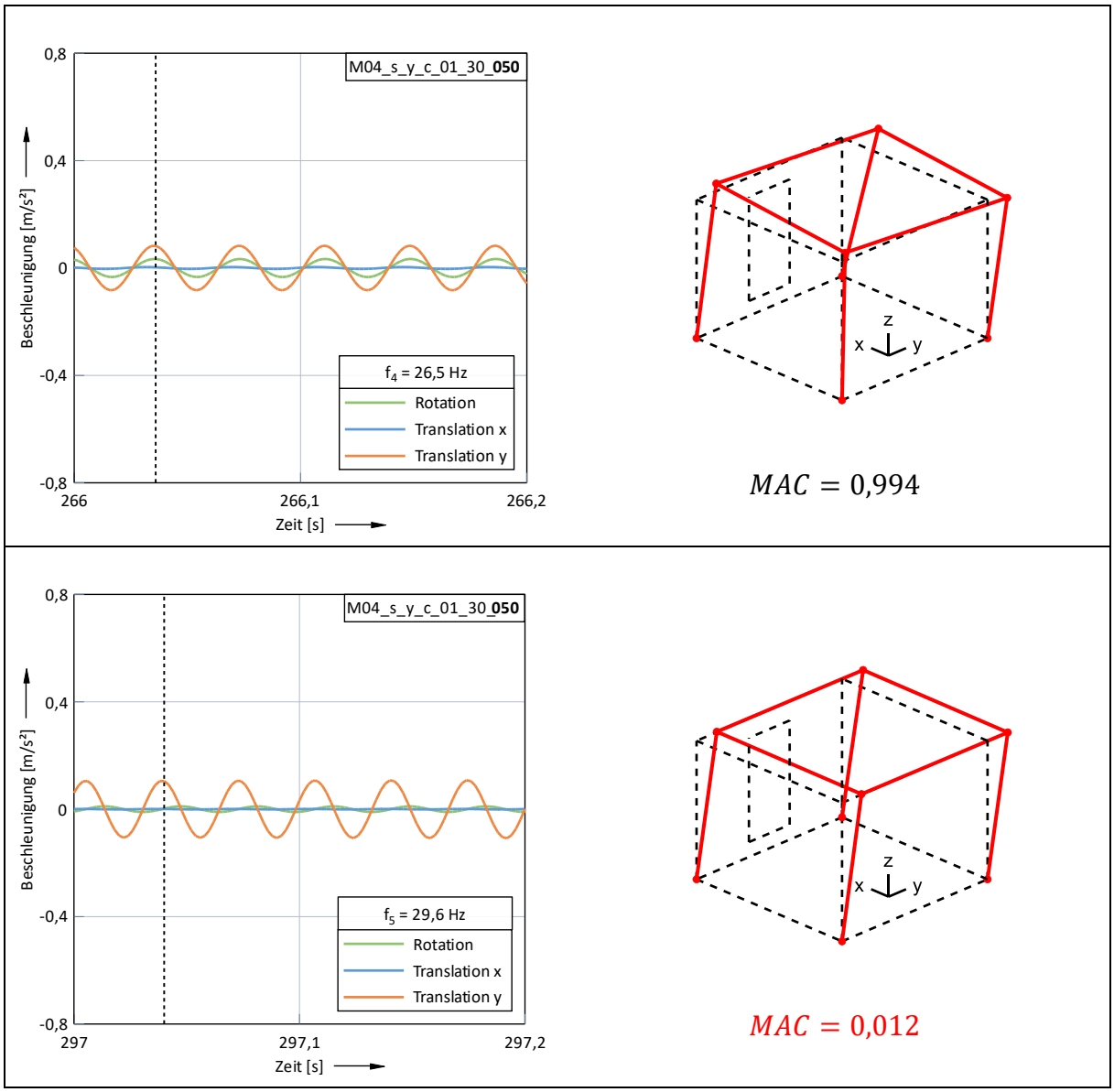


Abbildung C-6: Schwingformanalyse und Visualisierung der Eigenmoden – D1

Eigenvektoren

Tabelle C-2: Zusammenstellung der Eigenvektoren und deren Überprüfung mittels FDD – D1

Konventionell

Freq. [Hz]	10,6	21,0	23,5	26,5	29,6
ax_EG	0,077	1,000	1,000	0,034	0,006
ay_EG	1,000	0,290	0,190	1,000	1,000
ar_EG	0,047	-0,037	0,410	0,410	0,020

FDD

Freq. [Hz]	10,6	21,0	23,5	26,5	29,6
ax_EG	0,227	1,000	1,000	0,100	1,000
ay_EG	1,000	0,280	0,000	1,000	0,102
ar_EG	0,035	0,059	-0,179	0,360	0,141
MAC	0,979	0,991	0,691	0,994	0,012

Einzeldämpfungen

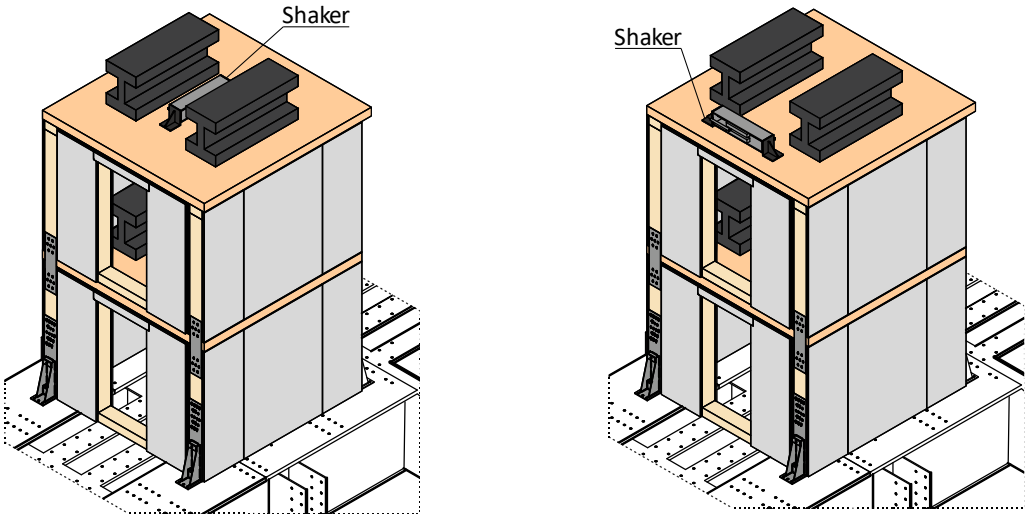
Tabelle C-3: Zusammenstellung der Dämpfungen für jeden Sensor – D1

Frequenz [Hz]	Sensor	ξ_{LD} [%]	ξ_{CF} [%]	ξ_{RK} [%]
10,6	a_y1	1,78	1,73	4,87
	a_y2	1,90	1,84	4,93
	a_y3	1,76	1,75	4,87
	a_y4	1,78	1,74	4,87
	Mittel	1,81	1,77	4,88
21,0	a_x1	1,10	1,09	2,52
	a_x2	1,10	1,10	2,43
	a_x3	1,11	1,10	2,52
	a_x4	1,13	1,12	2,55
	Mittel	1,11	1,10	2,50
26,5[1)]	a_x1	-	-	2,83
	a_x3			4,18
	a_y1			2,26
	a_y2			2,59
	a_y3			2,49
	a_y4			2,52
	Mittel			2,81

1) ξ_{RK} basiert auf einer Anregung mit 50 N

Dynamische Untersuchungen D2

Versuchsaufbau



Anregung in x-Richtung

Anregung in y-Richtung

Abbildung C-7: Versuchsaufbau der Versuchsreihe D2

Messprotokoll

Tabelle C-4: Messprotokoll – D2

Messprotokoll – D2	
Datum: 16.07.2024	
Allgemeine Anmerkungen: • Zentrische Anregung in x-Richtung • Exzentrische Anregung in y-Richtung • a_y2 ist bei allen Messungen an den sich bewegenden Massen des Shakers befestigt	
Messung	**Bemerkung**
M01_n_x_c_01_30_100	
M02_n_x_c_01_30_300	
(M03_n_x_c)	Abgebrochen
M04_s_x_c_02_30_200	
M05_s_x_c_05_15_500	
(M06_s_x_c_11_17_500)	Abgebrochen
M07_s_x_c_11_17_500	
M08_e_x_c_10,4_500	
M09_e_x_c_10,4_500	
M10_e_x_c_14,19_500	
M11_i_x_c	Hammer Impuls Decke OG Mitte
M12_i_x_e	Hammer Impuls Decke OG Ecke
(M13_n_y_e_01_30_300)	Abgebrochen
M14_n_y_e_01_30_300	
M15_s_y_e_04_09_500	
(M16_s_y_e_17_24_500)	Abgebrochen
M17_s_y_e_17_24_500	
M18_e_y_e_6,5_500	
M19_e_y_e_20,8_500	
M20_s_y_e_24_30_500	

Leistungsdichtespektren (PSD)

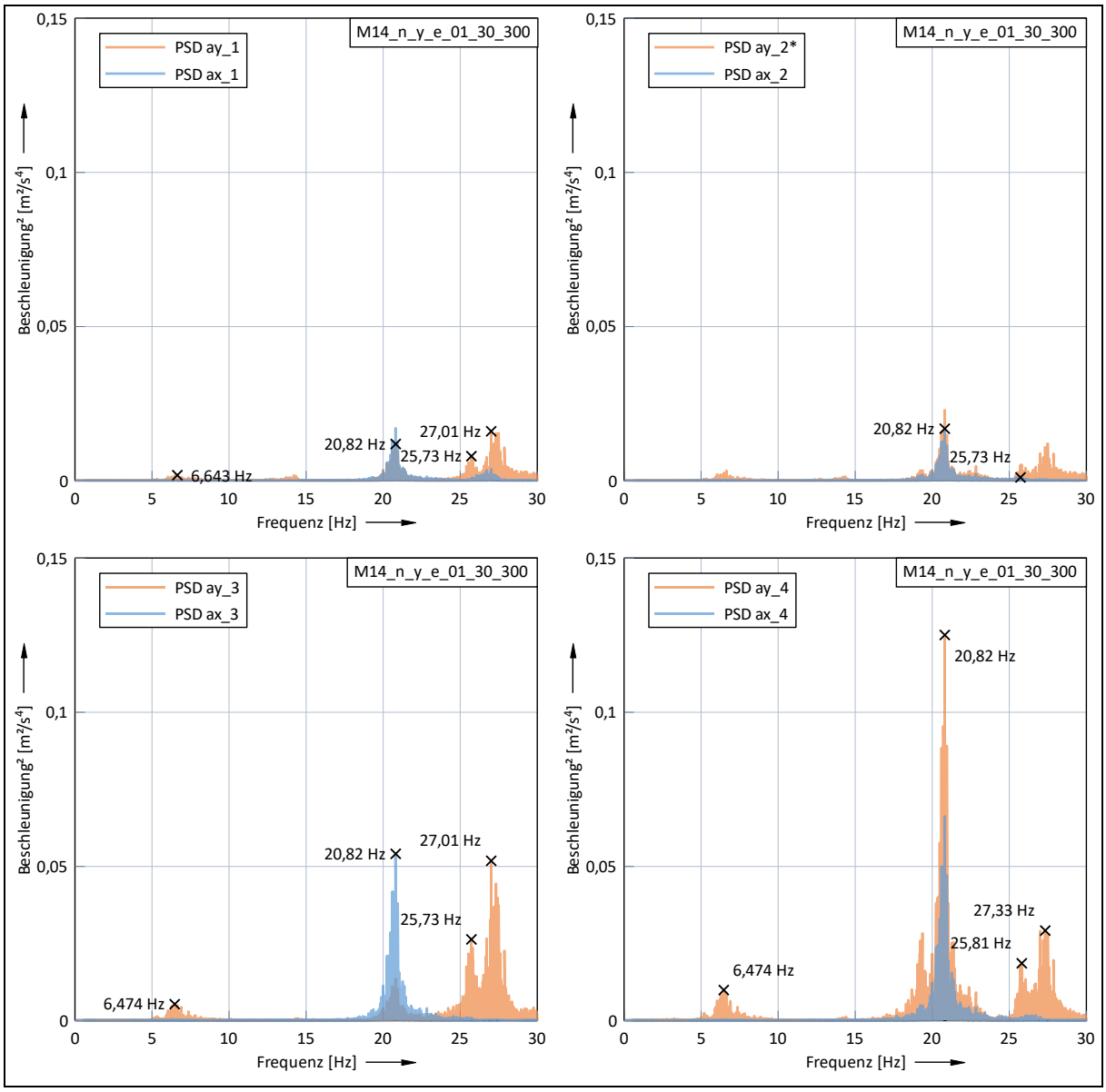


Abbildung C-8: PSDs der Einzelsensoren bei exzentrischer Anregung in y-Richtung – D2

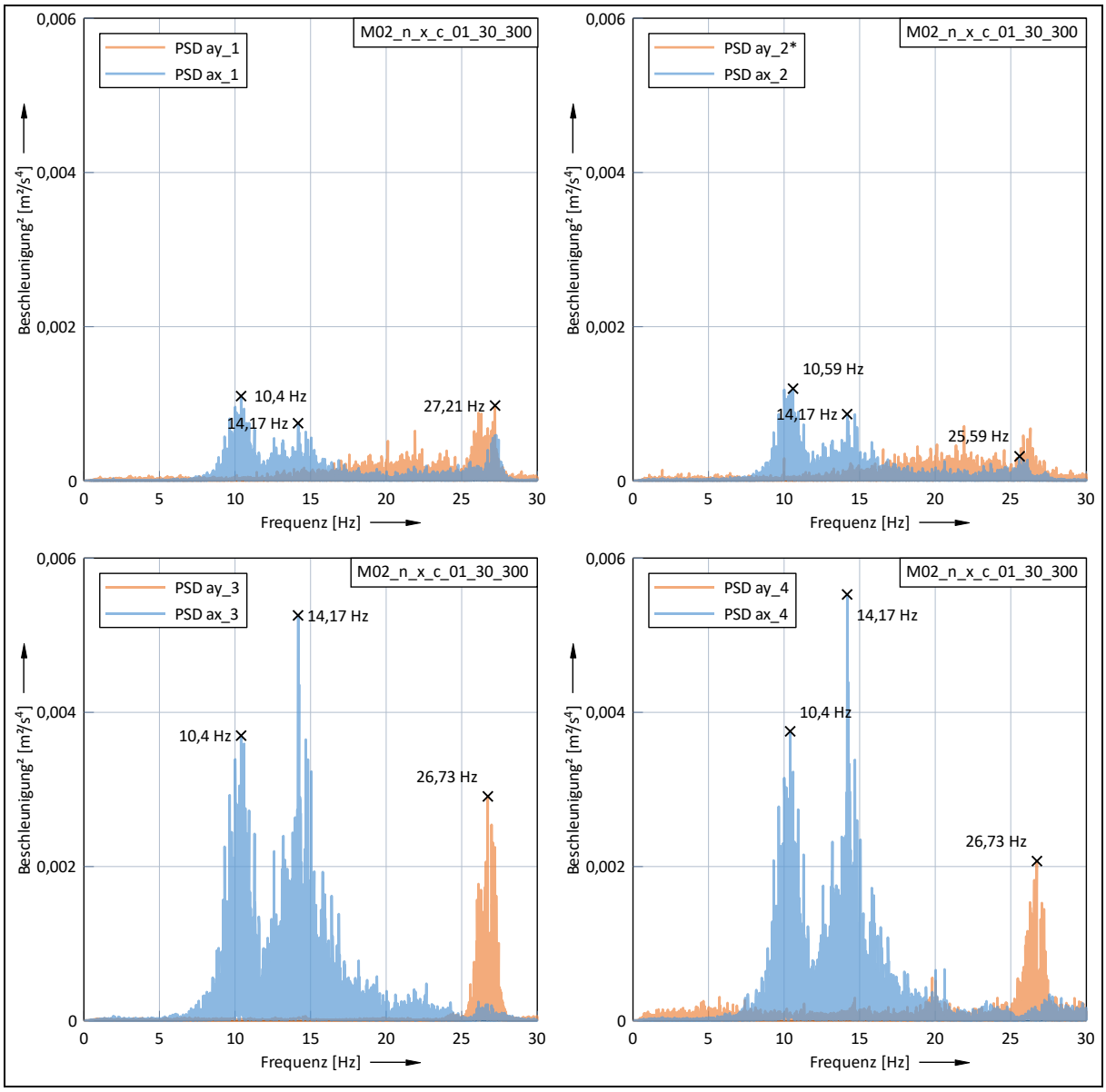
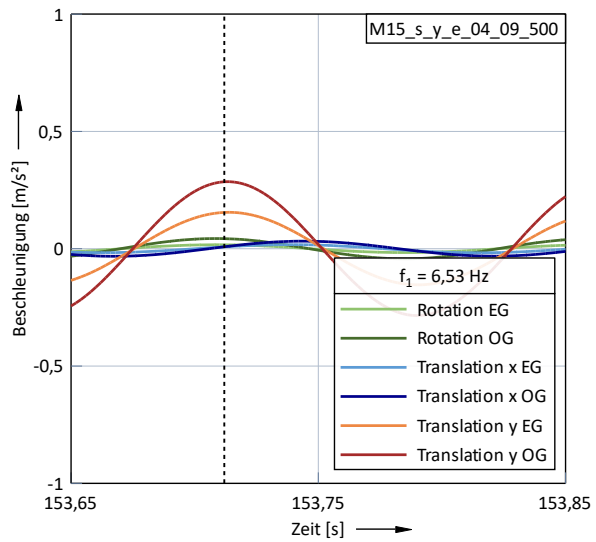
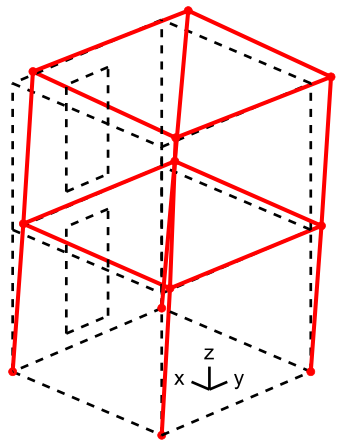


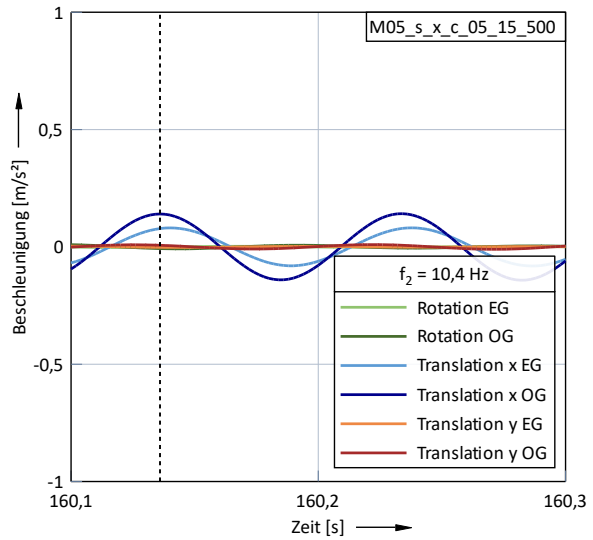
Abbildung C-9: PSDs der Einzelsensoren bei zentrischer Anregung in x-Richtung – D2

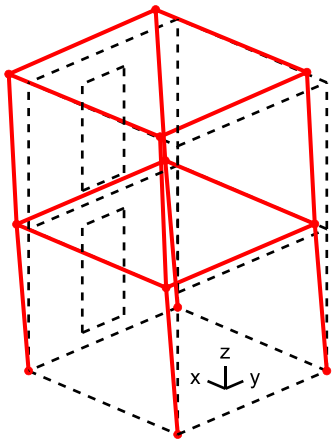
Eigenmoden



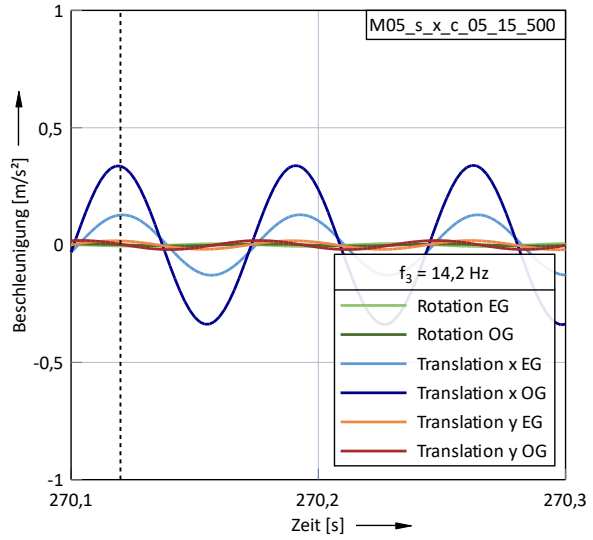


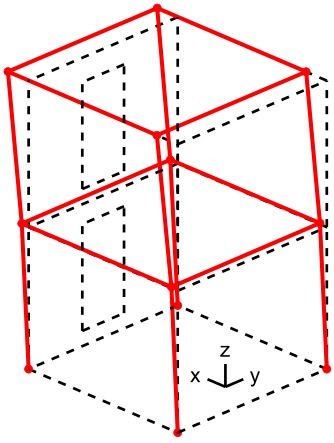
$MAC = 0{,}965$





$MAC = 0{,}990$





$MAC = 0{,}997$

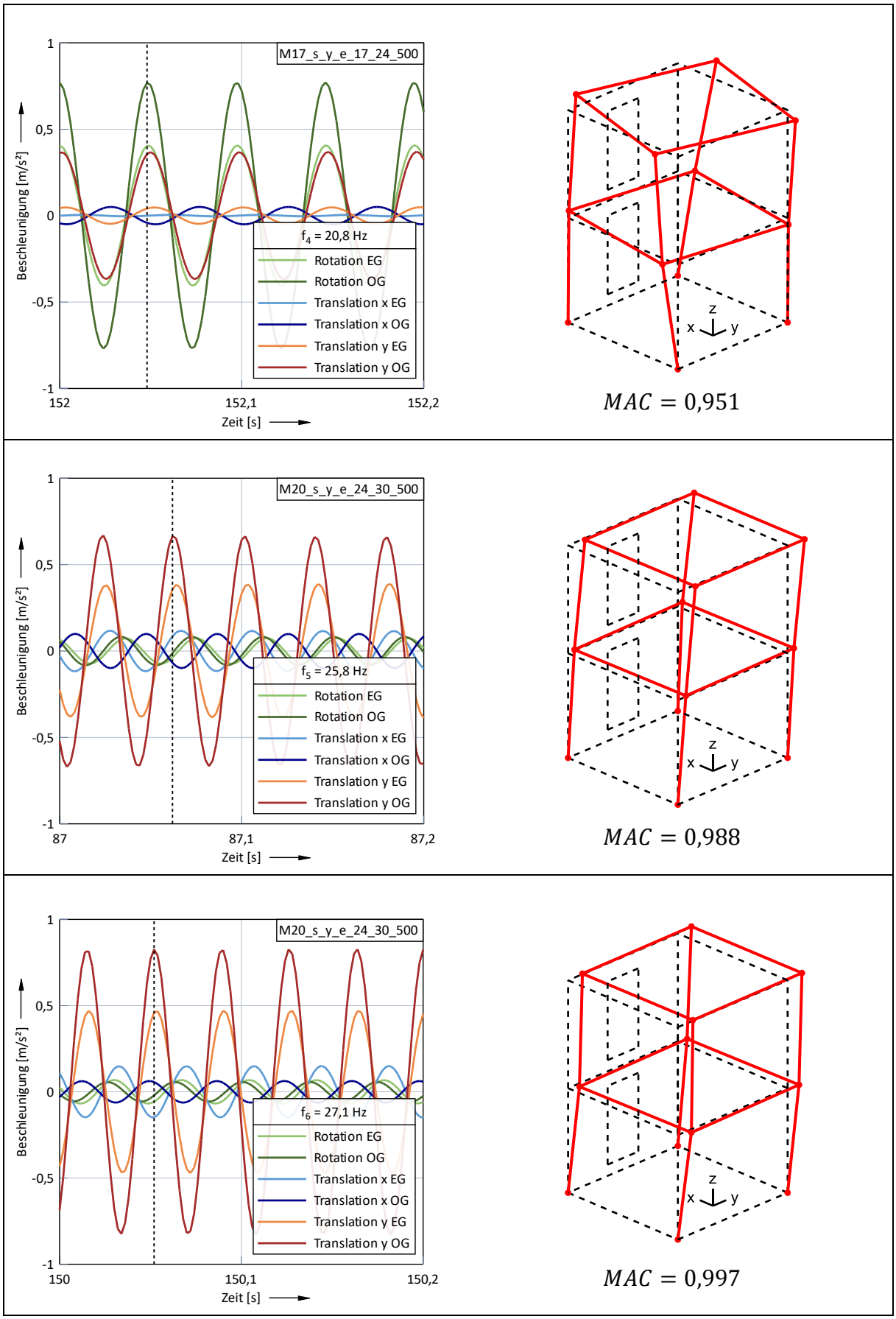


Abbildung C-10: Schwingformanalyse und Visualisierung der Eigenmoden – D2

Eigenvektoren

Tabelle C-5: Zusammenstellung der Eigenvektoren und deren Überprüfung mittels FDD – D2

Konventionell						
Freq. [Hz]	**6,53**	**10,4**	**14,2**	**20,8**	**25,8**	**27,1**
ax_EG	0,028	0,560	0,380	-0,001	0,130	-0,180
ay_EG	0,540	-0,016	0,052	0,053	0,540	0,560
ar_EG	0,058	-0,010	-0,013	0,530	-0,057	-0,070
ax_OG	0,029	1,000	1,000	-0,055	-0,100	0,069
ay_OG	1,000	0,048	0,010	0,460	1,000	1,000
ar_OG	0,150	-0,053	0,004	1,000	-0,019	-0,025

FDD						
Freq. [Hz]	**6,53**	**10,4**	**14,2**	**20,8**	**25,8**	**27,1**
ax_EG	0,104	0,576	0,390	0,003	0,200	-0,190
ay_EG	0,575	0,031	0,037	0,155	0,629	0,500
ar_EG	0,092	-0,029	0,012	0,575	-0,022	-0,089
ax_OG	0,233	1,000	1,000	-0,129	-0,162	0,078
ay_OG	1,000	-0,033	-0,037	0,775	1,000	1,000
ar_OG	0,181	0,010	0,022	1,000	0,032	-0,039
MAC	0,965	0,990	0,997	0,951	0,988	0,997

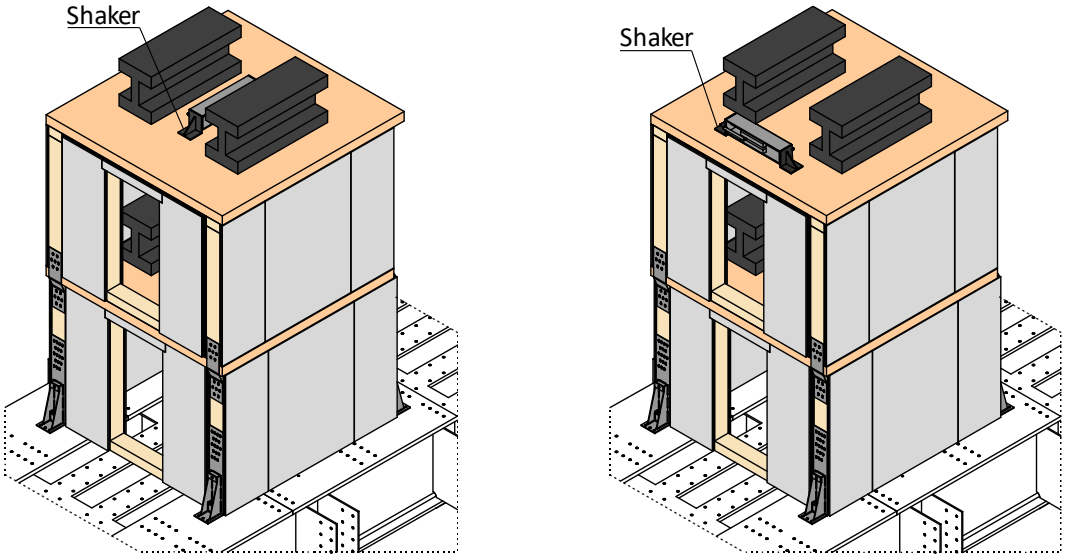
Einzeldämpfungen

Tabelle C-6: Zusammenstellung der Dämpfungen für jeden Sensor – D2

Frequenz [Hz]	Sensor	ξ_{LD} [%]	ξ_{CF} [%]	ξ_{RK} [%]
6,53	a_y1	4,59	4,30	8,81
	a_y3	4,64	4,34	8,74
	a_y4	4,18	3,94	8,61
	Mittel	4,47	4,19	8,72
10,5	a_x1	3,13	2,83	13,1
	a_x2	3,06	2,78	13,0
	a_x3	2,88	2,62	13,7
	a_x4	2,90	2,65	13,4
	Mittel	2,99	2,72	13,3
14,2	a_x1	3,02	2,69	5,96
	a_x2	2,77	2,53	5,58
	a_x3	2,78	2,54	5,17
	a_x4	2,55	2,37	5,25
	Mittel	2,78	2,53	5,49
20,8	a_x1	1,06	1,03	2,45
	a_x2	1,07	1,04	2,42
	a_x3	1,05	1,02	2,39
	a_x4	1,06	1,03	2,39
	a_y1	1,10	1,06	2,64
	a_y3	1,11	1,06	3,19
	a_y4	1,05	1,02	2,29
	Mittel	1,07	1,04	2,54

Dynamische Untersuchungen D3

Versuchsaufbau



Anregung in x-Richtung

Anregung in y-Richtung

Abbildung C-11: Versuchsaufbau der Versuchsreihe D3

Messprotokoll

Tabelle C-7: Messprotokoll – D3

Messprotokoll – D3	
Datum: 23.07.2024	
Allgemeine Anmerkungen: • Zentrische Anregung in x-Richtung • Exzentrische Anregung in y-Richtung • a_y2 ist bei allen Messungen an den sich bewegenden Massen des Shakers befestigt	
Messung	**Bemerkung**
M01_a_x	13:34 bis 13:54 Uhr
M02_n_x_c_01_30_100	
M03_n_x_c_01_30_300	
M04_s_x_c_02_30_200	
M05_s_x_c_04_13_500	
M06_s_x_c_20_30_500	
M07_e_x_c_8,6_500	
M08_e_x_c_8,6_500	
M09_e_x_c_24,48_500	
M10_e_x_c_24,48_500	
M11_i_x_c	Hammer Impuls Mitte Decke OG
M12_i_x_c	Hammer Impuls Mitte Decke OG
M13_i_x_e	Hammer Impuls Ecke Decke OG
M14_i_x_e	Hammer Impuls Ecke Decke OG
M15_n_y_e_01_30_300	
M16_s_y_e_2,5_09_500	
M17_s_y_e_12_20_500	
M18_s_y_e_22_28_500	
M19_e_y_e_3,1_500	
M20_e_y_e_5,29_500	
M21_e_y_e_6,17_500	
M22_e_y_e_17,26_500	
M23_e_y_e_25,76_500	
M24_i_y_c	Impuls Hammer Mitte Decke OG

Leistungsdichtespektren (PSD)

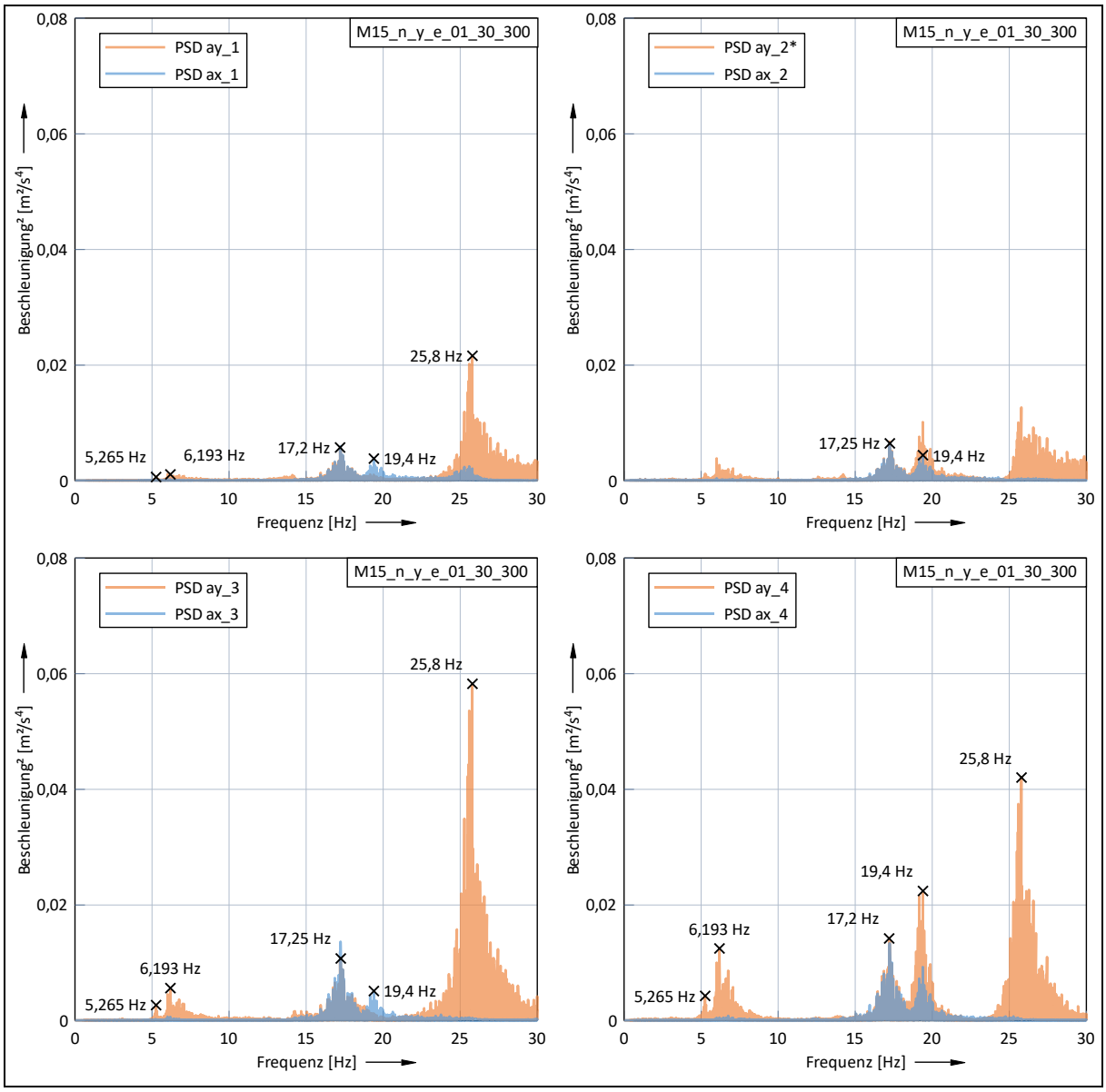


Abbildung C-12: PSDs der Einzelsensoren bei exzentrischer Anregung in y-Richtung – D3

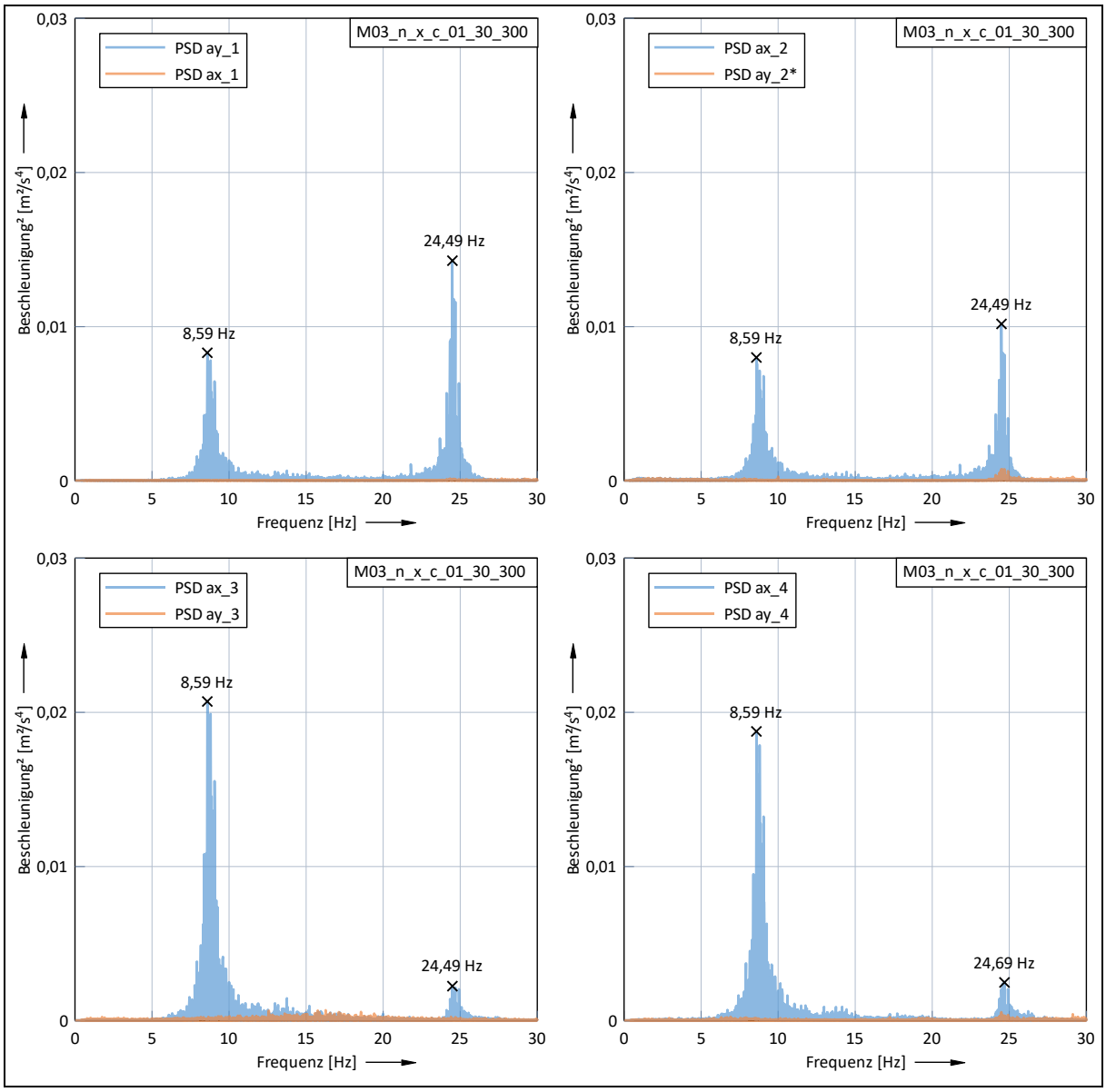
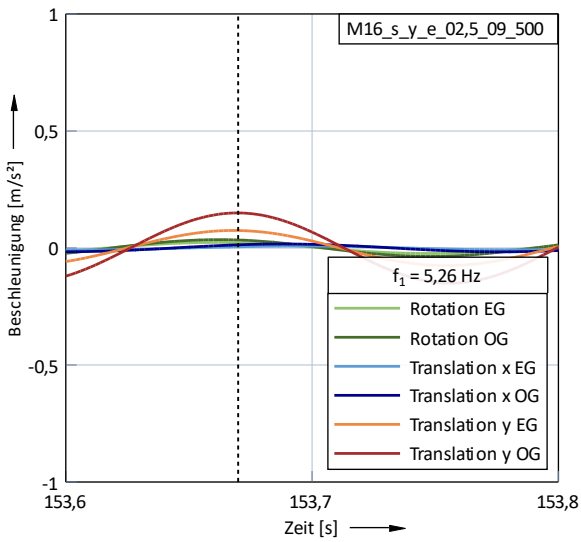
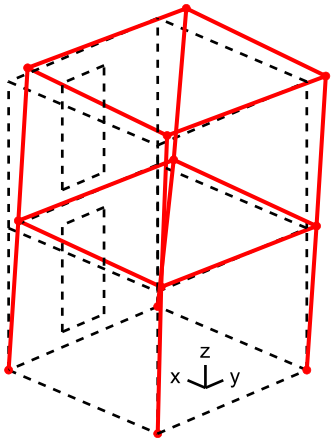


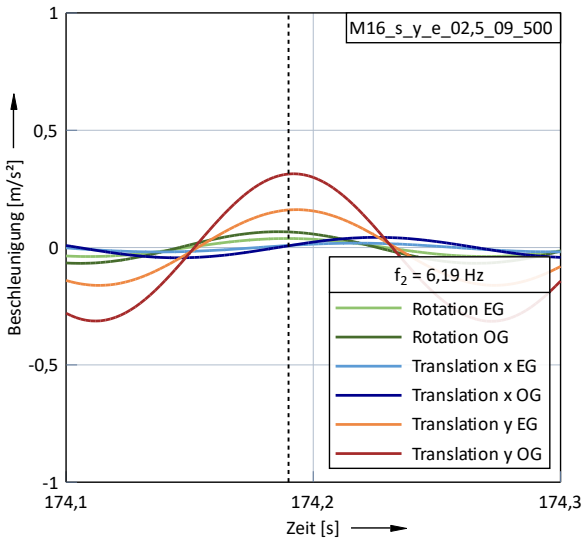
Abbildung C-13: PSDs der Einzelsensoren bei zentrischer Anregung in x-Richtung – D3

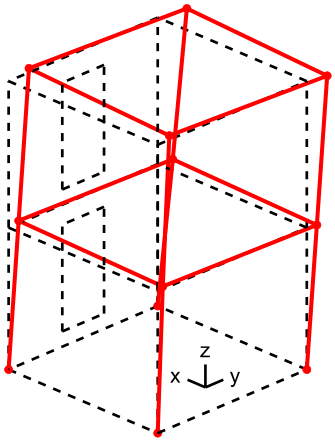
Eigenmoden



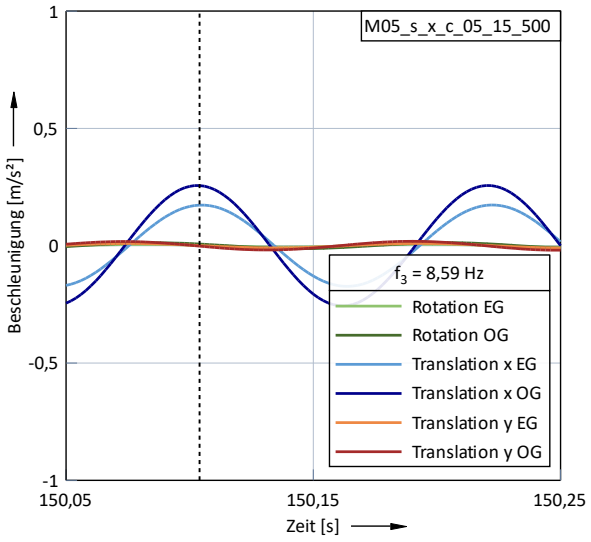


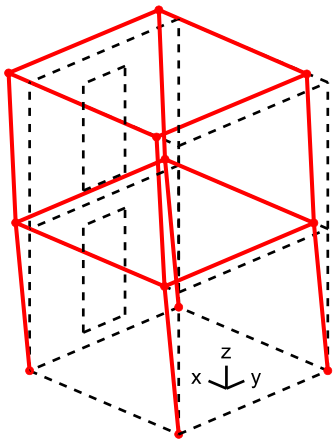
$MAC = 0{,}978$



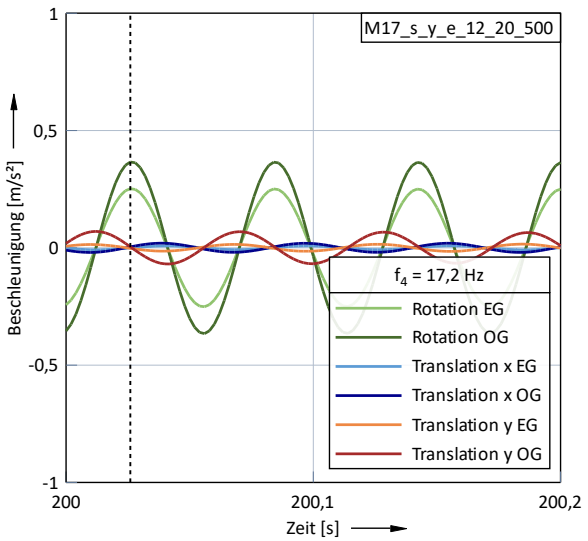


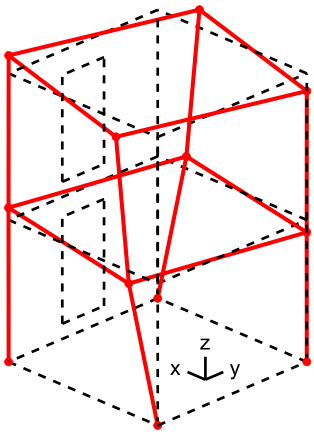
$MAC = 0{,}979$



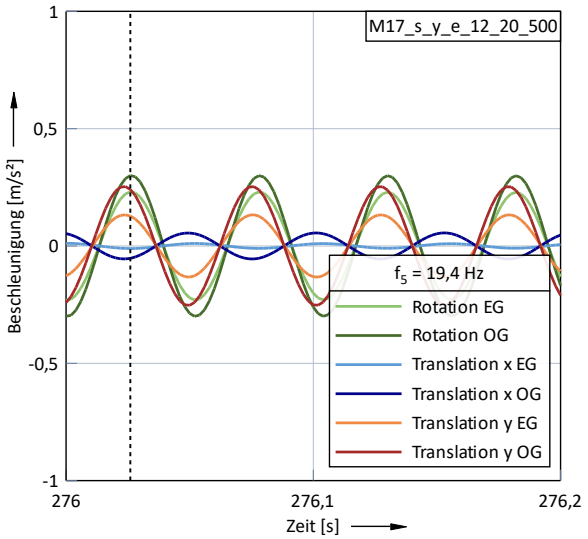


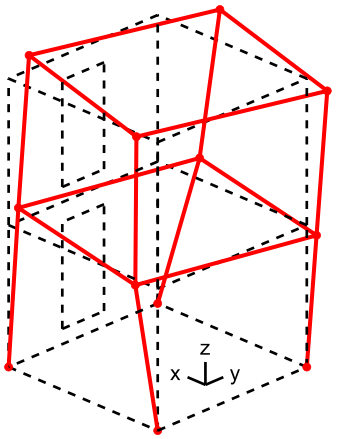
$MAC = 0{,}999$



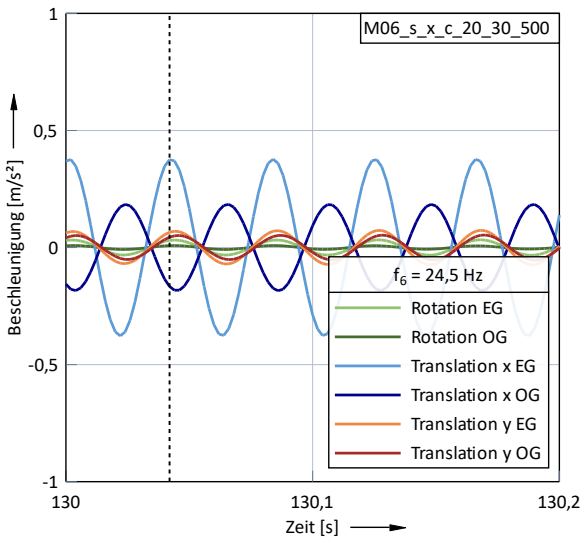


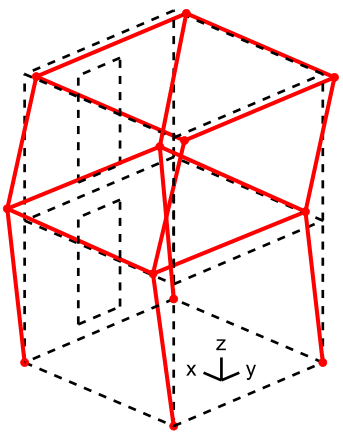
$MAC = 0{,}987$





$MAC = 0{,}998$





$MAC = 1{,}000$

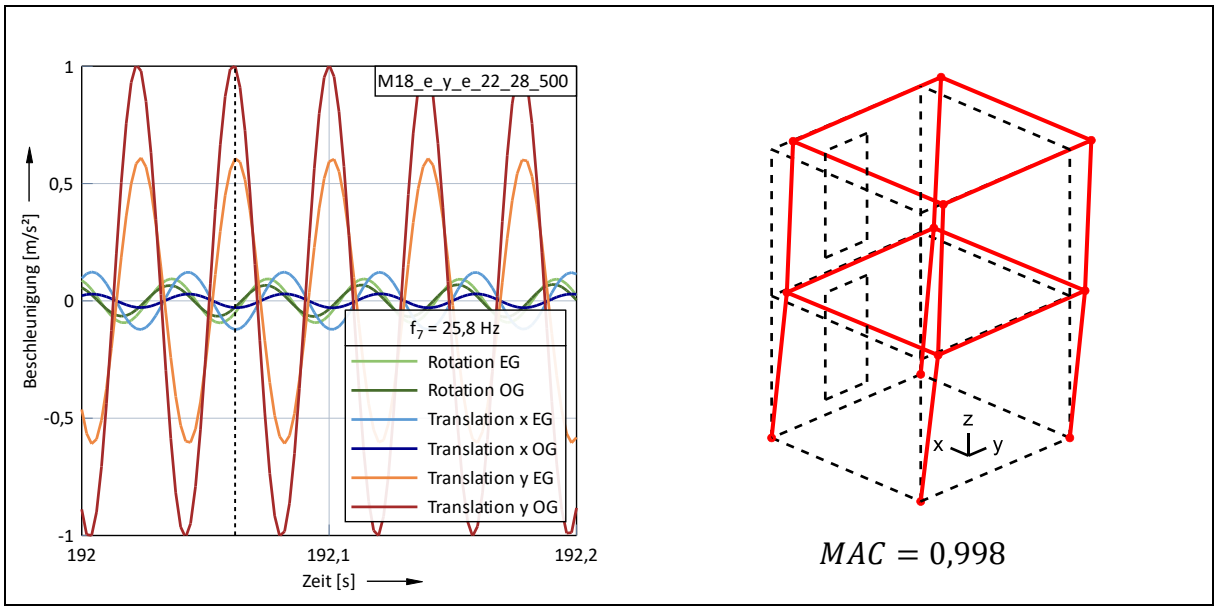


Abbildung C-14: Schwingformanalyse und Visualisierung der Eigenmoden – D3

Eigenvektoren

Tabelle C-8: Zusammenstellung der Eigenvektoren und deren Überprüfung mittels FDD – D3

Konventionell

Freq. [Hz]	5,26	6,19	8,59	17,2	19,4	24,5	25,8
ax_EG	0,034	0,028	0,670	-0,001	-0,037	1,000	-0,120
ay_EG	0,500	0,510	0,002	-0,006	0,430	0,170	0,610
ar_EG	0,150	0,120	0,006	0,690	0,770	0,082	-0,051
ax_OG	0,090	0,024	1,000	0,011	-0,180	-0,440	-0,029
ay_OG	1,000	1,000	-0,007	0,012	0,800	0,120	1,000
ar_OG	0,230	0,210	0,028	1,000	1,000	0,022	-0,027

FDD

Freq. [Hz]	5,26	6,19	8,59	17,2	19,4	24,5	25,8
ax_EG	0,093	0,112	0,643	-0,031	-0,038	1,000	-0,111
ay_EG	0,438	0,476	0,016	0,002	0,490	0,168	0,574
ar_EG	0,019	0,069	0,008	0,683	0,782	0,086	-0,079
ax_OG	0,062	0,144	1,000	-0,038	-0,184	-0,449	-0,024
ay_OG	1,000	1,000	0,007	0,139	0,858	0,113	1,000
ar_OG	0,164	0,154	0,029	1,000	1,000	0,004	-0,041
MAC	0,978	0,979	0,999	0,987	0,998	1,000	0,998

Einzeldämpfungen

Tabelle C-9: Zusammenstellung der Dämpfungen für jeden Sensor – D3

Frequenz [Hz]	Sensor	ξ_{LD} [%]	ξ_{CF} [%]	ξ_{RK} [%]
6,19	a_y1	4,68	4,24	9,01
	a_y3	4,71	4,26	9,02
	a_y4	4,98	4,48	8,98
	Mittel	4,79	4,33	9,00
8,59	a_x1	3,22	3,00	12,2
	a_x2	3,30	3,08	12,6
	a_x3	3,18	2,97	12,0
	a_x4	3,23	3,02	12,4
	Mittel	3,23	3,02	12,3
17,2	a_x1	0,70	0,71	3,41
	a_x2	0,72	0,74	3,50
	a_x3	0,75	0,75	3,37
	a_x4	0,70	0,71	3,54
	a_y1	0,70	0,71	3,45
	a_y3	0,76	0,77	3,50
	a_y4	0,65	0,67	*4,28*
	Mittel	0,71	0,72	3,58
19,4	a_x1	-	-	-
	a_x2			2,96
	a_x3			-
	a_x4			3,00
	a_y1			-
	a_y3			-
	a_y4			2,37
	Mittel			2,78
24,5	a_x1	1,20	1,11	1,80
	a_x2	1,18	1,09	1,80
	a_x3	1,35	1,23	2,05
	a_x4	1,34	1,22	1,64
	Mittel	1,27	1,16	1,82