

Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchungen des Schwingungs- und Dämpfungsverhaltens einer Doppelbaumdecke mit Basalt-textilbewehrter Aufbetonschicht

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Experimental investigation of the vibration and damping behavior of a dowel beam ceiling with a thin basalt textile-reinforced concrete layer

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieurin

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Hanna Madlmayr, BSc

Matr.Nr.: 11902085

Betreuung: Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer**
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Simon Leitner**
Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13 / Stiege 2 / 3.OG (Halbstock), 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2025



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Hanna Madlmayr, BSc

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich erkläre weiters, dass ich mich generativer KI-Tools lediglich als Hilfsmittel bedient habe und in der vorliegenden Arbeit mein gestalterischer Einfluss überwiegt. Im Anhang „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ habe ich alle generativen KI-Tools gelistet, die verwendet wurden, und angegeben, wo und wie sie verwendet wurden. Für Textpassagen, die ohne substantielle Änderungen übernommen wurden, haben ich jeweils die von mir formulierten Eingaben (Prompts) und die verwendete IT- Anwendung mit ihrem Produktnamen und Versionsnummer/Datum angegeben.

Wien, 20. März 2025

Hanna Madlmayr



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all jenen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit sowie während meines gesamten Studiums unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Philipp Preinstorfer, der es mir ermöglichte meine Diplomarbeit am Institut für Tragkonstruktionen zu verfassen. Ebenso danke ich Simon Leitner durch dem ich bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen mitwirken durfte und so im Bereich der Forschung spannende Einblicke erlangen konnte. Ebenfalls möchte ich mich für seine engagierte Betreuung und seine wertvollen Anregungen während der Ausarbeitung der Diplomarbeit bedanken.

Weiters möchte ich den Studienassistenten, die mir mit ihrem Fachwissen weitergeholfen haben, meinen Dank aussprechen: Galeb El Chabaan für seine Unterstützung bei Fragen zur Baudynamik und Markus Detter für seine Hilfe im Bereich des Ingenieurholzbaus.

Darüber hinaus möchte ich meiner Familie, meinen Studienkollegen und Freunden danken. Ohne ihre stetige Unterstützung, Motivation und Geduld wäre dieser Weg um einiges herausfordernder gewesen. Ihr habt maßgeblich zu meinem Erfolg beigetragen, dafür bin ich euch sehr dankbar.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Dippelbaumdecken waren im Gebiet der ehemaligen Habsburgermonarchie während der Biedermeier- und Gründerzeit eine weit verbreitete Deckenkonstruktion. In Wien war ihre Verwendung für die oberste Geschossdecke behördlich vorgeschrieben, da sie aufgrund ihrer hohen Tragfähigkeit Trümmerlasten aufnehmen konnten und aus Brandschutzgründen als besonders geeignet galt.

Im Zuge von Dachgeschossausbauten verlangt diese historische Deckenkonstruktion nun nach effizienten Sanierungsmaßnahmen um die Tragfähigkeit und vor allem die Gebrauchstauglichkeit zu verbessern. Die derzeit übliche Methode ist eine Verstärkung der Dippelbäume mit einer Aufbetonschicht aus Stahlbeton. Dabei wird über Schubverbinder, wie z.B. Schrauben, ein Holz-Beton-Verbundquerschnitt hergestellt. Durch die notwendige Betondeckung von Stahlbewehrungen ergeben sich Aufbetonschichtstärken von ca. 5-7 cm, obwohl diese statisch oft nicht erforderlich sind. Dieses zusätzliche Eigengewicht kann Verstärkungsmaßnahmen an den bestehenden Tragstrukturen erforderlich machen. Eine mögliche Alternative ist die Verwendung einer dünnen, Basalt-textilbewehrten Aufbetonschicht.

Ziel dieser Arbeit ist, die Eigenschaften einer Dippelbaumdeckenverstärkung mit einer dünnen Basalt-textilbewehrten Aufbetonschicht im Vergleich zur klassischen Stahlbetonlösung zu ermitteln. Dazu wurde eine experimentelle Untersuchung an zwei Verbunddeckenstreifen mit einer Länge von 4,7 m durchgeführt. Die Versuche umfassten einen zerstörenden Belastungsversuch zur Untersuchung des Tragverhaltens sowie verschiedene Schwingungsversuche zur Analyse der dynamischen Eigenschaften. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Auswertung zweitem. Ergänzend dazu wurde ein Finite-Elemente-Modell erstellt und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Darauf aufbauend wurde eine Übertragung auf typische Spannweiten von Gründerzeithäusern durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Basalt-textilbewehrte Aufbetonschicht eine vielversprechende und ressourcenschonende Alternative zur herkömmlichen Sanierungsmethode darstellt. Die Stahlbeton-Verbunddecke weist aufgrund der größeren Höhe und somit größeren Biegesteifigkeit zwar geringere Durchbiegungen auf, jedoch ist der Unterschied in den dynamischen Eigenschaften, wie etwa der ersten Eigenfrequenz, gering. Sowohl die experimentellen Untersuchungen als auch die Finite-Elemente-Modelle zeigen, dass beide Verstärkungsmethoden die Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gemäß Eurocode 5 erfüllen.

Diese Erkenntnisse unterstreichen das Potenzial der Basalt-Textilbewehrung als innovative Sanierungsmethode für Dippelbaumdecken. Für eine vollständige Bewertung sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, insbesondere hinsichtlich des Langzeitverhaltens und der horizontalen Lastabtragung.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Dowel beam ceilings were a common ceiling construction in the former Habsburg Monarchy during the Biedermeier and Gründerzeit periods. Their use for top floor ceilings was mandated by the authorities in Vienna because of their high load-bearing capacity to withstand debris loads and because they were considered particularly suitable for fire protection.

In the course of loft conversions, this historic ceiling structure now requires efficient retrofitting measures to improve its load-bearing capacity and, above all, its serviceability. The current standard method is to add a layer of reinforced concrete on top of the dowel beams. Shear connectors, such as screws, are used to create a timber-concrete composite section. The required thickness of the concrete covering the steel reinforcement results in concrete layer thicknesses of approximately 5-7 cm, although this is often not necessary from a structural point of view. This additional weight may require supporting and strengthening measures of the existing structure. A possible alternative is the use of a thin basalt textile reinforced concrete layer.

The aim of this work is to determine the properties of a retrofitted dowel beam ceiling with a thin basalt textile-reinforced concrete layer in contrast to the established steel reinforced concrete solution. For this purpose, an experimental investigation was carried out on two timber-concrete composite floors with a length of 4.7 m. The experimental setup included a destructive load test to investigate the load-bearing capacity and various vibration tests to analyze the dynamic properties. This thesis focuses on the evaluation of the latter. In addition, a finite element model was developed and compared with the experimental results. From this model, conclusions for typical spans of Gründerzeit houses were drawn.

The results show that the basalt textile-reinforced concrete layer is a promising and resource-efficient alternative to the conventional retrofitting method. The steel-reinforced concrete composite floor has lower deflection values due to its greater height and therefore greater bending stiffness. However, the differences in dynamic properties, such as the first natural frequency, are minor. Both the experimental results and the finite element models show that both methods meet the Eurocode 5 requirements for load-bearing capacity and serviceability.

These results underline the potential of basalt textile-reinforcement as an innovative retrofit method for dowel beam ceilings. However, further investigations are required for a complete evaluation, especially regarding long-term behavior and the horizontal load-bearing capacity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Problemstellung	13
1.2	Zielsetzung und Methodik	13
1.3	Aufbau	14
2	Grundlagen	15
2.1	Baudynamik	15
2.1.1	Konzepte der Modellbildung	15
2.1.2	Der lineare Einmassenschwinger	16
2.1.3	Balkenschwingung	19
2.1.4	Fourieranalyse	20
2.1.5	Übertragungsfunktion	22
2.1.6	Stoßbelastung	22
2.1.7	Dämpfung	23
2.2	Material und Querschnitt	28
2.2.1	Verbundquerschnitt	28
2.2.2	Basalt-Textilbewehrung	30
2.3	Normative Grundlagen	31
2.3.1	Grenzwert der Durchbiegung	31
2.3.2	Schwingungsnachweise	31
3	Experimentelle Untersuchung	34
3.1	Versuchskonzept	34
3.2	Messkonzept	35
3.3	Verbunddeckenherstellung	39
3.3.1	Dippelbäume	39
3.3.2	Probekbetonage	41
3.3.3	Aufbetonschicht	42
3.4	Versuchsablauf	43
3.4.1	Schwingungsversuche	45
3.4.2	Belastungsversuch	46
3.5	Materialparameter	47
3.5.1	Beton	47
3.5.2	Holz	50
3.5.3	Bewehrung	50
3.5.4	Verbindungsmitel	51
4	Auswertung und Ergebnisse	52
4.1	Belastungsversuch	52
4.2	Statischer Schwingungsversuch	54
4.3	Dynamischer Schwingungsversuch	56
4.3.1	Eigenfrequenz	57

4.3.2	Dämpfung	59
4.4	Impulshammer	61
4.4.1	Eigenfrequenz	63
4.4.2	Dämpfung	65
4.5	Finite-Elemente Berechnung	66
4.5.1	Modellierung der Versuchskörper	66
4.5.2	Parametervariation auf baupraktische Spannweiten	67
5	Interpretation der Ergebnisse	68
5.1	Belastungsversuch	68
5.2	Statischer Schwingungsversuch	68
5.3	Dynamischer Schwingungsversuch	69
5.4	Impulshammer	69
5.5	Finite-Elemente Berechnung	69
5.5.1	Modellierung der Versuchskörper	69
5.5.2	Parametervariation auf baupraktische Spannweiten	70
5.6	Zusammenfassung	70
6	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	72
A	Übersicht verwendeter Hilfsmittel	79
B	Plots	80
B.1	Auswertung dynamischer Schwingungsversuch	80
B.2	Auswertung Impulshammer	87
C	MATLAB und Python Code	91
C.1	Auswertung Belastungsversuch	91
C.2	Auswertung dynamischer Schwingungsversuch	92
C.2.1	Fast Fourier Transformation (FFT)	92
C.2.2	Extremwerte für logarithmisches Dekrement	93
C.2.3	Umhüllende Exponentialfunktion	93
C.3	Auswertung Impulshammer	94
D	Pläne und Material	96

Kapitel 1

Einleitung

Doppelbaumdecken bestehen aus eng aneinander liegenden Holzbalken („Mann an Mann“) [14] und waren während des Biedermeier und der frühen Gründerzeit im Gebiet der ehemaligen Habsburgermonarchie die vorherrschende Deckenform, insbesondere bei repräsentativen Bauten [28].

In Wien war die Verwendung dieser Deckenkonstruktion für die oberste Geschossdecke behördlich vorgeschrieben, da sie aufgrund ihrer hohen Tragfähigkeit zur Aufnahme von Trümmerlasten und aus Brandschutzgründen als besonders geeignet galt [28]. Als Zwischendecke wurde sie hingegen seltener eingesetzt, da ihr hoher Materialverbrauch und der notwendige Wandabsatz als Deckenaufleger in jedem Geschoss nachteilig sind [14]. Im Wohnbau der Gründerzeit betragen die üblichen Spannweiten maximal 6 Meter [14].

Nach [28] sind die parallel angeordneten Holzbalken einer Doppelbaumdecke meist aus Fichten- oder Tannenholz. Diese sind an drei Seiten bearbeitet, so dass ein balkenähnlicher Querschnitt entsteht. Zur Verbesserung der Lastverteilung und der Schwingungseigenschaften wurden die Balken an den Längsseiten mit Hartholzdübeln verbunden. Die Höhe der Doppelbäume variiert innerhalb einer Decke und liegt in der Regel zwischen 14 und 20 cm, wobei die Deckenunterseite eben bleibt [28].

Abbildung 1.1 zeigt einen typischen Querschnitt und Längsschnitt einer Doppelbaumdecke mit Ziegelpflaster.

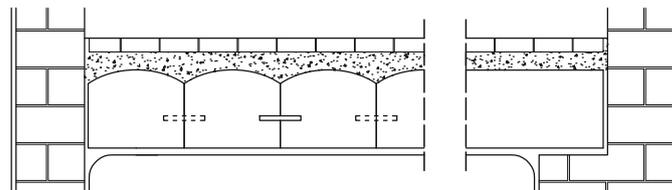


Abb. 1.1: Querschnitt und Längsschnitt einer Doppelbaumdecke nach [14]

Im Rahmen von Dachgeschossausbauten werden Doppelbaumdecken heute häufig mit einer Aufbetonschicht verstärkt, um die Tragfähigkeit zu erhöhen, die Durchbiegungs- und Schwingungsanfälligkeit zu verringern sowie die bauphysikalischen Eigenschaften zu verbessern [10]. Um aus der Aufbetonplatte und den Doppelbäumen eine Holz-Beton-Verbund (HBV) Konstruktion zu machen werden die einzelnen Teilquerschnitte mit Schubverbindern verbunden (siehe Kapitel 2.2.1). Dabei können bei einem Einfeldträger die dominierenden Festigkeitseigenschaften beider Materialien optimal genutzt werden, da der Beton in der Biegedruckzone und das Holz in der Biegezugzone liegt [28].

1.1 Problemstellung

Bei der Herstellung eines Verbundquerschnittes müssen Schubkräfte in der Fuge zwischen dem Holz- und Betonquerschnitt übertragen werden. Dies erfolgt üblicherweise über punkt- oder linienförmige mechanische Verbindungsmittel wie z.B. Nägel, Schrauben oder Kerfen. Die Einleitung dieser Kräfte in den Beton sowie die Anforderungen an die Mindestbewehrung zur Vermeidung schlagartigen Versagens, Begrenzung der Rissbreite und Aufnahme der Zwangseinwirkungen [21] erfordern eine Bewehrung der Aufbetonschicht. Durch die notwendige Betondeckung der Stahlbewehrung ergeben sich relativ große Plattendicken [10], obwohl diese statisch oft nicht erforderlich sind [28].

Nachteile dieser größeren Plattendicke sind ein höheres Eigengewicht, das zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen an den bestehenden Tragstrukturen erforderlich machen kann, sowie ein erhöhter Ressourcenverbrauch. Eine mögliche Lösung besteht darin, die konventionelle Stahlbewehrung durch eine Basalt-Textilbewehrung zu ersetzen, wodurch die Plattendicke reduziert werden kann (siehe Kapitel 2.2.2).

1.2 Zielsetzung und Methodik

Obwohl bereits mehrere Untersuchungen zu HBV-Konstruktionen vorliegen, gibt es zur Kombination einer dünnen Aufbetonplatte mit einer Dippelbaumdecke kaum Literatur [16]. Um das Verhalten einer dünnen Aufbetonplatte mit Basalt-Textilbewehrung im Vergleich zur konventionellen Sanierungsmethode mit einer Stahlbeton (STB)-Aufbetonplatte zu analysieren, wurden im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich Stahlbeton und Massivbau der TU Wien experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Dazu wurden zwei Versuchskörper mit einer Länge von jeweils 4,7 m hergestellt. Die Versuche umfassten einen zerstörenden Belastungsversuch zur Untersuchung des Tragverhaltens sowie verschiedene Schwingungsversuche zur Analyse der dynamischen Eigenschaften der Verbunddecken. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Auswertung der Schwingungseigenschaften der Versuchskörper. Ergänzend dazu wurde ein Finite-Elemente (FE)-Modell erstellt und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Die Vermeidung unangenehmer Schwingungen, etwa durch Gehen oder das Herumtoben von Kindern, gewinnt aufgrund steigender Komfortansprüche der Nutzer zunehmend an Bedeutung und ist oft ein maßgebendes Bemessungskriterium [34]. Die Wahrnehmung von Schwingungen ist grundsätzlich subjektiv und hängt von mehreren Faktoren ab. Sie nimmt mit [34]:

- zunehmender Schwingungsdauer zu,
- der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingungsursache ab,
- zunehmender körperlicher Aktivität ab,
- zunehmender Gewöhnung an die Schwingungen ab.

Zur objektiven Beurteilung des Schwingungsverhaltens legt der Eurocode 5 (EC5) [23] Kriterien zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Decken fest (siehe Kapitel 2.3.2). Im Rahmen dieser Arbeit wird das Trag- und Schwingungsverhalten der Versuchskörper ermittelt und anschließend anhand der Gebrauchstauglichkeitsnachweise des EC5 [23] bewertet.

Das Langzeitverhalten wurde bei den experimentellen Untersuchungen, die Gegenstand dieser Arbeit sind, nicht betrachtet. Ebenso wurden keine äußeren Normalkräfte in die Versuchskörper eingeleitet, so dass keine Aussagen zur horizontalen Lastabtragung des gegenständlichen

Deckensystems getroffen werden können. Dies ist insbesondere für die Erdbebenbemessung von Bedeutung, bleibt aber außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

1.3 Aufbau

Die Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel:

- **Kapitel 2: Grundlagen**
In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zusammengefasst, die für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse notwendig sind. Es werden relevante baodynamische Themen zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens erläutert und die Grundlagen zu Verbundquerschnitten, der Basalt-Textilbewehrung und den normativen Anforderungen nach EC5 angeführt.
- **Kapitel 3: Experimentelle Untersuchung**
Es werden der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung und die Bestimmung der Materialparameter beschrieben.
- **Kapitel 4: Auswertung und Ergebnisse**
In diesem Kapitel werden die gesuchten Erkenntnisse, wie z.B. die erste Eigenfrequenz und das Lehr'sche Dämpfungsmaß aus den Versuchsdaten abgeleitet, das FE-Modell beschrieben und dessen Ergebnisse dokumentiert. Darauf aufbauend wird die Bauteillänge des FE-Modells auf typische Spannweiten von Dippelbaumdecken erweitert.
- **Kapitel 5: Interpretation der Ergebnisse**
Hier werden die Ergebnisse interpretiert und anhand der Vorgaben aus EC5 bewertet.
- **Kapitel 6: Schlussfolgerungen und Zusammenfassung**
Abschließend werden die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und deren Bedeutung in der Praxis erläutert.

Kapitel 2

Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird auf die benötigten Grundlagen zur Auswertung und Interpretation der Versuchsdaten eingegangen.

2.1 Baudynamik

Bei den experimentellen Versuchen wurden die Schwingungsantworten auf verschiedene Anregungen der Versuchskörper aufgezeichnet. Die baulynamischen Grundlagen zur Auswertung dieser Daten werden in diesem Kapitel erläutert.

Für diese Arbeit ist vor allem die freie, gedämpfte Schwingung relevant.

2.1.1 Konzepte der Modellbildung

Hooke'sches Modell (linear-elastisches Verhalten)

Das Hooke'sche Modell entspricht einer Feder mit linearer Kennlinie. Es besagt daher, dass der Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Last F und der Verformung x proportional ist:

$$F = k \cdot x. \quad (2.1)$$

Die Federkonstante k beschreibt die Steifigkeit der Feder und wird in der Einheit Kraft/Länge angegeben. Dieses Konzept kann auch auf Dehnungen ε und Spannungen σ übertragen werden:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2.2)$$

Der Proportionalitätsfaktor E ist der Elastizitätsmodul des Materials [29]. Materialien wie Holz und Beton verhalten sich bei geringer Belastung annähernd linear-elastisch.

Newton'sches Modell (viskose Dämpfung)

Bei der viskosen Dämpfung ist die Dämpfungskraft proportional zur Geschwindigkeit \dot{x} . Aufgrund dieser Proportionalität wird das Dämpfungsgesetz als linear bezeichnet. Die Dämpfungskonstante c ist wie die Federkonstante beim Hooke'schen Gesetz ein Stoffwert und konstant:

$$F = c \cdot \dot{x}. \quad (2.3)$$

Mithilfe des Reibungsgesetzes Newton'scher Fluide kann die Beziehung zwischen Spannungen σ und Dehnungen ε für das viskose Dämpfungsmodell folgendermaßen angegeben werden:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}. \quad (2.4)$$

Je höher die dynamische Viskosität η ist, desto steifer ist das Modell. Bei $\eta = \infty$ ist der Dämpfer starr, es findet keine Bewegung im Dämpfer statt [29].

Voigt-Kelvin Modell

Das Voigt-Kelvin Modell ist ein Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens. Dabei werden ein Federelement und ein Dämpferelement parallel geschaltet. Wird auf dieses Modell eine Last aufgebracht, so wird diese zum Zeitpunkt $t = 0$ vollständig vom Dämpferelement aufgenommen. Aufgrund der viskosen Dehnungsentwicklung findet eine Spannungumlagerung vom Dämpferelement auf das Federelement statt. Somit stellt sich zeitverzögert die Dehnung nach dem Hooke'schen Gesetz ein [29].

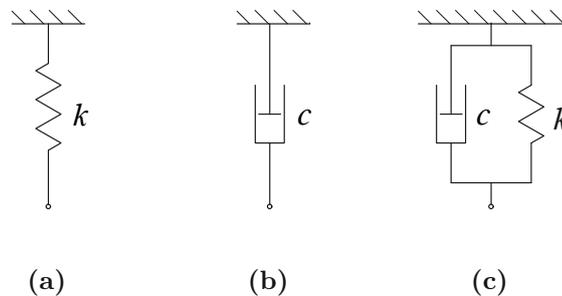


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des (a) Hooke'schen, (b) Newton'schen und (c) Voigt-Kelvin Modells

Im Folgenden wird das dynamische Verhalten viskoelastischer Systeme näher betrachtet.

2.1.2 Der lineare Einmassenschwinger

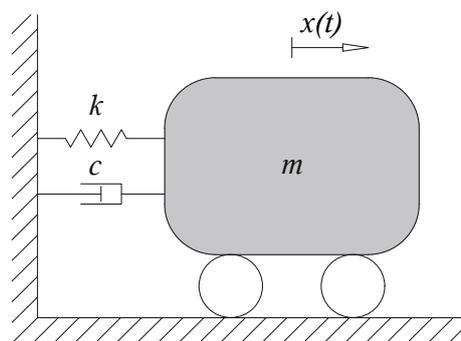


Abb. 2.2: Gedämpfter Einmassenschwinger mit Freiheitsgrad $x(t)$

Das einfachste mechanische Modell zur Beschreibung von Schwingungen ist der lineare Einmassenschwinger. Er besteht aus einer Masse m und einer Feder mit der Federsteifigkeit k [34]. Für die

hier relevante gedämpfte Schwingung wird der Einmassenschwinger zusätzlich mit einem Dämpfer mit einer Dämpferkonstante c versehen (siehe Abbildung 2.2). Die Dämpfung in Bauwerken ist im Allgemeinen auf Reibungsdämpfung (Coloumb) zurückzuführen. Wegen der einfacheren Handhabung und der ausreichenden Genauigkeit wird jedoch der viskose Dämpfer (Voigt-Kelvin) mit der Dämpferkonstanten c modelliert [30].

Im Gegensatz zur statischen Berechnung ist beim dynamischen Fall die Reaktion des Systems von der Zeit abhängig. Zusätzlich müssen zu den statischen Kräften auch die d'Alembert'schen Trägheitskräfte berücksichtigt werden. Über das kinetische Kräftegleichgewicht lässt sich die Bewegungsgleichung des gedämpften Einmassenschwinger bei freier Schwingung wie folgt anschreiben [34]:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0. \quad (2.5)$$

Das System wird nur durch seine Anfangsbedingung angeregt und schwingt danach beim gedämpften System aus, bis es wieder in der Gleichgewichtslage zum Stillstand kommt [19].

Mit den Definitionen der Eigenkreisfrequenz ω_0 und des Lehrschen Dämpfungsmaßes ζ (vgl. Kapitel 2.1.7):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2.6)$$

kann die Differenzialgleichung umgeschrieben werden zu [30]:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = 0. \quad (2.7)$$

Mit Hilfe des Euleransatzes $x(t) = C \cdot e^{\lambda t}$ erhält man durch Einsetzen in Gleichung 2.7 und anschließendem Herausheben:

$$(\lambda^2 + 2\zeta\omega_0\lambda + \omega_0^2) \cdot C e^{\lambda t} = 0. \quad (2.8)$$

Um diese Bedingung zu erfüllen, muss mindestens eine der beiden Terme zu null werden. Durch die Annahme $C e^{\lambda t} \neq 0$ erhält man die charakteristische Gleichung:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_0\lambda + \omega_0^2 = 0. \quad (2.9)$$

Die Lösung der quadratischen Gleichung kann mit Hilfe der pq-Formel ermittelt werden:

$$\lambda_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \cdot \omega_0. \quad (2.10)$$

Im Bauwesen liegen typischerweise unterkritisch gedämpfte Systeme vor [34] (siehe Kapitel 2.1.7). Im folgenden wird daher nur die Lösung der homogenen Bewegungsgleichung des unterkritisch gedämpften Systems behandelt.

Aus der Bedingung, dass das Lehr'sche Dämpfungsmaß Werte zwischen $0 < \zeta < 1$ annimmt, folgt, dass die Diskriminante immer kleiner Null und damit die Wurzel komplex ist. Die Gleichung 2.10 kann umgeschrieben werden zu:

$$\lambda_{1,2} = (-\zeta \pm i \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}) \cdot \omega_0. \quad (2.11)$$

Durch die Einführung der gedämpften Eigenkreisfrequenz:

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.12)$$

kann die Lösung der Differentialgleichung der freien gedämpften Schwingung wie folgt angegeben werden:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot (C_1 \cdot e^{i\omega_D t} + C_2 \cdot e^{-i\omega_D t}). \quad (2.13)$$

Durch Umformen und Anwenden der Eulerschen Formeln $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$ und $e^{-i\varphi} = \cos \varphi - i \cdot \sin \varphi$ erhält man die reelle Lösungsfunktion:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot [A \cdot \cos(\omega_D t) + B \cdot \sin(\omega_D t)]. \quad (2.14)$$

Zur vollständigen Lösung der Differentialgleichung müssen die Auslenkung x_0 und die Geschwindigkeit \dot{x}_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ bekannt sein.

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot [x_0 \cdot \cos(\omega_D t) + \frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_0 x_0}{\omega_D} \cdot \sin(\omega_D t)] = a e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_D t - \varepsilon), \quad (2.15)$$

wobei die Amplitude a und der Phasenwinkel ε gegeben sind durch:

$$a = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_0 x_0}{\omega_D}\right)^2} \quad \varepsilon = \arctan \frac{B}{A} = \arctan \frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_0 x_0}{\omega_D x_0} \quad (2.16)$$

In Abbildung 2.3 ist die Lösung der Differentialgleichung (Gleichung 2.47) für einen ungedämpften Schwingung ($\zeta = 0$) und eine unterkritisch gedämpfte Schwingung ($0 < \zeta < 1$) dargestellt.

Die Schwingung des schwach gedämpften Systems ist nicht periodisch aber das Zeitintervall zwischen aufeinanderfolgender Nulldurchgänge ist konstant. Die Quasi-Periodendauer des gedämpften Systems berechnet sich unter Berücksichtigung der Gleichung 2.12 zu [13]:

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}}. \quad (2.17)$$

Für die im Bauwesen vorliegenden Dämpfungsmaße $\zeta \approx 0,5\% - 10\%$ macht sich der Unterschied zwischen der gedämpften und der ungedämpften Eigenkreisfrequenz, beziehungsweise der Schwingungsdauer kaum bemerkbar [34]. Für eine Dämpfung von 10% beträgt das Verhältnis zwischen $\omega_D/\omega = 99,5\%$. In Abbildung 2.4 ist das Verhältnis der ungedämpften Eigenkreisfrequenz zur gedämpften Eigenkreisfrequenz in Abhängigkeit des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ dargestellt. Die geringe Abweichung lässt sich auch in Abbildung 2.3 anhand der Darstellung der Lösung der gedämpften Schwingung (vgl. Gleichung 2.47) und der ungedämpften Schwingung feststellen. Der Unterschied zwischen den Nulldurchgängen und somit der Schwingdauer ist vernachlässigbar klein.

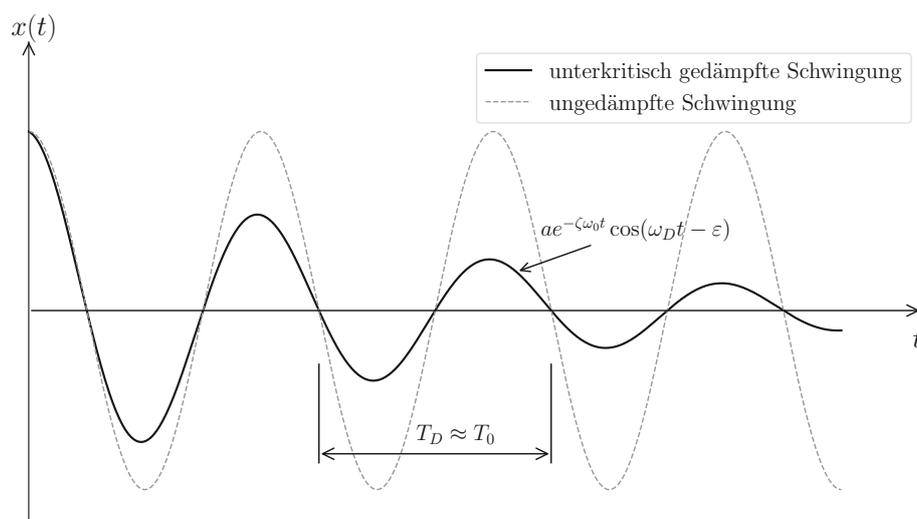


Abb. 2.3: Gegenüberstellung der gedämpften mit der ungedämpften Schwingung bei gleicher Amplitude a und Phasenwinkel ε

Deshalb wird in dieser Arbeit die Eigenkreisfrequenz ω_0 statt der gedämpften Eigenkreisfrequenz ω_D verwendet:

$$\omega_0 \approx \omega_D. \quad (2.18)$$

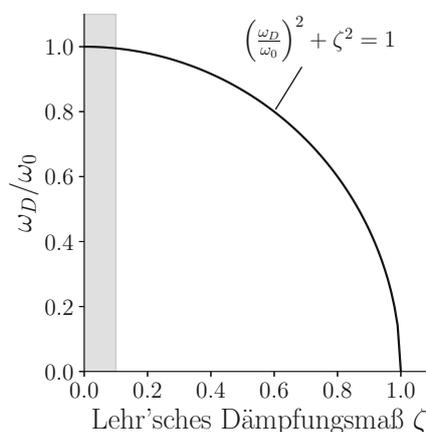


Abb. 2.4: Auswirkung der Dämpfung auf die Eigenkreisfrequenz nach [3]

2.1.3 Balkenschwingung

In dieser Arbeit wird die Biegeschwingung eines Einfeldträgers mit der Spannweite l und einer konstanten Biegesteifigkeit EI untersucht. Im Gegensatz zu einem Einmassenschwinger, bei dem die gesamte Masse in einem Punkt konzentriert ist, besitzt ein Balken eine kontinuierlich verteilte Massenbelegung μ . Dies bedeutet, dass die Verformung $w_n(x, t)$ nicht nur von der Zeit t , sondern

auch vom Ort x abhängt. Theoretisch besitzt die Balkenschwingung unendlich viele Freiheitsgrade und damit unendlich viele Eigenfrequenzen f_n mit den zugehörigen Eigenformen $w_n(x)$ [8].

Die Herleitung erfolgt unter Vernachlässigung der Schubnachgiebigkeit und der Dämpfung [8]. Die Differentialgleichung des Biegebalkens bei Nullsetzung der Einwirkung lautet:

$$EI \cdot w_n'''' + \mu \cdot \ddot{w}_n = 0. \quad (2.19)$$

Der Index n gibt dabei an um welche Eigenform es sich handelt. Die Differentialgleichung wird mithilfe eines Produktansatzes gelöst, wobei für die Zeitfunktion der Zeitverlauf des Einmassenschwingers gewählt wird [8].

$$w_n(x, t) = w_n(x) \cdot y_n(t) \quad (2.20)$$

$$\text{mit } y_n(t) = \cos(\omega_n \cdot t) \quad (2.21)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 2.20 und 2.21 in Gleichung 2.19 und kürzen des Cosinus-Terms ergibt sich schließlich die Differentialgleichung für $w_n(x)$:

$$EI \cdot w_n'''' + \mu \cdot \omega_n^2 \cdot w_n = 0 \quad (2.22)$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung 2.22 lautet [8]:

$$w_n(x) = A_1 \cdot \cosh \frac{\lambda_n}{l} \cdot x + A_2 \cdot \sinh \frac{\lambda_n}{l} \cdot x + A_3 \cdot \cos \frac{\lambda_n}{l} \cdot x + A_4 \cdot \sin \frac{\lambda_n}{l} \cdot x \quad (2.23)$$

$$\text{mit } \lambda_n^4 = \frac{\mu \cdot \omega_n^2}{EI} \cdot l^4. \quad (2.24)$$

Die Bestimmung der Konstanten erfolgt mit Hilfe der Randbedingungen des Einfeldträgers, dass die Auslenkung und das Moment an den Auflagern Null sind:

$$w(0) = w(l) = w''(0) = w''(l) = 0. \quad (2.25)$$

Daraus folgt für die Eigenfrequenz des Einfeldträgers unter Berücksichtigung der Beziehung $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$:

$$f_n = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (2.26)$$

2.1.4 Fourieranalyse

Die Fourieranalyse beschäftigt sich mit der Näherung einer periodischen Funktionen durch eine Summe harmonischer Funktionen. Mit Hilfe der Fourierreihe beziehungsweise der Fouriertransformation können Funktionen aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt werden. In der Baudynamik ist dies vor allem wichtig, um die Eigenfrequenzen einer Schwingung sichtbar zu machen [30].

2.1.4.1 Fourier-Reihe

Die allgemeine Form der Fourier-Reihe lautet:

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(n \cdot \omega \cdot t) + s_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)]. \quad (2.27)$$

Die Konstanten berechnen sich dabei zu:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (2.28)$$

$$c_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.29)$$

$$s_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) dt. \quad (2.30)$$

Durch die an eine Funktion angenäherte Reihe kann diese nun vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformieren werden. Die Frequenzen und die zugehörigen Amplituden berechnen sich aus der Fourierreihe zu:

$$a_n = \sqrt{c_n^2 + s_n^2}, \quad (2.31)$$

$$f_n = \frac{n \cdot \omega}{2\pi}. \quad (2.32)$$

Bei unendlich vielen Stützstellen kann anstelle der Summenreihe das Fourier-Integral zur Transformation eines Signals verwendet werden. Da die Summe der harmonischen Schwingungen nicht periodisch sein muss, können auch nichtperiodische Schwingungen dargestellt werden. Mit Hilfe der Theorie der Fourier-Reihe und des Fourier-Integrals kann nahezu jede Schwingung beschrieben werden [30].

2.1.4.2 Diskrete Fouriertransformation

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung erfolgt die Aufzeichnung der Antworten der Versuchskörper über Messdaten, die in Form endlich vieler Werte zu bestimmten diskreten Zeitpunkten gespeichert werden [5]. Dabei entsteht die diskreten Funktion $x(t)$, die innerhalb der Messzeit T , eine Anzahl von N Messwerte in gleichmäßigen Abständen Δt hat. Die Überleitung der diskreten Funktion aus dem Zeit- in den Frequenzbereich kann mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation vorgenommen werden.

Die Abtastfrequenz f_s und die Frequenzbandbreite Δf berechnen sich wie folgt:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{N}{T}, \quad (2.33)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N \Delta t}. \quad (2.34)$$

Die diskrete Funktion $x(t)$ wird periodisch fortgesetzt und in einer komplexen Fourierreihe entwickelt. Daraus werden wiederum die Frequenzen mit den dazugehörigen Amplituden ermittelt.

Die numerische Auswertung erfolgt mit dem Algorithmus der Fast Fourier Transformation (FFT) [5].

Dabei ist zu beachten, dass das Amplitudenspektrum eines abgetasteten Signals bezüglich der sogenannten Nyquistfrequenz symmetrisch ist. Die Nyquistfrequenz ist dabei die Hälfte der Abtastfrequenz f_s . Für die Auswertung des Spektrums sind daher nur die Frequenzen im Bereich $0 - f_s/2$ relevant, da die Werte oberhalb der Nyquistfrequenz redundant sind [5].

2.1.5 Übertragungsfunktion

Ist bei einer Schwingung die Antwortfunktion $x(t)$ und die Anregungsfunktion $f(t)$ bekannt, kann mit Hilfe der Fourier-Transformation die Übertragungsfunktion bestimmt werden. Die Übertragungsfunktion $H(f)$, auch als Vergrößerungsfunktion bezeichnet, beschreibt das Verhältnis der maximalen dynamischen zur statischen Auslenkung [19]. Das bedeutet, dass das System bei gleicher Anregung im statischen Fall mit einer Auslenkung x_{stat} reagiert, während die Auslenkung im dynamischen Fall $x(f)$ sich wie folgt berechnet:

$$x(f) = x_{\text{stat}} \cdot H(f). \quad (2.35)$$

Dabei kann die Übertragungsfunktion $H(f)$ aus der fouriertransformierten Antwort $X(f)$ und der fouriertransformierten Anregung $F(f)$ berechnet werden:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)}. \quad (2.36)$$

Die Übertragungsfunktion kann auch aus der Differentialgleichung für den linearen Einmassenschwinger mit harmonischer Anregung hergeleitet werden. Sie ist dabei abhängig vom Lehr'schen Dämpfungsmaß ζ sowie dem Frequenzverhältnis η , welches das Verhältnis der Erregerfrequenz zur Eigenfrequenz beschreibt [8]:

$$H(\eta) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \eta)^2}}. \quad (2.37)$$

Bei der Betrachtung der Gleichung 2.37 fällt auf, dass die Übertragungsfunktion für $\eta \rightarrow 1$ und $\zeta \ll 1$ stark ansteigt [8]. In baupraktischen Anwendungen, in denen typischerweise geringe Dämpfungen vorliegen, ist daher mit einem deutlichen Anstieg der Übertragungsfunktion bei Resonanz $\eta = 1$ zu rechnen. Der Zusammenhang zwischen der Übertragungsfunktion, dem Frequenzverhältnis und dem Dämpfungsmaß wird in Abbildung 2.5 veranschaulicht.

2.1.6 Stoßbelastung

Erfolgt die Anregung eines Systems über eine Einheitsstoßbelastung:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.38)$$

so ergibt sich die fouriertransformierte Anregungsfunktion $F(f) = 1$. Für eine beliebige impulsartige Erregung $f(t)$ ergibt sich [29]:

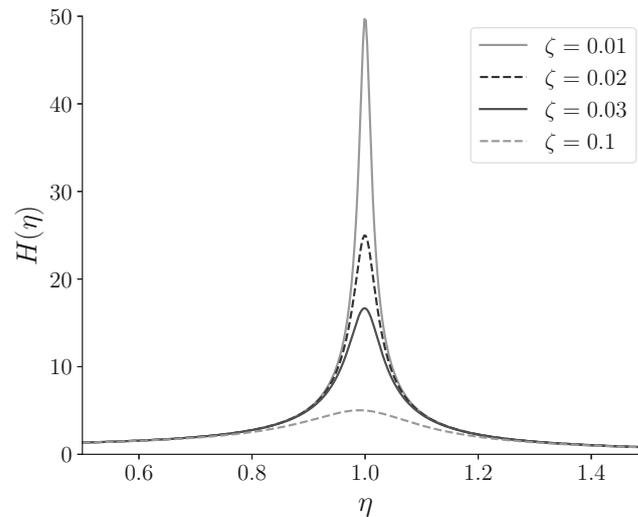


Abb. 2.5: Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von η und ζ nach [8]

$$F(f) = \text{konst.} \quad (2.39)$$

Aus Gleichung 2.39 ist ersichtlich, dass bei einer impulsartigen Anregung der Körper in allen Frequenzen mit einer konstanten Amplitude angeregt wird. Betrachtet man davon die Übertragungsfunktion wird klar, dass die Ausschläge dieser Funktion immer an Stellen der Eigenfrequenzen auftreten. Dies gilt auch für die fouriertransformierte Antwort eines Systems $X(f)$. Aufgrund dieser Beziehungen wird die Antwort $X(f)$ auch als Resonanzkurve bezeichnet [8].

2.1.7 Dämpfung

In realen Systemen nimmt die Schwingungsamplitude mit der Zeit oft ab. Dieses Phänomen wird als Dämpfung bezeichnet. Der zugrundeliegende Mechanismus liegt laut [13] in den vorhandenen Bewegungswiderständen. Bei der Dämpfung wird Bewegungsenergie in andere Energieformen umgewandelt, es findet eine Energiedissipation statt. Die Dämpfung kann nach [8] in innere und äußere Dämpfung unterteilt werden (siehe Abbildung 2.6).

Die Baustoffdämpfung, auch Materialdämpfung oder Werkstoffdämpfung genannt, ist die innere Dämpfung des Materials und hängt vom verwendeten Baustoff ab [13]. Die Bauteildämpfung oder Systemdämpfung entsteht durch Reibung in Lagern, Stößen und Fugen, Gleiten an Verbindungsstellen oder durch Pumpwirkung bei vorhandenen Hohlräumen. Die Baugrunderdämpfung setzt sich aus den im Boden auftretenden Verzerrungen und der Energieabstrahlung in den unendlichen Halbraum zusammen. Die äußere Dämpfung hängt von der Bewegung im umgebenden Medium, wie Luft oder Wasser, ab [8].

2.1.7.1 Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ gibt das Verhältnis der vorhandenen Dämpfung c zur kritischen Dämpfung c_{cr} an und ist somit dimensionslos [19]:

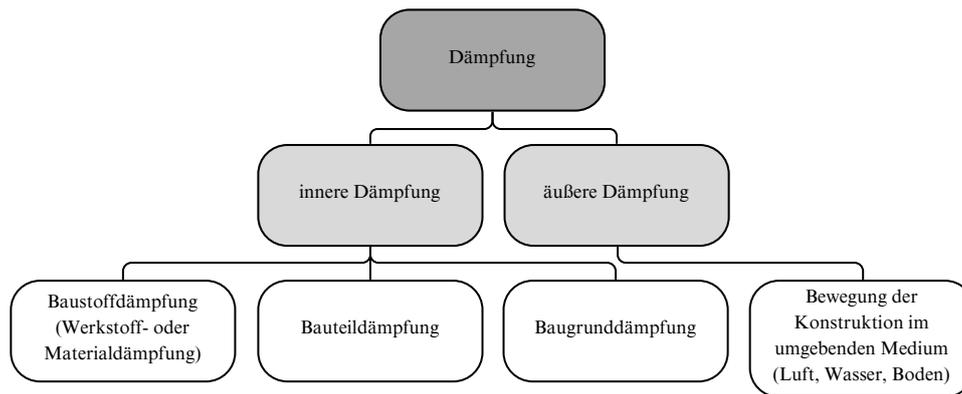


Abb. 2.6: Einteilung in innere- und äußere Dämpfung nach [8]

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{c_{cr}}. \quad (2.40)$$

Die kritische Dämpfung ist dabei definiert als jene Dämpfung, bei der die Lösungen der Differentialgleichung 2.10 zusammenfallen: $\lambda_1 = \lambda_2$. Man spricht hier vom aperiodischen Grenzfall [13].

Grundsätzlich kann die Lösung der Differentialgleichung 2.7 anhand des Lehr'schen Dämpfungsmaßes in vier Bereiche eingeteilt werden [30]:

- ungedämpftes System $\zeta = 0$,
- unterkritisch gedämpftes System $0 < \zeta < 1$,
- kritisch gedämpftes System $\zeta = 1$,
- überkritisch gedämpftes System $\zeta > 1$.

In den ersten beiden Fällen $\zeta < 1$ schwingt das System um seine Gleichgewichtslage, wobei beim ungedämpften System die Amplitude konstant bleibt, während beim unterkritisch gedämpften System die Amplitude kontinuierlich abnimmt [3]. Im Fall des kritisch gedämpften Systems geht das System höchstens einmal über die Gleichgewichtslage hinaus und kehrt dann wieder in die Gleichgewichtslage zurück. Das überkritische System verhält sich ähnlich wie das kritisch gedämpfte System, wobei die sogenannte aperiodische Bewegung langsamer abläuft. Das System kriecht in die Gleichgewichtslage zurück [13].

Tragwerke im Bauwesen wie Gebäude, Brücken, Offshore-Konstruktionen usw. fallen in die Kategorie der unterkritisch gedämpften Systeme mit typischen Dämpfungsmaßen unter 10%. Systeme mit Dämpfungen $c \geq c_{cr}$ sind z.B. Türschließer oder Messgeräte für stationäre Werte wie Waagen zur Messung des Eigengewichts [3].

Um ein Gefühl für die zu erwartenden Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes zu bekommen, wurden in der Tabelle 2.1 typische Werte aus Normen für Holz- und Betonkonstruktionen zusammengestellt.

2.1.7.2 Methoden zur Ermittlung der Dämpfung

Die Dämpfung kann nach [8] mit direkten oder indirekten Methoden bestimmt werden. Die Autorin führt weiter aus, dass die direkten Methoden an isolierten Prüfkörpern zur Bestimmung

Tab. 2.1: Typische Werte für das Lehr'sche Dämpfungsmaß

Werkstoff und Struktur	ζ	Quelle
Deckenkonstruktionen aus Holz	1,0 - 4,0%	EC5 [23]
Beton- und Stahlbetonkonstruktionen		
- Zustand I (auch Spannbeton)	0,6%	DIN 1055, T.4 [4]
- überwiegend Zustand II	1,6%	
Holzkonstruktionen	2,4%	DIN 1055, T.4 [4]

der Materialdämpfung und, falls vorhanden, der Dämpfung der Verbindungsmittel verwendet werden. Die indirekten Methoden werden für die Bestimmung der Dämpfung von Bauwerken angewendet. Dabei wird die Summe der einzelnen Dämpfungskomponenten an einem Bauwerk bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei indirekte Methoden im Zeitbereich und eine indirekte Methode im Frequenzbereich zur Bestimmung der Dämpfung aus dem Ausschwingversuch vorgestellt und bei der Auswertung der Messdaten angewendet.

Ausschwingversuch

Beim Ausschwingversuch wird das Bauwerk entweder:

- durch ein gezieltes Aufschaukeln oder
- durch eine transiente Anregung, wie z.B. einen Sprung oder Schlag, in Schwingung versetzt [8].

Nach der Anregung schwingt die Struktur wieder in die Gleichgewichtslage zurück [8]. Obwohl bei der transienten Anregung durch die einmalige Auslenkung eine von der Schwingungseigenform abweichende Störung zu Beginn der Schwingung auftreten kann [29], wird diese Variante wegen der einfacheren Durchführung in der experimentellen Untersuchung verwendet. Das Ausschwingverhalten wird dabei über Beschleunigungssensoren (siehe Kapitel 3.2) aufgezeichnet und anschließend analysiert.

Logarithmisches Dekrement Λ

Das Abklingverhalten einer gedämpften Schwingung kann über das sogenannte logarithmische Dekrement Λ untersucht werden. Dabei wird die Abnahme der Auslenkung im Zeitintervall T_D (siehe Gleichung 2.17) betrachtet [13]. Es handelt sich um eine Methode im Zeitbereich.

Die Auslenkung zu einem beliebigen Zeitpunkt t beträgt nach Gleichung 2.47:

$$x(t) = ae^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_D t - \varepsilon), \quad (2.41)$$

und nach n vollen Schwingung, zum Zeitpunkt $t + n \cdot T_D$:

$$x(t + n \cdot T_D) = ae^{-\zeta\omega_0(t+n \cdot T_D)} \cos[\omega_D(t + n \cdot T_D) - \varepsilon]. \quad (2.42)$$

Setzt man nun teilweise für $T_D = \frac{2\pi}{\omega_D}$ ein (vgl. Gleichungen 2.12 und 2.17), so erhält man unter Berücksichtigung der Eigenschaft trigonometrischer Funktionen $\cos(a + n \cdot 2\pi) = \cos(a)$ und der Rechenregel für Exponentialfunktionen $e^{a+b} = e^a e^b$:

$$x(t + n \cdot T_D) = e^{-\zeta\omega_0 \cdot n \cdot T_D} \underbrace{ae^{-\zeta\omega_0 t} \cos[\omega_D t + n \cdot 2\pi - \varepsilon]}_{x(t)} = e^{-\zeta\omega_0 \cdot n \cdot T_D} \cdot x(t). \quad (2.43)$$

Bildet man nun das Verhältnis der beiden Zeitpunkte ergibt sich:

$$\frac{x(t)}{x(t + n \cdot T_D)} = e^{\zeta\omega_0 \cdot n \cdot T_D}. \quad (2.44)$$

Durch Anwendung des natürlichen Logarithmus auf Gleichung 2.44 wird das logarithmische Dekrement Λ definiert als [13]:

$$\ln \frac{x(t)}{x(t + n \cdot T_D)} = \zeta\omega_0 \cdot n \cdot T_D = \Lambda. \quad (2.45)$$

Unter der Annahme einer schwach gedämpften Schwingung ($\zeta \ll 1$) kann die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_0 gleich der gedämpften Eigenkreisfrequenz ω_D gesetzt werden (siehe Erläuterung zu Gleichung 2.18). Setzt man nun die Gleichung 2.17 unter Berücksichtigung der Gleichung 2.18 in die Gleichung 2.45 ein und löst nach dem Lehr'schen Dämpfungsmaß auf, so ergibt sich [19]:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \underbrace{\ln \frac{x(t)}{x(t + n \cdot T_D)}}_{\text{log. Dekrement } \Lambda} \quad \text{bzw.} \quad \zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \underbrace{\ln \frac{\ddot{x}(t)}{\ddot{x}(t + n \cdot T_D)}}_{\text{log. Dekrement } \Lambda}. \quad (2.46)$$

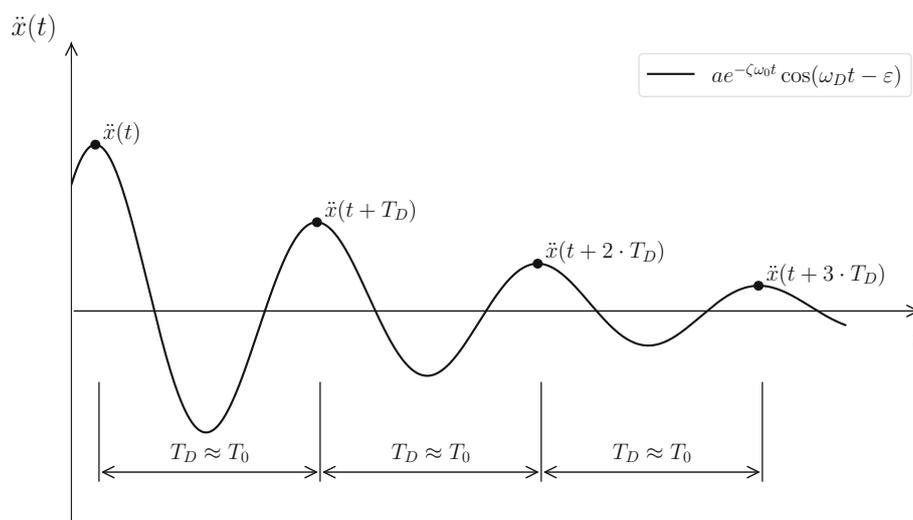


Abb. 2.7: Extremwerte einer gedämpften Schwingung

Abbildung 2.7 zeigt, dass die Extremwerte der Abklingkurve in regelmäßigen Abständen von T_D auftreten [13]. Die lokalen Maxima können aus den Messdaten extrahiert werden und erlauben in Kombination mit Gleichung 2.46 die Bestimmung des Lehr'schen Dämpfungsmaßes aus den Aufzeichnungen der experimentellen Untersuchung.

Umhüllende Exponentialfunktion

Betrachtet man die Lösung der Differentialgleichung für unterkritisch gedämpfte Systeme, so erkennt man, dass die Gleichung 2.47 aus zwei Teilen besteht, einem streng monoton fallenden und einem periodisch/stationären [19]:

$$x(t) = \underbrace{ae^{-\zeta\omega_0 t}}_{\text{monoton fallend}} \cdot \underbrace{\cos(\omega_D t - \varepsilon)}_{\text{periodisch/stationär}} . \quad (2.47)$$

Daraus lässt sich die umhüllende Exponentialfunktion der unterkritisch gedämpften Schwingung ablesen [3].

$$\text{Umhüllende} = a \cdot e^{-\zeta\omega_0 t} = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_0 x_0}{\omega_D}\right)^2} \cdot e^{-\zeta\omega_0 t} \quad (2.48)$$

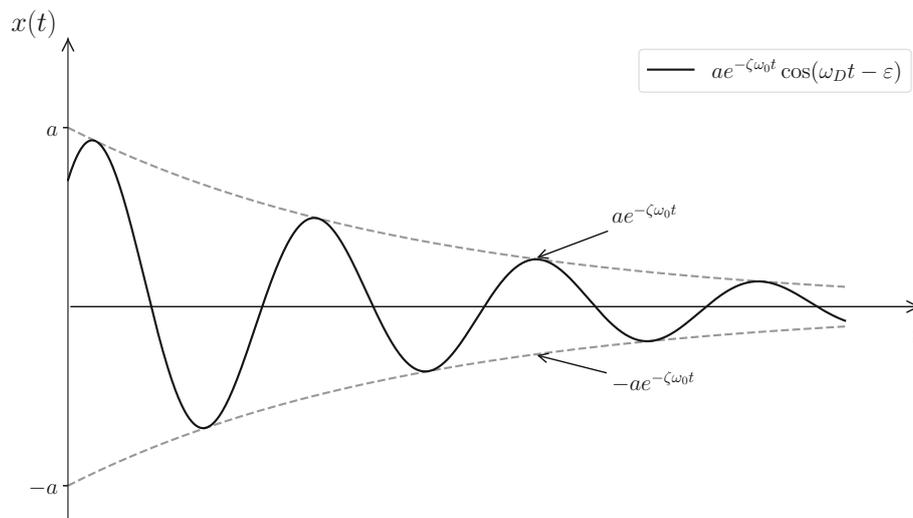


Abb. 2.8: Gedämpfte Schwingung mit der umhüllenden Exponentialfunktion

Die umhüllende Exponentialfunktion ist abhängig von der Zeit, den Anfangsbedingungen, der Eigenkreisfrequenz und dem Lehr'schen Dämpfungsmaß (vgl. Gleichung 2.48). Setzt man die Eigenkreisfrequenz und die Zeit als bekannte Größen voraus und betrachtet Gleichung 2.48 und Abbildung 2.8, so erkennt man, dass die Annäherung an den Abklingvorgang durch die Exponentialfunktion über die Variation der Amplitude a und des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ erfolgt [19]. Bei der Auswertung werden diese beiden Parameter so lange variiert, bis eine zufriedenstellende Approximation erreicht ist.

Bandbreitenmethode

Die Bandbreitenmethode ist eine indirekte Methode im Frequenzbereich. Dabei wird die Dämpfung aus der Übertragungsfunktion oder der Resonanzkurve (vgl. Kapitel 2.1.6) mit der so genannten Halbwertsbreite bestimmt [8].

Die Ermittlung der Dämpfung erfolgt dabei über ein Frequenzverhältnis. Die dafür benötigten Frequenzen f_1 und f_2 liegen dabei so, dass sich dazwischen eine Eigenfrequenz f_i befindet. Die Werte der Übertragungsfunktion $H(f_{1/2})$ berechnen sich dabei nach Gleichung 2.37 zu:

$$H(f_{1/2}) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta_{1/2}^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \eta_{1/2})^2}} = \frac{H(f_i)}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\zeta \cdot \sqrt{2}} \quad (2.49)$$

$$\text{mit } H(f_i) = \frac{1}{2\zeta} \quad (2.50)$$

Unter Berücksichtigung kleiner Werte für das Dämpfungsmaß ζ kann Gleichung 2.49 vereinfacht und schließlich nach der Dämpfung ζ aufgelöst werden [8]:

$$\zeta \approx \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (2.51)$$

2.2 Material und Querschnitt

Dieses Kapitel vermittelt grundlegende Theorien zu Verbundquerschnitten und gibt die wichtigsten Eigenschaften von Basalt-Textilbewehrung wieder.

2.2.1 Verbundquerschnitt

Diese Arbeit befasst sich mit einer HBV-Konstruktion, deren Querschnitt aus einem Holzträger in der Zugzone und einer Betonplatte in der Druckzone besteht. Der Verbund zwischen diesen beiden Werkstoffen wird durch metallische Verbindungselemente hergestellt.

Zur Veranschaulichung des Tragverhaltens einer Verbundkonstruktion werden in Abbildung 2.9 zwei Extremfälle dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Spannungsverteilung im Querschnitt und in weiterer Folge das Trag- und Verformungsverhalten maßgeblich vom Verbund zwischen den beiden Querschnittsteilen abhängt [10].

Wird in der Fuge zwischen den Teilquerschnitten kein Verbund angenommen und die Reibung zwischen den Materialien vernachlässigt, können sich die Querschnittsteile frei gegeneinander verschieben, so dass sich für die Schubspannung in der Verbundfuge $\tau_{\text{Fuge}} = 0$ ergibt. Die Querschnittsteile verhalten sich dann wie einzelne Biegeträger mit unabhängigen Schnittgrößen. Die Verteilung der Kräfte entspricht aufgrund der Verformungskompatibilität näherungsweise dem Verhältnis der Biegesteifigkeiten der Einzelquerschnitte. Die Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts $EI_{\text{ohneV.}}$ ergibt sich aus der Summe der Biegesteifigkeiten der Einzelquerschnitte, die über den Elastizitätsmodul E und das Trägheitsmoment I berechnet werden [11]:

$$EI_{\text{ohneV.}} = E_c I_c + E_t I_t, \quad (2.52)$$

$$\text{mit } I = \frac{b \cdot h^3}{12}. \quad (2.53)$$

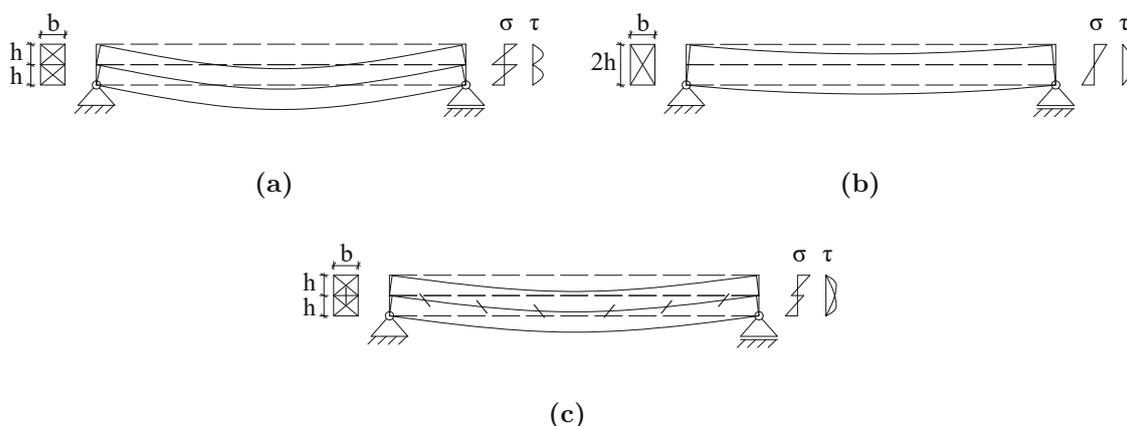


Abb. 2.9: Tragverhalten eines Verbundträgers mit (a) keinem Verbund, (b) starrem Verbund und (c) nachgiebigem Verbund

Index c steht dabei für Beton und Index t für Holz.

Bei starrem Verbund zwischen den Teilquerschnitten treten in der Verbundfuge keine Relativverschiebungen auf. Die Teilquerschnitte verhalten sich wie ein gemeinsamer Querschnitt. Aufgrund dieser schubsteifen Verbindung könne die Steiner-Anteile des Trägheitsmomentes aktiviert werden. Die Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts EI_{starrerV} ergibt sich, mit z als Abstand des Schwerpunkts des Gesamtquerschnitts zu den Teilflächenschwerpunkten, zu [11]:

$$EI_{\text{starrerV}} = E_c I_c + E_t I_t + E_c A_c \cdot z_c^2 + E_t A_t \cdot z_t^2. \quad (2.54)$$

In der Praxis sind diese beiden Fälle jedoch eher die Ausnahme, da die meisten Verbindungsmittel nachgiebig sind und somit eine gewisse Relativverschiebung zwischen den Teilquerschnitten zulassen [11]. Die Größe dieser Verschiebung hängt von der Verbundsteifigkeit der Fuge ab, welche in 2.2.1.2 dieser Arbeit erläutert wird.

2.2.1.1 Effektive Biegesteifigkeit

Die effektive Biegesteifigkeit bei nachgiebigem Verbund zwischen den Teilquerschnitten ist, wie bereits erwähnt, von der Verbundsteifigkeit in der Fuge abhängig. Sie liegt zwischen den beiden Extremfällen starrer Verbund und kein Verbund [11].

Die effektive Biegesteifigkeit kann unter der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens aus dem Last-Verformungs-Verhalten eines Verbundquerschnitts bestimmt werden. Für einen auf zwei Stützen gelagerten Träger mit der Stützweite l und der Durchbiegung w zufolge einer Einzellast F an der Stelle $x = l/2$ ergibt sich die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} nach [15] zu:

$$EI_{\text{eff}} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot w} \quad (2.55)$$

und für eine Gleichlast q :

$$EI_{\text{eff}} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot w}. \quad (2.56)$$

Der Grad der erreichten Verbundwirkung DCA (Degree of Composite Action) kann schließlich durch Berechnung der Biegesteifigkeit ohne Verbund und mit starrem Verbund und Auswertung der effektiven Biegesteifigkeit aus den Messdaten berechnet werden [31]:

$$DCA = \frac{EI_{\text{eff}} - EI_{\text{ohneV.}}}{EI_{\text{starrerV.}} - EI_{\text{ohneV.}}} \quad (2.57)$$

Bei starrem Verbund ist $DCA = 1$, ohne Verbund ist der Wert 0.

2.2.1.2 Verbundsteifigkeit

Die Verbundsteifigkeit drückt den Widerstand der Fuge gegenüber Schubkräften aus. Sie kann durch den Verschiebungsmodul beschrieben werden, der das Verhältnis zwischen einer einwirkenden Kraft und der zugehörigen elastischen Verschiebung beschreibt. Aufgrund des typischerweise nichtlinearen Verlaufs der Last-Verschiebungskurve wird für den Gebrauchslastfall der Anfangsverschiebungsmodul K_{ser} herangezogen. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit wird hingegen gemäß EC5 [23] der reduzierte Verschiebungsmodul $K_u = \frac{2}{3}K_{\text{ser}}$ verwendet.

Der Verbund zwischen dem Teilquerschnitten des Versuchkörpers dieser Arbeit wird mit Assy plus VG-Schrauben [1] hergestellt. Der Verschiebungsmodul $K_{\text{ser},i}$ ist laut Zulassung [6] für eine Schraube mit Durchmesser $d = 8$ mm und einer Ausrichtung von 45° :

$$K_{\text{ser},i} = 100 \cdot l_{\text{eff}}. \quad (2.58)$$

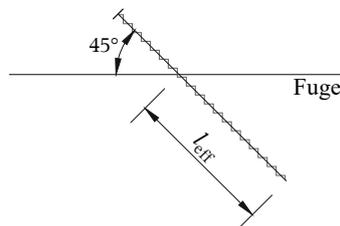


Abb. 2.10: Ausrichtung und Einbindetiefe einer Schraube

Die effektive Länge l_{eff} ist dabei die Einbindetiefe der Schrauben im Holzelement in mm [6] (vgl. Abbildung 2.10). Mit der Anzahl n der Verbindungsmittel kann schlussendlich der Verschiebungsmodul der Verbundfuge berechnet werden:

$$K_{\text{ser}} = K_{\text{ser},i} \cdot n. \quad (2.59)$$

2.2.2 Basalt-Textilbewehrung

Die in dieser Untersuchung verwendete Textilbewehrung besteht aus Basalt, einem vulkanischen Gestein. Für die Herstellung der Basaltfasern, die später zur Bewehrung weiterverarbeitet werden, wird Basalt mit einem Silikatanteil von mindestens 49% verwendet. Der hohe Silikatanteil gewährleistet ein vollständiges und rückstandsfreies Aufschmelzen des Gesteins, eine für die Faserbildung geeignete Viskosität sowie eine homogene amorphe Phase ohne kristalline Bereiche nach dem Erstarren [18].

Bei der Herstellung wird das Gestein im ersten Schritt bei ca. 1450°C eingeschmolzen [18]. Aus der Schmelze entstehen anschließend Endlosfasern, sogenannte Filamente, die zu Garnen weiterverarbeitet werden. Ein Garn besteht dabei aus mehreren Hundert bis Tausenden Filamenten. Während der textilen Weiterverarbeitung werden die Garne in eine Matrix eingebettet, die sowohl die Zusammenwirkung der Fasern als auch den Verbund mit dem Beton gewährleistet. Schließlich werden daraus Textilbewehrungen gefertigt, deren Geometrien, Garnstärken und Abstände flexibel anpassbar sind [32].

Basaltbewehrung bietet gegenüber konventioneller Stahlbewehrung zahlreiche Vorteile, wie z.B. eine hohe Korrosionsbeständigkeit, geringes Eigengewicht, Flexibilität für Freiformgeometrien sowie ein feineres Rissbild [32]. Gleichzeitig weisen Basalttextilien eine hohe Zugfestigkeit auf, die im Vergleich zur Stahlbewehrung etwa dreimal so hoch ist (vgl. Tabelle 3.5).

Durch die Korrosionsbeständigkeit ist für die Basalt-Textilbewehrung eine geringere Betondeckung im Vergleich zu einer Stahlbewehrung möglich [32]. Bei der Stahlbewehrung hängt die erforderliche Betondeckung vom Verbund- und Dauerhaftigkeitskriterium ab. Das Verbundkriterium hängt hauptsächlich vom Stabdurchmesser der Bewehrung ab, während die Dauerhaftigkeit von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Nach [21] ergeben sich für Deckensanierungen Mindestbetondeckungen von ca. 2 - 3 cm, was eine Mindestdicke der Betonplatte von ca. 5 - 7 cm erfordert. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit der Basaltbewehrung sind jedoch deutlich geringere Betondeckungen ausreichend, so dass die Plattenstärke auf nur 3 cm reduziert werden kann.

Zudem vereinfacht das geringere Gewicht der Basaltbewehrung die Logistik auf der Baustelle. Da sich Dippelbaumdecken meist im Dachgeschoss befinden, ist durch das reduzierte Gewicht der Transport auf der Baustelle hin zum Einbauort (z.B. durch ein Treppenhaus) leichter zu bewältigen.

2.3 Normative Grundlagen

Im Nachfolgendem Kapitel wird auf die normativen Grundlagen der Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach EC5 [23] eingegangen.

2.3.1 Grenzwert der Durchbiegung

Die Grenzwerte für die Durchbiegungen von Biegestäben für Holzdecken mit einer Spannweite l sind in EC5 [23] definiert. Die Begrenzung der elastischen Anfangsdurchbiegung w_{inst} dient dabei zur Vermeidung von nicht umkehrbaren Auswirkungen am Tragwerk. Der Grenzwert von w_{inst} für die charakteristische Einwirkungskombination berechnet sich zu:

$$w_{\text{inst}} \leq l/300. \quad (2.60)$$

Für die charakteristische Einwirkungskombination wird die Summe aus Eigengewicht und anzusetzenden Nutzlasten berechnet, wobei der Teilsicherheitsbeiwert mit 1,0 angenommen wird. Die Nutzlasten liegen nach [22] für Decken in Wohn- und Bürogebäuden zwischen 1,5 und 3 kN/m².

2.3.2 Schwingungsnachweise

Schwingungsnachweise an Decken sind notwendig, um das Wohlbefinden des Menschen zu gewährleisten. Wesentliche Einflussfaktoren auf das menschliche Empfinden sind:

- die Amplitude einer Schwingung
- die Frequenz sowie
- die Dauer der Schwingung, die durch die Dämpfung beeinflusst wird [9].

Die Anregung von Decken erfolgt hauptsächlich durch die Bewegung des Menschen, wie z.B. Gehen oder Laufen. Die Frequenz der daraus resultierenden personeninduzierten Schwingungen liegt bei ca. 1,5 - 7,5 Hz [9].

Die Eigenfrequenz einer Decke steht im direkten Zusammenhang mit der absoluten Durchbiegung unter Eigenlast $w(G_k)$ [9]. Dies wird deutlich, wenn man die Gleichungen 2.26 und 2.56 gleichsetzt und nach der Eigenfrequenz f_e für einen Einfeldträger auflöst:

$$f_e = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot w(G_k)}}. \quad (2.61)$$

Gewohnte Gebrauchstauglichkeitsnachweise, wie die Grenzwerte für die Durchbiegungen von Biegestäben, lassen mit zunehmender Spannweite höhere absolute Durchbiegungen zu. Aus Gleichung 2.61 wird ersichtlich, dass mit zunehmender Durchbiegung die Eigenfrequenz abnimmt, wodurch die dynamischen Eigenschaften einer Decke verschlechtert werden [9].

Um den Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit aufgrund von personeninduzierten Schwingungen gerecht zu werden, wurden im EC5 das Frequenz- und das Steifigkeitskriterium definiert. Die Grenzwerte sind dabei abhängig von der Deckenklasse [23].

Deckenklasse I: Decken zwischen Nutzungseinheiten, Wohnungstrenndecken, Decken in Büros und Fluren mit kurzen Spannweiten

Deckenklasse II: Decken innerhalb einer Nutzungseinheit, Decken in Einfamilienhäusern

Deckenklasse III: Decken unter nicht zu Wohnzwecken genutzten Räumen oder unter nicht ausgebauten Dachräumen, Decken ohne Schwingungsanforderungen

Für Deckenklasse III sind keine Grenzwerte definiert.

2.3.2.1 Frequenzkriterium

Das Frequenzkriterium regelt den unteren Grenzwert der ersten Eigenfrequenz f_0 der Decke. Dabei soll diese so hoch sein, dass Resonanz aus Gehen vermieden wird [9]. Die Eigenfrequenz darf näherungsweise nach Gleichung 2.26 berechnet werden. Der Nachweis gilt nach EC5 [23] als erfüllt, wenn gilt:

$$f_0 \geq 8 \text{ Hz} \quad \text{Deckenklasse I} \quad (2.62)$$

$$f_0 \geq 6 \text{ Hz} \quad \text{Deckenklasse II} \quad (2.63)$$

2.3.2.2 Steifigkeitskriterium

Das Steifigkeitskriterium ist erfüllt, wenn die größte vertikale Anfangsdurchbiegung w_{stat} infolge einer vertikal angreifenden Einzellast $F = 1 \text{ kN}$ an der ungünstigsten Stelle unter Berücksichtigung der mitwirkenden Breite einen definierten Grenzwert nicht überschreitet [23].

Die mitwirkende Breite b_F kann näherungsweise nach Gleichung 2.64 berechnet werden [23]. Die Biegesteifigkeit in Deckenspannrichtung wird mit dem Index l gekennzeichnet, während der Index b die Biegesteifigkeit rechtwinklig zur Deckenspannrichtung beschreibt.

$$b_F = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \\ \text{Deckenbreite } b \end{array} \right. \quad (2.64)$$

Der Nachweis gilt nach EC5 [23] als erfüllt, wenn gilt:

$$w_{\text{stat}} \leq 0,25 \text{ mm} \quad \text{Deckenklasse I} \quad (2.65)$$

$$w_{\text{stat}} \leq 0,50 \text{ mm} \quad \text{Deckenklasse II} \quad (2.66)$$

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung der Dippelbaumdeckensanierung mit Textilbeton (TXB)-Aufbetonschicht wurde ein Versuchskörper mit einer Länge von 4,7 m hergestellt. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit dieser Methode wurde zusätzlich eine zweite Verbunddecke mit einer Aufbetonschicht aus konventionellem Stahlbeton angefertigt. Beide Versuchskörper wurden im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien gefertigt und anschließend zerstörungsfreien Schwingungsversuchen und einer zerstörenden Belastungsprüfung unterzogen.

Das Versuchskonzept wurde von Dipl.-Ing. Simon Leitner BSc (SL) entworfen. Die Herstellung und die Durchführung der Experimente erfolgte durch SL, Dipl.-Ing. Patrick Leitner BSc sowie der Verfasserin dieser Arbeit. Die Vorbereitung und Durchführung der Versuche erstreckten sich über die Monate Juli und August 2024.

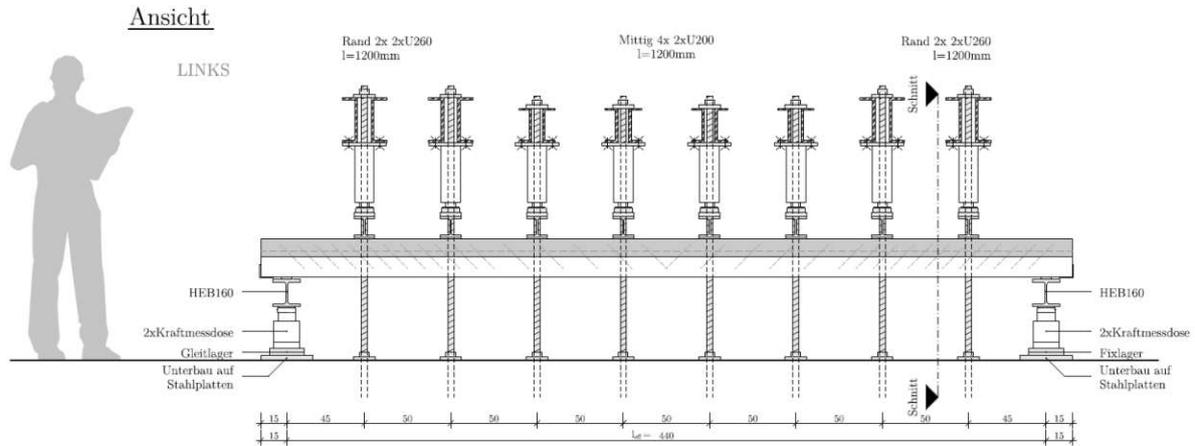
3.1 Versuchskonzept

Das im Folgenden beschriebene Versuchskonzept bildete die Grundlage für die Herstellung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit. Eine planliche Darstellung des Versuchsaufbaus befindet sich im Anhang D. In Abbildung 3.1 ist ein Planausschnitt ersichtlich.

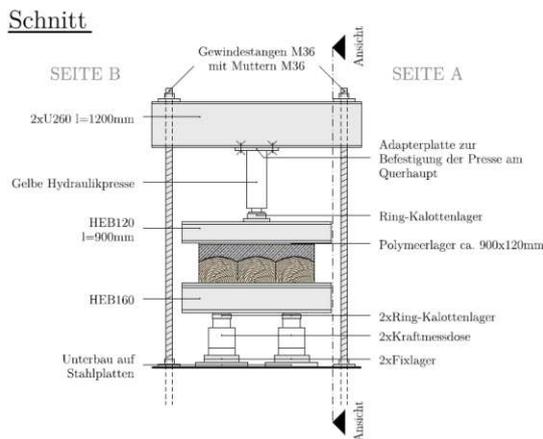
Der Versuchsaufbau wurde im Rahmen einer dieser Versuche vorausgehenden Versuchsreihe entwickelt und aufgebaut. Wie in Abbildung 3.1 (a) und (b) dargestellt, bestand der Versuchsaufbau aus zwei Auflagern mit einem Achsabstand von 440 cm. Davon ausgehend waren im Abstand von 45 cm alle 50 cm hydraulische Pressen angeordnet, um eine Gleichlastverteilung anzunähern. Die Pressen wurden mittels Querträgern an Gewindestangen befestigt, die mit dem Aufspannfeld fest verbunden (vorgespannt) waren. Die Kraftübertragung zwischen den Hydraulikpressen und den Versuchskörpern erfolgte über ein Ringkalottenlager und einem zur Lastverteilung dienenden Querträger (HEB120). Der Höhenausgleich zwischen dem Ringkalottenlager und dem Querträger erfolgte über Stahlplatten und Betonwürfel. Der Querträger wurde über ein Polymerlager mit dem Versuchskörper verbunden, um eine gleichmäßige Kraftübertragung zu gewährleisten. Die Auflager bestanden aus einem Querträger (HEB160) der die Kraft auf zwei Kraftmessdosen weiterleitet. Diese waren auf der einen Seite über ein Gleitlager und auf der anderen Seite über ein Festlager mit dem Unterbau verbunden, um ein statisch bestimmtes System zu gewährleisten.

Die Versuchskörper bestanden aus jeweils drei nebeneinander angeordneten Dippelbäumen. Als Verbindungsmittel zwischen Holz und Beton wurden *Würth Assy plus 4 VG CH*-Schrauben [1] verwendet. Die Anordnung der Schrauben ist in Abbildung 3.1 (c) dargestellt. Die Betonplatte wies in der Ausführung mit STB vom Scheitelpunkt der Dippelbäume zur Oberkante der Aufbetonschicht eine Mindestdicke von 7 cm auf, während die Variante mit TXB eine Mindestdicke von 3 cm hatte.

Das Versuchskonzept sieht zur Orientierung die Bezeichnung der Längsseiten in A- und B-Seite vor (siehe Abbildung 3.1 (b)). Die Unterscheidung der Auflager erfolgte bei Betrachtung der Seite A in rechts und links.



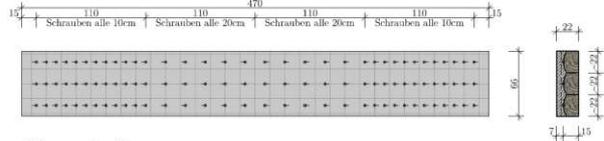
(a) Versuchsaufbau - Ansicht



(b) Versuchsaufbau - Schnitt

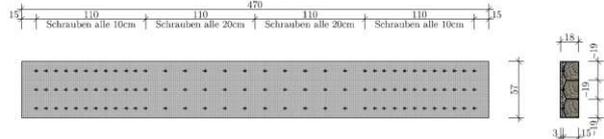
Versuch 1

Stahlbeton $d=7\text{cm}$ (ca. $0,250\text{m}^3$), Schrauben $l=200\text{mm}$ $d=8\text{mm}$ (102Stk.)



Versuch 2

Basalt-Textilbeton $d=3\text{cm}$ (ca. $0,110\text{m}^3$), Schrauben $l=180\text{mm}$ $d=8\text{mm}$ (102Stk.)



(c) Grundriss und Schnitt der Versuchskörper

Abb. 3.1: Planausschnitte - Versuchskonzept

3.2 Messkonzept

Das Messkonzept wurde von SL entwickelt und bildete die Grundlage der Dokumentation zur spätere Auswertung der Versuche. Eine vollständige Darstellung des Konzeptes findet sich in Anhang D. Abbildung 3.2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Messkonzept. Das Messkonzept sieht verschiedene Messsysteme vor. Die wesentlichen Komponenten sind im Folgenden zusammengefasst.

- Kraftmessdosen zur Bestimmung der Auflagerkräfte
- Induktive Wegaufnehmer zur Bestimmung der Auflagerverformung und des Schlupfes zwischen Beton und Holz

- Seilzugwegaufnehmer zur Bestimmung der Durchbiegung
- Dehnmessstreifen (DMS) zur Bestimmung der Dehnungen an Holz- bzw. Betonoberflächen
- Beschleunigungssensoren zur Bestimmung des Schwingverhaltens
- Photogrammetrisches Messsystem zur Dokumentation der Rissbildung
- Optische Fasermessung zur Bestimmung der Dehnungen im Beton

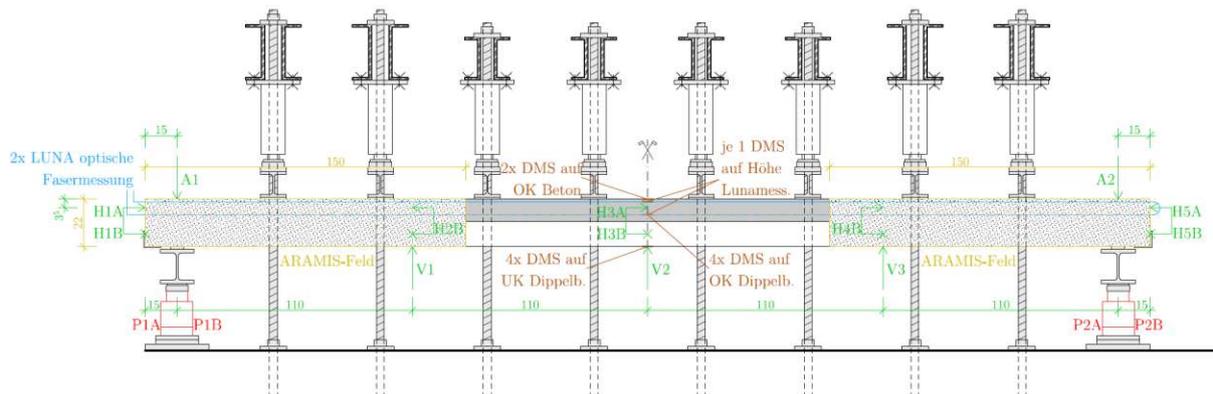


Abb. 3.2: Planausschnitt - Messkonzept

Die Datenerfassung erfolgte über drei verschiedene Systeme. Die Kraftmessdosen, induktiven Wegaufnehmer, Seilzugwegaufnehmer, DMS und Beschleunigungssensoren wurden über Kabel und eine Schnittstelle mit einem Computer verbunden. Die Datenverarbeitung erfolgte mit Hilfe der Software *Criistal*. Die Software speichert die Daten und gibt während der Versuche in Echtzeit Auskunft über die einzelnen Messergebnisse und deren Zusammenhänge.

Die Datenerfassung des photogrammetrischen Messsystems erfolgte über zwei getrennte Systeme. Es wurden jeweils die ersten 150 cm rechts und links der Versuchskörper erfasst. Auf der rechten Seite wurde eine Spiegelreflexkamera installiert, die in definierten Intervallen von 5 Sekunden Bilder aufnahm. Beim linken Feld wurde das Messsystem *ARAMIS 4M* der Firma Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM) verwendet. Das System wurde auf einem separaten Rechner angeschlossen und zeigte die Messungen in Echtzeit an. Um die Systeme im Nachhinein miteinander vergleichen zu können, wurde beim Start der *Criistal* Messung eine Stoppuhr gestartet. Diese Stoppuhr wurde anschließend in das Sichtfeld des photogrammetrischen Messsystems gehalten. Dadurch konnte ein zeitlicher Bezug der Messungen hergestellt werden.

Für die optische Fasermessung wurde ein System der Firma LUNA verwendet. Der faseroptische Laserinterferometer ODiSI 6100 [17] wurde mit einem eigenen Rechner verbunden. Darauf lief die Software ODiSI Application Software, welche die Daten speicherte und den Dehnungsverlauf in Echtzeit darstellte.

Im Nachfolgenden werden die verschiedenen Messsysteme beschrieben. Auf den Einbau wird im Kapitel 3.3 und 3.4 genauer eingegangen.

Kraftmessdosen

Die Auflagerkräfte wurden mithilfe von Kraftmessdosen erfasst. Die Kraftmessdosen wurden unter den Querträgern angebracht, die als Auflager für die Versuchskörper dienten. Pro Seite wurden zwei Kraftmessdosen eingesetzt, um eine stabile Lagerung der Querträger zu gewährleisten und

mögliche Torsionsbeanspruchungen zu erfassen. In Abbildung 3.2 sind die Kraftmessdosen als P1A und P1B am linken Auflager und als P2A und P2B am rechten Auflager bezeichnet.

Induktive Wegaufnehmer

Die induktiven Wegaufnehmer wurden zur Messung der relativen Verschiebung in der Fuge zwischen der Aufbetonschicht und den Dippelbäumen eingesetzt. Der Endschlupf zwischen den beiden Bauteilen wurde auf jeder Seite mit zwei Wegaufnehmern an den äußeren Dippelbäumen gemessen. Zusätzlich wurde der Schlupf in den Viertelpunkten und in der Mitte der Verbunddecke gemessen. Die Wegaufnehmer wurden seitlich an den Dippelbäumen befestigt. Die Messung erfolgte an Holzplättchen, die fest mit der Betonplatte verbunden wurden (siehe Abbildung 3.3 (b)). Diese induktiven Wegaufnehmer sind im Messkonzept mit Hxy bezeichnet, wobei x eine fortlaufende Nummer ist, die auf der linken Seite der Versuchskörper beginnt, und y für die Seite A beziehungsweise B steht (siehe Abbildung 3.1 (b) und 3.2).

Des Weiteren wurde die Auflagerverformung mithilfe von induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Die Montage erfolgte über eine Stahlkonstruktion, welche mit dem Untergrund verbunden wurde. Die Messung bezog sich auf die Oberfläche der Aufbetonschicht vertikal über den Auflagern. Im Messkonzept sind diese beiden Wegaufnehmer mit A1 und A2 bezeichnet. In Abbildung 3.3 (a) ist die Situation am Auflager abgebildet.



(a) Induktive Wegaufnehmer



(b) Wegaufnehmer und DMS

Abb. 3.3: Messsysteme an der STB-Verbunddecke (a) am rechten Auflager und (b) in der Verbunddeckenmitte

Seilzugsensor

Zur Erfassung der Durchbiegung der Verbunddecken an der Holzunterseite wurden Seilzugsensoren eingesetzt. Jeweils ein Sensor wurde an den Viertelpunkten und in der Mitte der Versuchskörper angebracht. Der Referenzpunkt, d.h. der Befestigungspunkt des Seilzugsensors, wurde senkrecht unter den jeweiligen Messpunkten am Untergrund festgelegt. Anschließend wurde das Seil des Sensors in Haken eingehängt, die an der Holzunterseite des Versuchskörpers befestigt wurden. Dadurch konnte die vertikale Durchbiegung der Verbunddecke kontinuierlich gemessen werden. Im Messkonzept sind die Messpunkte mit V1 bis V3 bezeichnet.

Dehnmessstreifen

Die DMS wurden zur Bestimmung der Dehnungen auf den Holz- und Betonoberflächen verwendet. Sie wurden mit dem mitgelieferten Spezialkleber auf zuvor geschliffene und aufgeraute Oberflächen aufgeklebt.

Pro Versuchskörper wurden insgesamt vier DMS auf der Holzoberseite (siehe Abbildung 3.5) und vier auf der Holzunterseite befestigt. Bei der STB-Verbunddecke erfolgte die Platzierung der DMS auf den beiden äußeren Dippelbäumen, je zwei auf einem Baum. Bei der TXB-Verbunddecke wurde der Dippelbaum auf der Seite B und in der Mitte gewählt, da die Oberfläche auf der Seite A aufgrund zu vieler Unebenheiten nicht geeignet war. Auf der Betonoberfläche wurden je zwei DMS in den äußeren Viertel der Aufbetonschicht in der Verbunddeckenmitte positioniert.

Zusätzlich wurden bei beiden Versuchskörpern zwei DMS seitlich auf der Höhe der optischen Fasermessung angebracht (siehe Abbildung 3.3 (b)). Der untere der beiden DMS lag dadurch auf Höhe der Verbundfuge. Dies ist möglich, da der Beton durch die Rundung der Dippelbäume seitlich etwas weiter hinunter ragte.

Beschleunigungssensoren

Die Messung der Beschleunigungen erfolgte auf der Oberseite der Versuchskörper mittels Beschleunigungssensoren mit einem Messbereich von $\pm 1\text{ g}$. Die Sensoren zeichneten dabei alle 0,001667 Sekunden die Beschleunigung auf. Jeweils ein Sensor wurde mittig über den Auflagern und in den Viertelpunkten angebracht. In der Mitte der Verbunddecke wurden zwei Sensoren rechts und links des Anregungspunktes befestigt. Diese Anordnung stellte sicher, dass eine Schwingung in der erste und in der zweite Eigenform optimal aufgezeichnet werden konnte. Die Sensoren wurden mit D1 bis D5 bezeichnet, wobei die Nummerierung auf der linken Seite begann.

Photogrammetrisch Messung

Auf der A-Seite der Versuchskörper wurden jeweils die ersten 150 cm der Verbunddeckenenden mittels Nahbereichsphotogrammetrie dokumentiert. Im Gegensatz zu dem früher im Bauwesen üblichen punktuellen Messtechniken, wie DMS, ist die Nahbereichsphotogrammetrie ideal, um die Entstehung und den Verlauf sämtlicher Risse in dem betrachteten Bereich kontinuierlich und flächendeckend zu erfassen. Wie bereits erwähnt, wurden an den beiden Enden des Versuchskörpers zwei unterschiedliche Systeme zur Bildaufnahme eingesetzt. Auf der linken Seite kam das Messsystem *ARAMIS 4M* der Firma GOM zum Einsatz, das mit einer Frequenz von 1/5 Hz eingestellt wurde. Es bestand aus zwei Vier-Megapixel-Kameras ($2352 \times 1728\text{ px}$), die in einem festen Abstand zueinander auf einem Querbalken montiert waren, und einer Software zur digitalen Bildkorrelation (GOM-Correlate). Die Bilder der rechten Seite wurde mit einer Spiegelreflexkamera im Abstand von 5 Sekunden aufgenommen, was der Frequenz des Messsystems *ARAMIS 4M* entsprach.

Das Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie beruht darauf, die periodisch aufgenommenen Bilder zu vergleichen und die Bewegung einzelner Pixelgruppen, den so genannten Facetten, sowie deren Abstandsänderung zueinander zu verfolgen [12]. Dafür wurde vor dem Versuch die Lage und der Kamerawinkel im Raum kalibriert. Die Auswertung erfolgte dann mit der Software GOM-Correlate. Für eine optimale Identifikation der Bildpunkte benötigte die Software ein Muster mit ausreichendem Kontrast. Dafür wurden die Versuchskörper mit weißer Farbe angestrichen und anschließend mit einer Bürste ein schwarzes stochastisches Muster aufgetragen. Die Facettengröße wurde mit $18 \times 18\text{ px}$ und einem Punktabstand von 12 px festgelegt. Die Facetten überlappten sich somit um 6 px .

Optische Fasermessung

Die faseroptische Dehnungsmessung ermöglichte eine kontinuierliche und quasi lückenlose Aufzeichnung der Dehnungen im Beton. Durch das Einbetonieren der Messfasern können Rückschlüsse auf die inneren Trag- und Schädigungsmechanismen gezogen werden [33].

Für diesen Versuch wurde ein System der Firma LUNA verwendet. Im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien steht das System ODISI 6100 zur Verfügung. Es besteht aus einer Sende- und Ausleseeinheit, an die Glasfasern angeschlossen werden. Die Software bietet eine Echtzeitanzeige der Dehnungen über den Weg oder die Zeit. Der Messabstand kann stufenweise zwischen 5,8 mm und 0,65 mm gewählt werden. Die maximale Messfrequenz beträgt 62,5 Hz. Das Verfahren basiert auf der natürlich vorkommenden Rayleigh-Rückstreuung in Glasfasern [17].

Bei den verwendeten Glasfasern handelte es sich um den EpsilonSensor des Herstellers Nerve-Sensors, der über die Firma FLOAB GmbH bezogen wurde. Die Fasern sind in einem monolithischen Kern eingebettet und besitzen eine gerippte Außenfläche, um die Verbundeigenschaften zu verbessern [20]. Pro Versuchskörper wurden zwei EpsilonSensoren verwendet, die in Längsrichtung hin und zurück geführt wurden. Damit war es möglich, die Längsdehnungen im Beton in Breitenrichtung an zwei verschiedenen Stellen in jeweils zwei verschiedenen Höhen kontinuierlich zu messen. Ein großer Vorteil dieses Systems besteht darin, dass nur ein Anschluss pro Faser erforderlich ist und somit ein Teil der Schwachstellen und Risiken, sowie der Verkabelungsaufwand im Vergleich zu DMS im Verhältnis zur hohen Anzahl der Messpunkte drastisch minimiert werden.

3.3 Verbunddeckenherstellung

Die Herstellung der Versuchskörper basierte auf dem von SL ausgearbeiteten Versuchs- und Messkonzept (siehe Kapitel 3.1, 3.2 und Anhang D). Im Nachfolgenden werden die einzelnen Schritte bei der Herstellung beschrieben.

3.3.1 Dippelbäume

In jedem Versuchskörper wurden drei Dippelbäume eingebaut. Um die experimentellen Untersuchungen so realitätsnah wie möglich zu gestalten, wurden alte Dippelbäume aus einem Gründerzeithaus verwendet. Die Dippelbäume wurden im Vorhinein auf Schäden untersucht und lose Bestandteile mit einer Drahtbürste entfernt. Ebenso wurde beschädigtes oder nicht mehr tragfähiges Material entfernt, um den verbleibenden Restquerschnitt des Holzes bestimmen zu können. Anschließend wurden jeweils drei Dippelbäume mit möglichst ähnlicher Höhe für die Versuchskörper ausgewählt und zusammengestellt, um eine möglichst horizontale Oberkante entlang der Scheitelpunkte der Dippelbäume zu gewährleisten.

Abbildung 3.4 zeigt die rohen Dippelbäume vor dem Einbau der Aufbetonschicht und der Messtechnik. Aufgrund des Einsatzes gebrauchter Dippelbäume variierten die Versuchskörperbreiten zwischen der Ausführung mit STB und der mit TXB. Die Durchschnittsbreiten der Verbunddecke sind in Abbildung 3.1 (c) dargestellt. In Tabelle 3.1 sind die gemessenen Breiten und Höhen der einzelnen Dippelbäume zusammengestellt und der Durchschnitt berechnet.

Tab. 3.1: Abmessungen der Dippelbaum-Querschnitte

TXB			STB		
b_{unten}	b_{oben}	h_{mitte}	b_{unten}	b_{oben}	h_{mitte}
21.0	19.0	15.0	20.0	17.5	14.5
19.5	19.0	15.0	19.5	18.0	15.0
14.0	13.0	14.5	23.5	21.0	15.5
18.2	17.0	14.8	21.0	18.8	15.0
17.6			19.9		

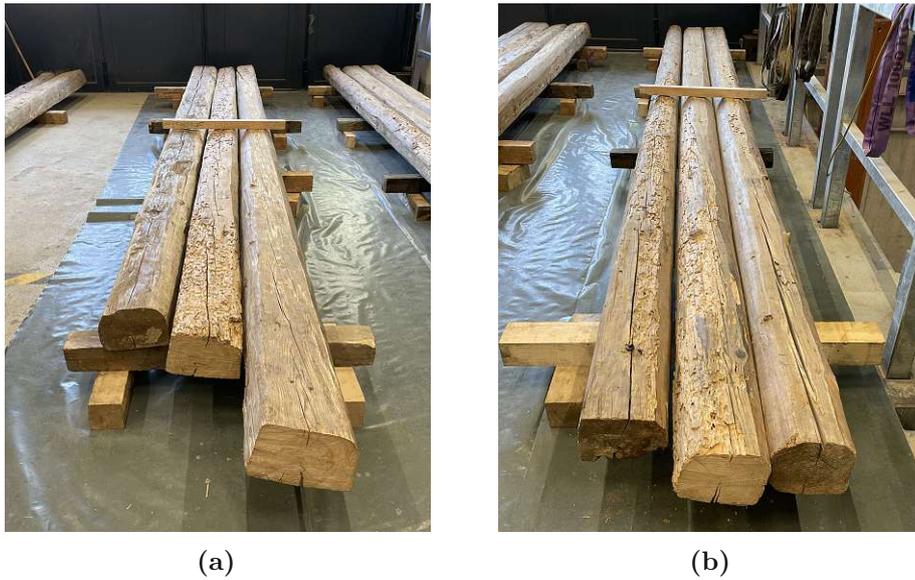


Abb. 3.4: Rohe Dippelbäume für die (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke

Anschließend wurden die Dippelbäume auf eine Länge von 470 cm gekürzt und an beiden Enden mit Stahlwinkeln verbunden, um eine stabile Verbindung zwischen den einzelnen Dippelbäumen herzustellen. Gemäß Messkonzept (siehe Kapitel 3.2) waren sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite der Dippelbäume DMS anzubringen. Da die DMS auf der Oberseite des Holzes nach dem Einbau der Aufbetonschicht nicht mehr zugänglich waren, mussten sie bereits vor dem Einbau angebracht werden. Es wurden jeweils vier DMS pro Versuchskörper in der Mitte der Träger angebracht. Dazu wurde das Holz angeschliffen bevor die DMS mit dem mitgelieferten Kleber befestigt wurden. Um die DMS und deren Verkabelung vor Beschädigung während des Einbaus der Aufbetonschicht zu schützen, wurde ein Dichtband über den Messstreifen angebracht. In Abbildung 3.5 (a) sind die DMS bereits verkabelt dargestellt, in Abbildung 3.5 (b) sieht man die DMS inklusive Dichtband im eingeschalteten Zustand.



Abb. 3.5: DMS auf den Dippelbäumen für die (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke

Die DMS an der Unterseite und seitlich, auf der Höhe der optischen Fasermessung, wurden nach Fertigstellung der Aufbetonschicht angebracht. Die Arbeitsschritte wurden wie bei den DMS auf der Holzoberseite durchgeführt. Auf die Verwendung des Dichtbandes wurde hierbei verzichtet, da zum Zeitpunkt der Montage keine Gefahr für eine Beschädigung der DMS mehr bestand.

3.3.2 Probebetonage

Aufgrund von Bedenken hinsichtlich der Verdichtbarkeit des Betons in Bereichen mit Engstellen wurden vor der Herstellung der Aufbetonschicht der Verbunddecken zwei Probeplatten mit unterschiedlichen Konsistenzklassen gefertigt. Der Einfachheit halber wurde ein Fertigbetonsack mit einer maximalen Korngröße von 8 mm in den Ausbreitmaßklassen F45 bzw. F59 angemischt. Die Fertigbetonmischung enthielt Fasern, die potenziell die Verdichtbarkeit beeinflussen konnten, was jedoch in Kauf genommen wurde.

Für die Probekörper wurde die Schalung mit einer Baufolie ausgelegt und anschließend das auch in den Großversuchen verwendete Basalt-Bewehrungsnetz mit Maschenweite 21×21 [7] eingelegt (siehe Abbildung 3.6 (a)). Um die Einbringung der Verbindungsmittel und die Verdichtbarkeit des Betons in der Umgebung der Schrauben in Kombination mit der Basaltbewehrung beurteilen zu können, wurden pro Versuchsplatte mehrer Schrauben der Marke Würth Assy plus 4 VG CH [1] hinzugefügt. Das Ausbreitmaß des Betons wurde während des Anmischvorgangs kontinuierlich überwacht und bei 45 cm bzw. 59 cm in die Schalung gegossen. Der Beton wurde in einer Schichtstärke von 3 cm eingebracht und anschließend mit einem Flaschenrüttler verdichtet, um eine gleichmäßige Verteilung und Verdichtung zu gewährleisten. Die gleiche Verdichtungsmethode war auch bei den Verbunddecken geplant.



(a) Schalung inkl. Bewehrung und Verbindungsmittel



(b) Bestimmung des Ausbreitmaßes



(c) Rückseite der Probeplatte F45



(d) Rückseite der Probeplatte F59

Abb. 3.6: Ablauf Probebetonage

Nach dem Aushärten der Probebetonage wurden die beiden Platten ausgeschalt und die Rückseite untersucht (siehe Abbildung 3.6 (c) und (d)). Dabei zeigte sich deutlich, dass der Beton der Konsistenzklasse F45 Lücken und Fehlstellen aufwies, weshalb er als ungeeignet für den geplanten Einsatz bewertet wurde. Im Gegensatz dazu wies die Rückseite der Probeplatte mit Beton der Klasse F59 keine größeren Fehlstellen auf.

Diese Vorgehensweise ermöglichte die Beurteilung der Verdichtbarkeit des Betons, insbesondere in kritischen Bereichen wie den Schraubenanschlüssen. Die Ergebnisse zeigen, dass die höhere

Konsistenzklasse F59 besser geeignet ist, um eine dichte Betonmatrix ohne Fehlstellen zu gewährleisten.

3.3.3 Aufbetonschicht

Nach Aufbereitung der Dippelbäume begann die Herstellung der Aufbetonschicht. Der erste Schritt war der Bau der Schalung. Dazu wurden Schalungsbretter passgenau zugeschnitten und seitlich an den Dippelbäumen mit Schrauben befestigt. Um Schiefstellungen zu vermeiden und eine gleichmäßige Breite sicherzustellen, wurde die Oberkante der Schalung der Versuchskörper ausgespreizt (siehe Abbildung 3.7 (b)).

Die Oberkante der Schalung wurde auf die Höhe der späteren Aufbetonschicht ausgerichtet, um den Betoniervorgang zu erleichtern. Bei der STB-Verbunddecke wurde die Oberkante 7 cm über dem höchsten Punkt der Dippelbäume festgelegt. Bei der TXB-Verbunddecke wurde eine Plattenstärke von 3 cm eingeschalt.

Nach Fertigstellung der Schalung wurde eine Baufolie eingelegt und an die Dippelbäume beziehungsweise seitlich an der Schalung mit einer Druckluftpistole geklammert. Die Trennfolie ist wasserdicht und verhindert, dass während des Betonierens Feuchtigkeit in das Holz eindringt. Die eingebaute Folie am Beispiel der TXB-Verbunddecke ist in Abbildung 3.7 (c) dargestellt.

Anschließend wurden die Bewehrungsmatten in die Schalung eingehoben. Bei der Stahlbewehrung wurden Stahlstäbe als Abstandhalter an die Bewehrungsstäbe angeschweißt. Die Betondeckung beträgt 2 cm von der Holzoberkante. Die Textilbewehrung wurde von der Firma Fiber Elements GmbH inklusive der Abstandhalter geliefert. Die Abstandhalter bestanden ebenfalls aus dem textilen Bewehrungsnetz und sorgten für eine Betondeckung von 1 cm von der Holzoberkante aus.

Die Verbindungsmittel der Aufbetonschicht zu den Dippelbäumen wurden bei beiden Versuchskörpern im gleichen Raster eingebaut. Im Versuchskonzept in Abbildung 3.1 (c) ist der Raster dargestellt. Als Verbindungsmittel wurden die Schrauben Würth Assy plus 4 VG CH [1] verwendet. Die Schrauben wurden beim Einbau in einem Winkel von 45° bis 1 cm unter die geplante Betonoberfläche eingebracht. Ihre Neigungsrichtung wechselte in der Mitte der Versuchskörper (siehe Abbildung 3.1). In den Abbildungen 3.7 (d) und (e) sind die Versuchskörper mit der bereits eingebauten Bewehrung und den Verbindungsmitteln zu sehen. In Abbildung 3.7 (f) stellt die Unterkante des ersichtlichen Spreizholzes die Oberkante der Aufbetonschicht dar. Hier sind die Abstände der Schrauben und die Abstände der Bewehrung im Beton erkennbar.

Um die Dehnungen innerhalb des Betons messen zu können, muss das optische Messsystem in die Aufbetonschicht einbetoniert werden. Dazu werden die EpsilonSensoren [20] in die beiden Versuchskörper eingebaut. Pro Versuchskörper werden jeweils zwei verbaut. Diese verlaufen im Beton in Längsrichtung jeweils in der Fuge zwischen den Dippelbäumen auf Höhe der Scheitelpunkte der Dippelbäume von der linken zur rechten Verbunddeckenseite und anschließend 1 cm unterhalb der Betonoberkante in umgekehrter Richtung zurück. Sie wurden an der Bewehrung befestigt, mit Ausnahme der oberen Lage der TXB-Verbunddecke, bei der Schrauben zur Fixierung eingesetzt wurden (siehe Abbildung 3.7 (g) und (h)).

Der Beton wurde von der Firma Rohrdorfer Baustoffe Austria GmbH geliefert. Vor dem Einbau wurde das Ausbreitmaß kontrolliert. Anschließend wurde der Beton händisch in die vorbereitete Schalung eingebracht und mit einer Rüttelflasche verdichtet. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden im Zuge des Betoniervorgangs Probekörper erstellt. Im Kapitel 3.5 wird darauf näher eingegangen.

Die Versuchskörper wurden nach dem Ausschalen bis zum Versuch im Labor zwischengelagert.



(a) Schalung STB



(b) Schalung TXB



(c) Folie



(d) Bewehrung STB



(e) Bewehrung TXB



(f) Schraubendetail TXB



(g) EpsilonSensor STB



(h) EpsilonSensor TXB



(i) Aufbetonschicht betoniert

Abb. 3.7: Herstellungsablauf der Aufbetonschicht

3.4 Versuchsablauf

Vor dem Einbau in den Versuchsstand wurden beide Verbunddeckenenden für die photogrammetrische Messung vorbereitet. Die ersten 150 cm der Versuchskörper wurden jeweils mit weißer Farbe gestrichen. Darauf wurde mit einer Bürste und schwarzer Farbe ein Muster aufgetragen. Das so entstandene kontrastreiche stochastische Muster stellt die Messfelder für die Nahbereichsphotogrammetrie dar und ist in Abbildung 3.8 (b) zu sehen.

Anschließend wurden Markierungen an den Auflagern und Kraftangriffsflächen der Versuchskörper angebracht, um die korrekte Positionierung zu erleichtern. Zusätzlich wurden die Positionen für die induktiven Wegaufnehmer und Beschleunigungssensoren markiert. Die Sensoren selbst

wurden erst nach dem erfolgreichen Einbau der Versuchskörper in den Prüfstand montiert. Die DMS an der Betonoberfläche wurden bereits vor Einbau angebracht, da die Arbeitsverhältnisse außerhalb des Versuchsstandes besser waren und eine Beschädigung der Sensoren während des Einbaus an der Oberseite der Verbunddecken als nicht sehr wahrscheinlich angesehen wurde.

Die Auflagerkonstruktionen wurden vor Einbau der Verbunddecke in die vorgesehene Position gebracht. Die Auflager haben laut Versuchskonzept einen Achsabstand von 440 cm. Sie besteht von unten nach oben aus folgenden Komponenten (siehe Abbildung 3.8 (a)):

- zwei massive Stahlplatten zur Ableitung der Last in den Untergrund,
- darauf jeweils einmal als Fixlager und einmal als Gleitlager ausgeführte Stahlplatten, die die Verbindung zu den Kraftmessdosen herstellen,
- Kraftmessdosen zur Erfassung der Auflagerkräfte, die als Auflager für den Querträger dienen
- und einem Querträger mit aufliegendem Flachstahl, auf dem der Versuchskörper positioniert wird.

Danach konnte der erste Versuchskörper in den Prüfstand gehoben werden. Der erste Versuch wurde an der STB-Verbunddecke durchgeführt. Der Versuchsablauf wurde bei beiden Verbunddecken gleich ausgeführt, weshalb die Beschreibung allgemein gehalten wird.

Zunächst wurde der Versuchskörper mit einem Hallenkran vom Zwischenlagerplatz zum Prüfstand transportiert. Mit dem Kran wurde der Versuchskörper so weit wie möglich in den Prüfstand gehoben und auf einer Hilfskonstruktion abgelegt. Diese bestand aus einer Konstruktion mit Rollen innerhalb des Prüfstandes und einem elektrischen Hubwagen auf dem anderen Ende. In Abbildung 3.8 (c) ist der Einbau der STB-Verbunddecke zu sehen. Mit Hilfe des Hubwagens konnte die Verbunddecke die letzten Meter auf den Rollen verschoben und anschließend auf die Auflagerkonstruktion abgesenkt werden. Die Kraftmessdosen der Auflagerkonstruktion wurden bereits vor dem Absetzen der Verbunddecken an das Messsystem angeschlossen, wodurch die Gesamtlast der Versuchskörper ermittelt werden konnte.



(a) Auflagerkonstruktion



(b) Stochastisches Muster



(c) Einbau der Verbunddecke

Abb. 3.8: Vorbereitungen für den Versuch

Im Anschluss wurden die Dehnmessstreifen an der Holzunterseite angebracht und der hierfür verwendete Kleber über Nacht ausgehärtet. Im nächsten Schritt wurden alle Dehnmessstreifen mit dem Messsystem verbunden. Für die Seilzugsensoren wurden Haken an der Holzunterseite angeklebt, in welche der Seilzug eingehängt wurde. Auch die Seilzugsensoren wurden anschließend an das Messsystem angeschlossen und auf ihre Funktion überprüft.

3.4.1 Schwingungsversuche

Das Ziel des Schwingungsversuches war es, die Eigenfrequenz und das Dämpfungsmaß der Verbunddecke zu bestimmen. Hierzu wurden sowohl dynamische als auch statische Versuche durchgeführt

Dynamischer Schwingungsversuch

Im Rahmen des dynamischen Schwingungsversuchs wurden die Beschleunigungssensoren angebracht. Zu diesem Zweck wurden zunächst Metallplättchen auf die Verbunddeckenoberfläche geklebt, auf denen die Sensoren magnetisch befestigt wurden. Danach wurden die Sensoren verkabelt, an das Messsystem angeschlossen und überprüft, um die erforderlichen Daten für die Schwingungsanalyse zu erfassen.

Zur Anregung der Schwingung wurde ein Hammer mit einer Masse von 5,7 kg eingesetzt, der per Hand sanft auf eine in der Verbunddeckenmitte platzierte Neoprenmatte geschlagen wurde. Dieser Vorgang wurde mit variierender Schlagkraft mehrfach wiederholt, um unterschiedliche Anregungsstärken zu erzeugen. Der dadurch entstandene Beschleunigungsverlauf der Versuchskörper wurde mit den Beschleunigungssensoren aufgezeichnet (siehe Kapitel 3.2).

Impulshammer

An der TXB-Verbunddecke wurden zusätzlich einige Versuche mit einem Impulshammer mit Gummispitze aufgezeichnet. Der Impulshammer, Impact Hammer Type 8202 der Firma Brüel & Kjaer [2], war mit einem Kraftsensor ausgestattet, der die Anregung aufzeichnete. Die darauffolgende Reaktion der Versuchskörper wurde wie bisher mit den Beschleunigungssensoren gemessen.

Statischer Schwingungsversuch

Im statischen Versuch wurde eine Stahlplatte mit einem Gewicht von ca. 440 kg in der Verbunddeckenmitte platziert. Um die DMS vor Beschädigung zu schützen, wurde die Stahlplatte auf Neoprenmatten gelagert. Die Belastung der Verbunddecke erfolgte schrittweise. Zuerst wurde mithilfe des Hallenkrans ein Gewicht von ca. 200 kg abgesetzt. Danach folgte eine Laststufe mit zirka 350 kg worauf ein vollständiges Absetzen der Stahlplatte folgte.

Während des Versuchs wurden die Durchbiegung mithilfe der Seilzugsensoren und die Auflagerreaktionen über die Kraftmessdosen aufgezeichnet. Vor der Messung wurden die Sensoren überprüft und die Messwerte in der Software *Criстал* auf null gesetzt. Die Beschleunigungssensoren waren in diesem Fall nicht erforderlich und wurden im Vorfeld entfernt.



(a) statischer Versuch



(b) dynamischer Versuch



(c) Impulshammer

Abb. 3.9: Schwingungsversuche an der TXB-Verbunddecke

3.4.2 Belastungsversuch

Nach Abschluss der Schwingungsversuche wurde der zerstörende Belastungsversuch durchgeführt. Dazu musste der Versuchsstand und das Messsystem adaptiert werden.

Die Kraftübertragung vom Versuchsstand auf die Versuchskörper erfolgte über Hydraulikpressen. Diese wurden über ein Ringklottenlager mit den Verbunddecken verbunden, um eine gleichmäßige Kräfteinleitung zu gewährleisten. Der Höhenunterschied zwischen den Pressen und den Querträgern am Versuchskörper wurde durch Stahlplatten und Betonwürfel ausgeglichen. Der Querträger *HEB 120* wurde auf einer Neoprenmatte am Versuchskörper gelagert um eine gleichmäßige Kraftverteilung zu gewährleisten. Dieser Aufbau wurde in Abständen von 50 cm wiederholt, um eine Gleichlast zu simulieren.

Für den Belastungsversuch wurde das Messsystem entsprechend angepasst. Zunächst wurden zum Messsystem *Criстал* zusätzlich die induktiven Wegaufnehmer hinzugefügt (siehe Abbildung 3.3). Die DMS, die induktiven Wegaufnehmer und die Seilzugsensoren wurden anschließend einem Funktionstest unterzogen. Danach wurden die einbetonierten EpsilonSensoren an den Laserinterferometer ODiSI 6100 [17] angeschlossen und die zugehörige Software gestartet. Zudem wurde das photogrammetrische Messsystem *ARAMIS 4M* am linken Verbunddeckenende beim ersten Versuch kalibriert und aktiviert, während auf der rechten Seite eine Spiegelreflexkamera zur Dokumentation aufgestellt wurde.

Beim eigentlichen Belastungsversuch wurden alle Messwerte in *Criстал* auf null gesetzt und alle Messsysteme und eine digitale Stoppuhr gestartet. Außerdem wurde die Echtzeitanzeige der Last-Verformungsbeziehung und der Messwerte in *Criстал* sowie die Anzeige des Rissfortschritts in *ARAMIS 4M* gestartet. Diese Echtzeitdarstellung ermöglichte eine detaillierte Beobachtung des Versuchsverlaufs und erleichterte die Beurteilung des Verhaltens während der Belastungsphasen. Der Versuchsaufbau mit eingebautem Versuchskörper ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

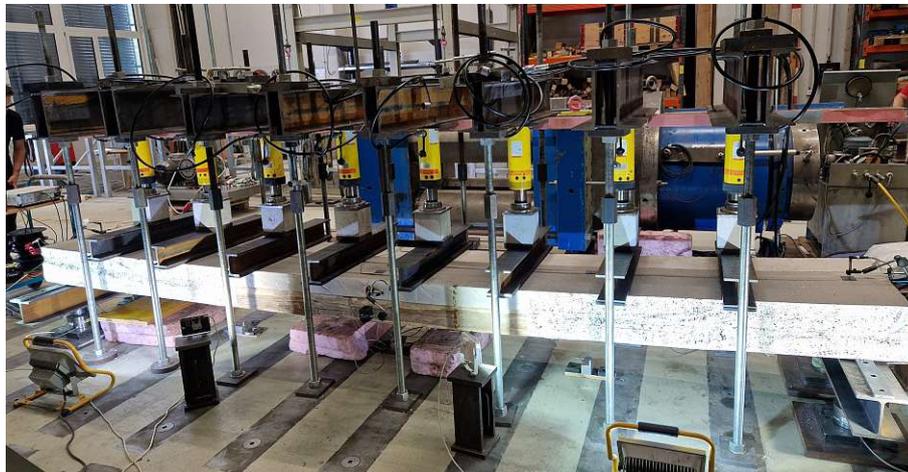


Abb. 3.10: Versuchsaufbau mit eingebauter STB-Verbunddecke während des Belastungsversuches

Die Last wurde über ein handgesteuertes Hydraulikaggregat aufgebracht. Nach einer ersten Belastungsstufe bis zirka 50 kN wurde der Versuchskörper wieder entlastet. Anschließend erfolgte die stufenweise Belastung bis zum Bruch. Etwa alle 50 kN wurde die Last kurzzeitig angehalten und die Verbunddecke auf Risse und Absplitterungen untersucht. Die Echtzeitmessungen wurden während des Versuches ständig überwacht. Dieses Vorgehen wurde bis zum Versagen der Verbunddecke beibehalten. Das Versagen zeigte sich durch einen deutlichen Lastabfall, der mit einem starken Anstieg der Durchbiegung einherging.

Anschließend wurden die Messdaten gespeichert und die Messsysteme abgeschaltet. Die Risse auf der Seite B, also der Seite ohne Nahbereichsphotogrammetrie, wurden angezeichnet und Schäden dokumentiert. Der Versuch war beendet und die Verbunddecke wurde zum Ausbau vorbereitet. Dazu wurden die Seilzugsensoren und die induktiven Wegaufnehmer demontiert. Die Verkabelung der DMS und des optischen Messsystems wurde entfernt. Der Ausbau des Trägers erfolgte nach dem gleichen Schema wie beim Einbau. Bevor der Versuchskörper wieder an seinen Lagerplatz transportiert wurde, wurden alle Schäden, die zuvor nur schwer zugänglich waren, dokumentiert.

3.5 Materialparameter

Die Bestimmung der Materialparameter erfolgte für den Beton und das Holz an zugehörigen Prüfkörpern. Die Prüfkörper für den Beton wurden während des Betoniervorganges der Aufbetonschicht hergestellt und anschließend im Labor des Institutes für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien geprüft. Für die Bestimmung der Materialeigenschaften des Holzes wurden zwei nicht eingebaute Dippelbäume für die Versuche verwendet. Mit der Durchführung wurde die Holzforschung Austria beauftragt. Die Materialparameter für die Bewehrungen und die Verbindungsmittel sind aus den Produktblättern der Hersteller entnommen.

3.5.1 Beton

Für die Aufbetonschicht der beiden Versuchskörper wurde ein Beton mit folgender Bezeichnung verwendet:

C40/50 B4 PB GK8 F59 ZG2.

Der Beton wurde vom Unternehmen Rohrdorfer Baustoffe Austria GmbH hergestellt und mit einem Transportmischer ins Labor geliefert. Das Chargenprotokoll befindet sich in Anhang D. Wie bereits erwähnt, wurden die Prüfkörper für die Bestimmung der Materialparameter zeitgleich mit der Herstellung der Aufbetonschicht hergestellt. Der zeitliche Ablauf ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tab. 3.2: Zeitlicher Ablauf der Herstellung der Aufbetonschicht und der Probekörper

Datum	Bezeichnung der Arbeiten	Alter in d
25.07.2024	Betonage	0
	Ausschalung Aufbetonschicht und Probekörper	
27.08.2024	Versuchsdurchführung STB-Verbunddecke	33
28.08.2024	Druckversuch	34
28.08.2024	Bestimmung E-Modul	34
29.08.2024	Versuchsdurchführung TXB-Verbunddecke	35
29.08.2024	Spaltzugversuch	35

Die Herstellung der Probekörper erfolgte angelehnt an die Bestimmungen der ÖNORM B 4710-3:2023 [24]. Die Schalungen der Probekörper entsprachen den festgelegten geometrischen Anforderungen. Die Würfel wurden mit einer Seitenlänge a von 150 mm und die Zylinder mit einem Durchmesser d von 150 mm und einer Höhe h von ca. 300 mm betoniert. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte jedoch in unmittelbarer Nähe zum Versuchskörper, um ein einheitliches Nacherhärten zu gewährleisten. Die Bestimmung der Materialparameter wurde zwischen den Versuchen der Verbunddecken durchgeführt, um die Werte zum Versuchszeitpunkt zu erfassen.

Bestimmung der Rohdichte

Die Rohdichte ρ des Festbetons lässt sich anhand folgender Gleichung bestimmen:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.1)$$

Zur Bestimmung des Volumens V wurden die Abmessungen der Probekörper vor den Versuchen nachgemessen. Die Masse m wurde vor dem Einbau in die Prüfmaschine mit einer Digitalwaage auf 1 g genau bestimmt. Anschließend wurde für die Rohdichte ρ der Mittelwert über die einzelnen Versuche gebildet und bei der Auswertung der Versuche verwendet.

Bestimmung der Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an einer Prüfmaschine im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien ermittelt. Im Rahmen der Untersuchung wurde die Würfeldruckfestigkeit an drei Probekörpern sowie die Zylinderdruckfestigkeit an vier Proben bestimmt.

Vor der Versuchsdurchführung wurden die zylindrischen Probekörper geschliffen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. Bei den Würfeln wurde die abgezogene Oberfläche seitlich eingebaut. Der Einbau erfolgte mittig unter dem Laststempel, um eine zentrische Lasteinleitung sicherzustellen. Anschließend wurden die Versuche nach den Vorgaben der ÖNORM EN 12390-3 [26] bis zum Bruch der Probekörper durchgeführt.

In Abbildung 3.11 sind die Bruchbilder exemplarisch an einem Würfel und einem Zylinder dargestellt. Alle Würfel zeigten das erwartete konische Bruchbild.



Abb. 3.11: Versuche zur Bestimmung des E-Moduls und der Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit f_c berechnet sich laut ÖNORM EN 12390-3 [26] zu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}. \quad (3.2)$$

Die Kraft F ist die Höchstkraft beim Bruch des Probekörpers. Die Betonfläche A_c darf mit den Nennmaßen berechnet werden. Für die Druckfestigkeit des Betons wird der Mittelwert der Versuche gebildet und ist in Tabelle 3.3 dargestellt.

Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul wurde im Zuge der Druckfestigkeitsprüfung an den zylindrischen Probekörpern bestimmt. Dabei wurden die Probekörper vor der zerstörenden Beanspruchung einer

Reihe von Belastungszyklen gemäß ÖNORM EN 12390-13 [25] unterzogen. Die dazu angebrachte Messeinrichtung, dargestellt in Abbildung 3.11 (a), wurde vor der Belastung zur Bestimmung der Druckfestigkeit entfernt.

Der Elastizitätsmodul E_c berechnet sich nach [25] aus dem Quotienten der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ und der Dehnungsdifferenz $\Delta\varepsilon_S$ zwischen der oberen und unteren Prüfspannung gemessen beim dritten Belastungszyklus.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (3.3)$$

Bestimmung der Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wird an zylindrischen Probekörpern bestimmt. Dabei wird nach ÖNORM EN 12390-6 [27] eine Druckkraft über einen schmalen Streifen entlang der Längsachse aufgebracht. Der Bruch erfolgt schließlich aufgrund der orthogonalen Zugkraft.

Die Lasteinleitung erfolgt über Zwischenstreifen, welche aus einer Hartfaserplatte gefertigt wurden. Die Streifen wurden vor Versuchsdurchführung exakt gegenüberliegend am Probekörper angebracht. Im Anschluss wurde der Probekörper zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut (siehe Abbildung 3.12 (a)) und der Versuch nach den Vorgaben der ÖNORM EN 12390-6 [27] durchgeführt. Insgesamt wurden vier Probekörper geprüft, die alle den erwarteten ebenen Bruch aufwiesen.

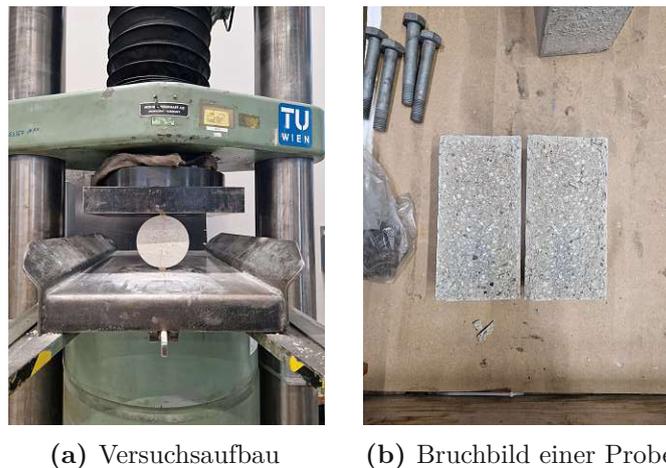


Abb. 3.12: Versuch zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit f_{ct} ergibt sich sodann aus der Höchstlast F des Versuchs, der Kontaktlänge L und dem Durchmesser d des Probekörpers durch die nachfolgende Gleichung [27]:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (3.4)$$

Zusammenfassung der Materialparameter

Für die Materialparameter wurden aus den einzelnen Versuchen der Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt. Die in Tabelle 3.3 dargestellten Werte dienen als Grundlage für die nachfolgenden Berechnungen.

Tab. 3.3: Materialparameter für den Beton

Bauteil	Alter [d]	ρ_c [g/cm ³]	f_{cm} [MPa]	$f_{cm,cube}$ [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_c [MPa]
Verbundplatte	34	2,31	36,98	40,30	2,74	27546
		0,35%	4,45%	1,41%	20,81%	2,94%

Die ermittelten Festigkeiten sind deutlich niedriger als die erwarteten für die Betonsorte C40/50. Nach Rücksprache mit dem Hersteller sind Rückstände von einem Luftporenbildner im Transportmischer eine mögliche Erklärung hierfür.

3.5.2 Holz

Die Bestimmung der Materialparameter des Holzes erfolgte durch die Holzforschung Austria. An insgesamt vier Probekörpern aus zwei nicht eingebauten Dippelbäumen wurde ein zerstörender 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Daraus wurden die Biegefestigkeit, sowie der lokale und der globale Biegeelastizitätsmodul ermittelt. An Kleinproben wurden zudem die Bauteildichte und der Feuchtegehalt bestimmt. Die Auswertung der Versuche der Holzforschung Austria ist im Anhang D dargestellt.

Bei zwei Proben handelt es sich um die Holzart Fichte, bei den beiden anderen um Kiefer. Für die Berechnungen werden nur die Versuche am Fichtenholz herangezogen, da es sich um die gleiche Holzart wie bei den verbauten Dippelbäumen handelt. In Tabelle 3.4 sind die Mittelwerte dieser beiden Versuche dargestellt. Die Sortierung erfolgte ohne Berücksichtigung des Insektenfraßes.

Tab. 3.4: Materialparameter für das Holz

Bauteil	Holzart	ρ_t [kg/m ³]	f_m [MPa]	E [MPa]	u_{darr} [%]	Sortierung nur Äste
Dippelbäume	Fichte	427	25	8264	12,2	S10

3.5.3 Bewehrung

Die dünne Aufbetonschicht mit einer Dicke von 3 cm wurde mit einer Textilbewehrung und die dickere Aufbetonschicht mit einer Dicke von 7 cm mit einer konventionellen Stahlbewehrung bewehrt.

Für die Textilbewehrung wurde ein Bewehrungsnetz aus Basaltfasern in einer Acrylatmatrix mit einer Maschenweite von 21×21 der Firma basalt fibertec GmbH mit einem Bewehrungsgrad von 0,82 cm²/m verwendet [7]. Der relevante Ausschnitt aus dem Produktblatt befindet sich im Anhang D. Für die Stahlbewehrung kam eine Bewehrungsmatte CQS 70 zur Verwendung. Da hierzu keine Versuche durchgeführt wurden, basieren die Materialparameter auf typischen Kennwerten österreichischer Bewehrungsstähle.

Die Materialparameter sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst. Bei der Textilbewehrung handelt es sich um eine Bruchspannung, bei der Stahlbewehrung um eine Fließspannung.

Tab. 3.5: Materialparameter für die Bewehrung

Bauteil	f_{tk} bzw. f_{yk} [MPa]	E_s [MPa]
Basaltbewehrung	1790	115000
Stahlbewehrung	550	200000

3.5.4 Verbindungsmittel

Die Verbindung zwischen den Dippelbäumen und der Aufbetonschicht wurde mit Schrauben der Firma Würth ausgeführt. Für die dünne Aufbetonschicht wurden die Vollgewindeschrauben Würth Assy plus 4 VG CH [1] mit einer Länge von 180 mm und für die dicke Aufbetonschicht mit einer Länge von 200 mm verwendet. Die Materialparameter gemäß Hersteller sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Tab. 3.6: Materialparameter der Assy Würth VG-Schrauben [6]

Bauteil	d [mm]	$M_{y,k}$ [Nm]	$f_{tens,k}$ [kN]	$f_{ax,k}$ [N/mm ²]
ASSY plus VG-Schrauben	8	20	17	11

Kapitel 4

Auswertung und Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Auswertung der Versuchsdaten. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die Schwingungsanalyse der Versuchskörper gelegt. Die Grundlagen der Auswertung sind im Kapitel 2 beschrieben.

In Tabelle 4.1 sind die allgemeinen Parameter der Versuchskörper angegeben. Die Höhe der Dippelbäume wird dabei mit DB und die Höhe der Aufbetonplatte mit AP gekennzeichnet. Das Eigengewicht (EG) wurde beim Einbau über die Kraftmessdosen gemessen (vgl. Kapitel 3.2 und 3.4).

Tab. 4.1: Zusammenfassung der Versuchskörperparameter

Bauteil	Stützweite [m]	Länge [m]	Breite [cm]	Höhe DB [cm]	Höhe AP [cm]	EG [kg]
TXB-Verbunddecke	4,4	4,7	57	14,8	3	485,3
STB-Verbunddecke	4,4	4,7	66	15	7	829,7

4.1 Belastungsversuch

Während der Belastungsversuche wurden die Gesamtbelastungen und die Durchbiegungen der Versuchskörper aufgezeichnet. Aus den Messwerten der Belastung und der Durchbiegung in Feldmitte kann ein Last-Verformungs-Diagramm erstellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden die Gesamtlasten in Flächenlasten umgerechnet. Die Auswertung der Daten erfolgt mit MATLAB (siehe Anhang A), der dazugehörige Code ist in Anhang C.1 angeführt. Die Auswertung wird an [16] angelehnt.

In Abbildung 4.1 ist die maximale Flächenlast q_{\max} und 40% davon $q_{0,4}$ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass $q_{0,4}$ in einem Bereich annähernd konstanter Steigung liegt, weshalb dieser Wert im Folgenden für Berechnungen unter der Annahme linear-elastischen Materialverhaltens verwendet wird. Die zugehörige Durchbiegung, sowie die Durchbiegung bei maximaler Belastung, sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Biegelinie wird aus den Messdaten der drei Seilzugensoren erstellt (siehe Kapitel 3.2). Zwischen den Messergebnissen erfolgte in Abbildung 4.2 vereinfacht eine lineare Interpolation.

Für den Nachweis der Durchbiegung nach EC5 muss die durch die Gebrauchslast hervorgerufene Durchbiegung w_{SLS} ermittelt werden, um sie mit der maximal zulässigen Anfangsdurchbiegung $w_{inst,max}$ vergleichen zu können. Im Kapitel 2.3.1 ist der Wertebereich für typische Nutzlasten angegeben. Das Eigengewicht der beiden Verbunddecken ist in Tabelle 4.1 ersichtlich. Insgesamt wird vereinfachend in der Auswertung für beide Verbunddecken eine charakteristische Gesamtlast q_{SLS} von 5 kN/m^2 angenommen [16]. Die durch q_{SLS} hervorgerufene maximale Durchbiegung w_{SLS} ist in der Biegelinie beschriftet. Der Grenzwert der Durchbiegung berechnet sich in Abhängigkeit der Stützweite aus Tabelle 4.1 nach Gleichung 2.60 zu:

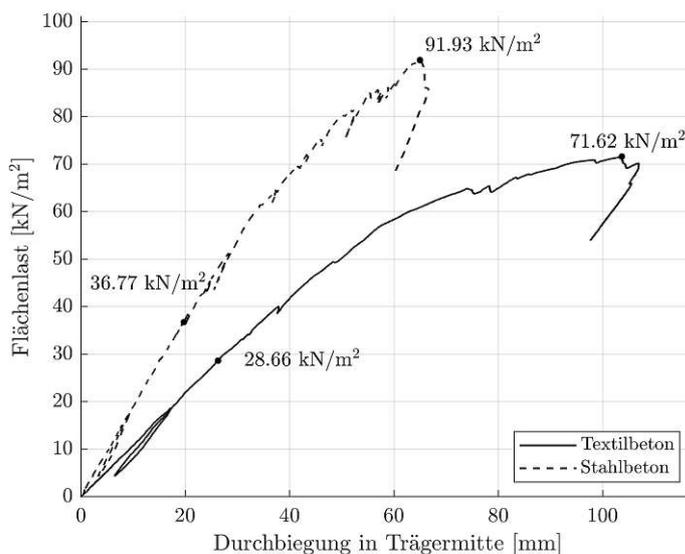


Abb. 4.1: Last-Verformungs-Diagramm des Belastungsversuches

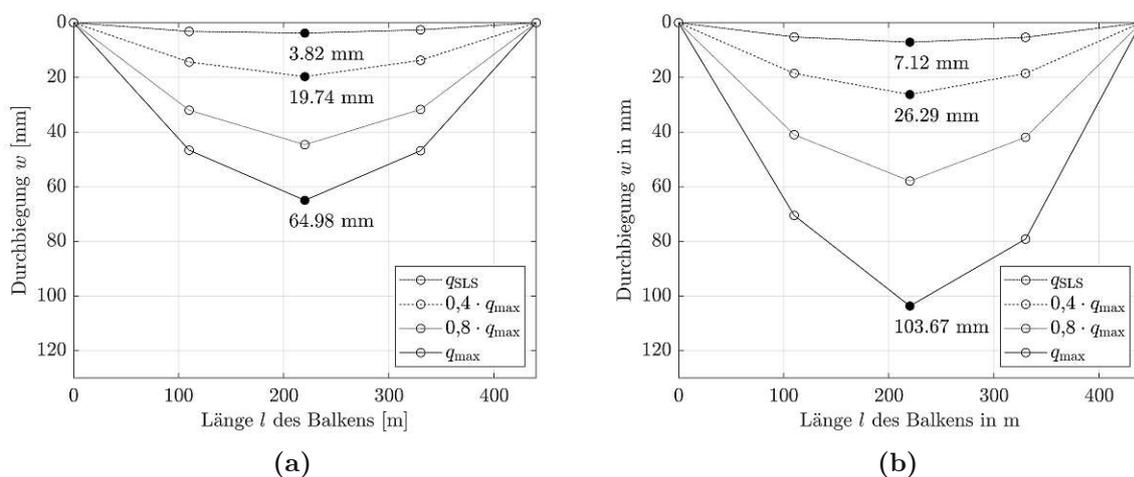


Abb. 4.2: Biegelinie des (a) STB und (b) TXB Versuchskörper

$$w_{\text{inst,max}} = \frac{4,4 \text{ m}}{300} = 14,7 \text{ mm.} \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.3 ist das Last-Verformungs-Diagramm mit den Linien der verschiedenen Biegesteifigkeiten in (a) für die STB-Verbunddecke und in (b) für die TXB-Verbunddecke dargestellt. Die Biegesteifigkeiten für den starren Verbund und ohne Verbund in der Fuge werden nach Gleichung 2.52 und 2.54 berechnet. Die Elastizitätsmodule werden dem Kapitel 3.5 entnommen. Die Breite der Betonplatte ist in Tabelle 4.1 ersichtlich. Für die Breite des Holzquerschnittes wird statt der Gesamtbreite der Versuchskörper [16] die mittlere Breite aus Tabelle 3.1 verwendet. Tabelle 4.2 zeigt die ermittelten Biegesteifigkeiten für den starren Verbund und ohne Verbund in der Fuge.

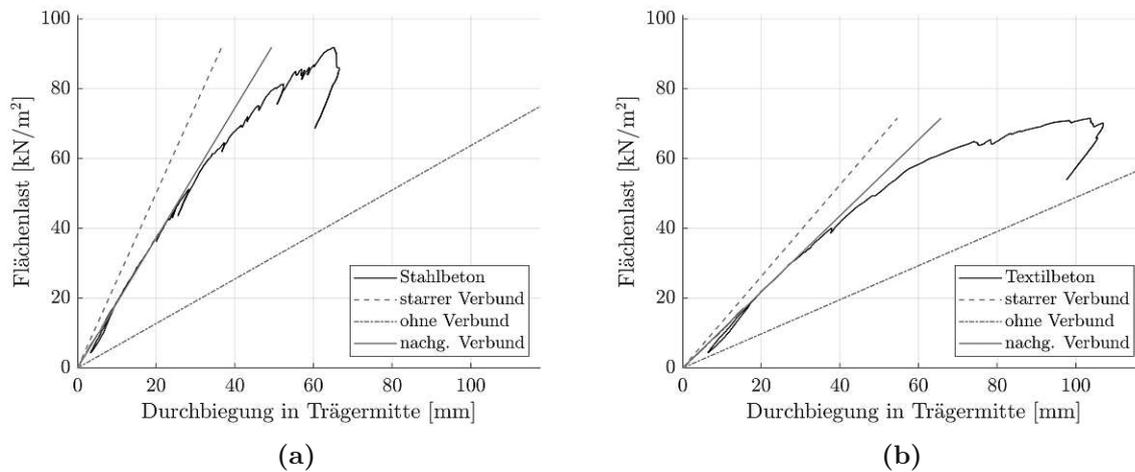
Tab. 4.2: Biegesteifigkeit in den Extremfällen ohne Verbund und starrer Verbund

Bauteil	$EI_{\text{ohne V.}}$ [MNm ²]	$EI_{\text{starrer V.}}$ [MNm ²]
TXB-Verbunddecke	1,214	3,375
STB-Verbunddecke	1,907	7,583

Die effektive Biegesteifigkeit nach Gleichung 2.56 wird aus der Gleichlast $q_{0,4}$ und der zugehörigen Durchbiegung $w_{0,4}$ ermittelt. Da die Gleichlast $q_{0,4}$ als Flächenlast vorliegt, in der Formel aber eine Linienlast benötigt wird, wird der Wert mit der jeweiligen Breite der Verbunddecke gemäß Tabelle 4.1 multipliziert. Schlussendlich kann mit diesen Ergebnissen noch der Verbundwirkungsgrad DCA [31] nach Gleichung 2.57 ermittelt werden. Die Berechnungen werden für die TXB-Verbunddecke beispielhaft angeführt. Die Ergebnisse für beide Versuchskörper sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

$$EI_{\text{eff, TXB}} = \frac{5 \cdot q_{0,4} \cdot b \cdot l^4}{384 \cdot w_{0,4}} = \frac{5 \cdot 28,66 \cdot 0,57 \cdot 4,4^4}{384 \cdot 26,29} = 3,032 \text{ MNm}^2 \quad (4.2)$$

$$DCA_{\text{TXB}} = \frac{EI_{\text{eff}} - EI_{\text{ohne V.}}}{EI_{\text{starrer V.}} - EI_{\text{ohne V.}}} = \frac{3,032 - 1,214}{3,375 - 1,214} = 84,2\% \quad (4.3)$$

**Abb. 4.3:** Biegelinie der (a) STB und (b) TXB Verbunddecke

In Tabelle 4.3 sind die wesentlichen Ergebnisse aus dem Belastungsversuch zusammengefasst.

4.2 Statischer Schwingungsversuch

Im Rahmen des statischen Schwingungsversuches wurden die Verbunddecken mit verschiedenen Laststufen in Trägermitte belastet (siehe Kapitel 3.4.1). Dabei wurde sowohl die aufgebrachte Last F_i als auch die Verformung in der Mitte des Versuchskörpers $w_{\text{stat},i}$ gemessen. Anhand der Gleichung 2.55 kann daraus die effektive Biegesteifigkeit berechnet werden. Betrachtet man

Tab. 4.3: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Belastungsversuch

Bauteil	q_{\max} [kN/m ²]	$q_{0,4}$ [kN/m ²]	w_{\max} [mm]	$w_{0,4}$ [mm]	w_{SLS} [mm]	EI_{eff} [MNm ²]	DCA [%]
TXB-Verbunddecke	71,62	28,66	103,67	26,29	7,12	3,032	84,2
STB-Verbunddecke	91,93	36,77	64,98	19,74	3,82	6,001	72,1

Gleichung 2.26 erkennt man, dass alle nötigen Informationen vorliegen, um in weiterer Folge die erste Eigenfrequenz $f_{0,i}$ bestimmen zu können. Im Nachfolgenden ist die Berechnung beispielhaft für eine Belastungsstufe an der TXB-Verbunddecke dargestellt.

$$EI_{\text{eff},3} = \frac{F_3 \cdot l^3}{48 \cdot w_{\text{stat},3}} = \frac{4,5 \cdot 4,4^3}{48 \cdot 3,04} = 2,74 \text{ MNm}^2 \quad (4.4)$$

$$f_{0,3} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{eff},3}}{\mu}} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,4^2} \cdot \sqrt{\frac{2,74 \cdot 10^6}{485,3/4,7}} = 12,9 \text{ Hz} \quad (4.5)$$

Die Massenbelegung μ ist dabei das Eigengewicht geteilt durch die Länge der Verbunddecke (siehe Tabelle 4.1). Für die Berechnung der anderen Belastungsstufen und der STB-Verbunddecke wird das selbe Schema angewendet. Außerdem wird die Eigenfrequenz zusätzlich noch über die ermittelte effektive Biegesteifigkeit aus dem Belastungsversuch, angegeben in Tabelle 4.3, berechnet.

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse beider Verbunddecken für die verschiedenen Belastungsstufen und deren Mittelwert angegeben. Das Ergebnis der ersten Eigenfrequenz, berechnet aus der im Belastungsversuch bestimmten effektiven Biegesteifigkeit, ist ebenfalls dargestellt.

Da beim statischen Schwingungsversuch die Belastung mittig, also an ungünstigster Stelle bei einem Einfeldträger erfolgte, kann die Durchbiegung, unter der Annahme linear-elastischen Materialverhaltens, für das Steifigkeitskriterium nach EC5 [23] ermittelt werden (siehe Kapitel 2.3.2.2). Im ersten Schritt wird die mitwirkende Breite b_F nach Gleichung 2.64 berechnet. Für die Biegesteifigkeit rechtwinklig zur Deckenspanrichtung wird ausschließlich der Querschnitt der Aufbetonschicht in ungerissenem Zustand (Zustand I) berücksichtigt. Die Biegesteifigkeit in Deckenspanrichtung wurde aus dem Mittelwert der effektiven Biegesteifigkeiten aus dem statischen Schwingungsversuch bestimmt (siehe Tabelle 4.4). Die Berechnung wird beispielhaft für die TXB-Verbunddecke angeführt.

$$b_F = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} = \frac{4,4}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{0,0353}{2,64}} = 1,36 \text{ m} \quad (4.6)$$

$$\text{mit } (EI)_b = E_c \cdot \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} = 27546 \cdot \frac{0,57 \cdot 0,03^3}{12} = 0,0353 \text{ MNm}^2 \quad (4.7)$$

Anschließend wird die auf die mitwirkende Breite b_F anzusetzende Last von $F = 1 \text{ kN}$ auf die tatsächlich vorhanden Breite skaliert.

Tab. 4.4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem statischen Schwingungsversuch

TXB			
Last [kN]	Durchbiegung [mm]	Biegesteifigkeit [MN m ²]	Eigenfrequenz [Hz]
2,87	1,86	2,74	13,21
3,44	2,38	2,57	12,79
4,50	3,04	2,63	12,94
		2,64	12,98
aus Belastungsversuch		3,032	13,90

STB			
Last [kN]	Durchbiegung [mm]	Biegesteifigkeit [MN m ²]	Eigenfrequenz [Hz]
2,02	0,78	4,60	13,09
3,56	1,32	4,79	13,36
4,47	1,52	5,22	13,95
		4,87	13,47
aus Belastungsversuch		6,001	14,96

$$F_{\text{TXB}} = F \cdot \frac{b_{\text{TXB}}}{b_{\text{F}}} = 1 \text{ kN} \cdot \frac{0,57}{1,36} = 0,42 \text{ kN} \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Die Durchbiegung w_{stat} wird schließlich über das Verhältnis von Durchbiegung $w_{\text{stat},1}$ zu Last F_1 aus der ersten Belastungsstufe des statischen Schwingungsversuches berechnet (siehe Tabelle 4.4:

$$w_{\text{stat},\text{TXB}} = w_{\text{stat},1} \cdot \frac{F_{\text{TXB}}}{F_1} = 1,86 \text{ mm} \cdot \frac{0,42}{2,87} = 0,27 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$(4.11)$$

Für die STB-Verbunddecke ergibt sich eine Kraft $F_{\text{STB}} = 0,29 \text{ kN}$ und eine Durchbiegung $w_{\text{stat},\text{STB}} = 0,11 \text{ mm}$.

4.3 Dynamischer Schwingungsversuch

Bei den dynamischen Versuchen wurden die Verbunddecken durch einen Hammerschlag angeregt (siehe Kapitel 3.4.1). Die im Kapitel 3.2 beschriebenen Beschleunigungssensoren erfassten dabei die Antwort der Versuchskörper. Die Messdaten werden in Visual Studio Code mit Python verarbeitet (siehe Anhang A).

Im ersten Schritt werden die Messdaten in die Antworten der einzelnen Anregungen zerlegt. Daraus ergeben sich die Beschleunigungsverläufe infolge eines einzelnen Schlages beziehungsweise

Impulses. Die Antworten der beiden Verbunddecken werden entsprechend der zeitlichen Abfolge der Schläge durchnummeriert. Für die STB-Verbunddecke wurden fünf Schläge aufgezeichnet, für die TXB-Verbunddecke sieben. Abbildung 4.4 zeigt beispielhaft die Auswertung des Beschleunigungssensors D3 in der Mitte des Versuchskörpers infolge der ersten Anregung der TXB-Verbunddecke.

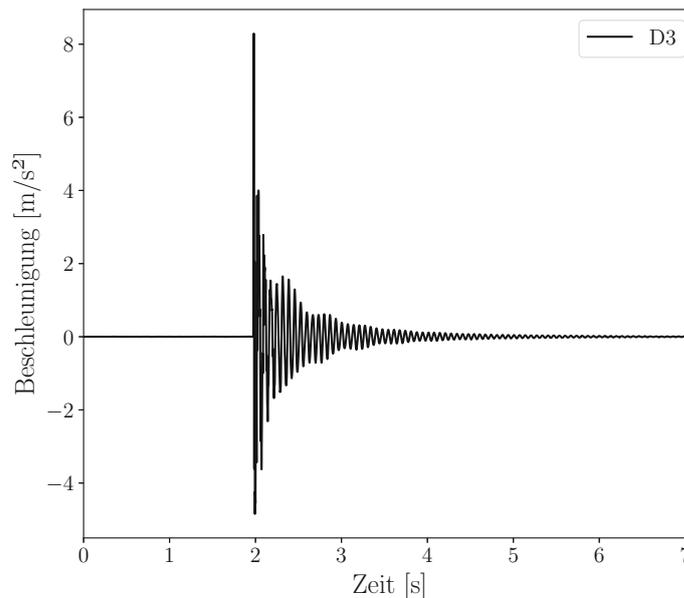


Abb. 4.4: Beschleunigungsverlauf D3 infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke

Die Antwortverläufe der anderen Impulse der TXB-Verbunddecke sowie die der STB-Verbunddecke befinden sich im Anhang B.1.

4.3.1 Eigenfrequenz

Durch die Impulsanregung wurde die Verbunddecke in der Theorie in allen Frequenzen gleichmäßig angeregt. Aufgrund der Übertragungsfunktion (siehe Kapitel 2.1.5) reagiert das System hauptsächlich mit Schwingungen in seinen Eigenformen. Höhere Eigenfrequenzen werden dabei schneller gedämpft, sodass in der Antwort vor allem die tieferen Eigenfrequenzen dominieren.

Um den Frequenzgehalt der Antwort sichtbar zu machen, wurde der zeitliche Verlauf der Beschleunigung mit Hilfe des FFT-Algorithmus vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Der zugehörige Python-Code ist in Anhang C.2 zu finden.

Die Beschleunigungsdaten wurden in einem Zeitintervall von 0,001667 Sekunden erfasst, wobei die Gesamtdauer des vorliegenden Signals 7,12667 Sekunden beträgt. Daraus lassen sich die Abtastfrequenz f_s und die Frequenzbandbreite Δf nach Gleichung 2.33 und 2.34 wie folgt berechnen:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0,001667} = 600 \text{ Hz}, \quad (4.12)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{7,12667} = 0,1403 \text{ Hz}. \quad (4.13)$$

Die Darstellungsgenauigkeit des Frequenzbereichs liegt somit bei 0,1403 Hz. Die maximal aus der Fourier-Transformation ableitbare Frequenz liegt bei $f_s/2 = 300$ Hz.

Abbildung 4.5 zeigt das Frequenzspektrum infolge der ersten Anregung der TXB-Verbunddecke. Die beschrifteten Werte entsprechen der Frequenz mit der maximalen Amplitude, ermittelt aus der Auswertung der Beschleunigungsverläufe D3 und D4 in der Trägermitte.

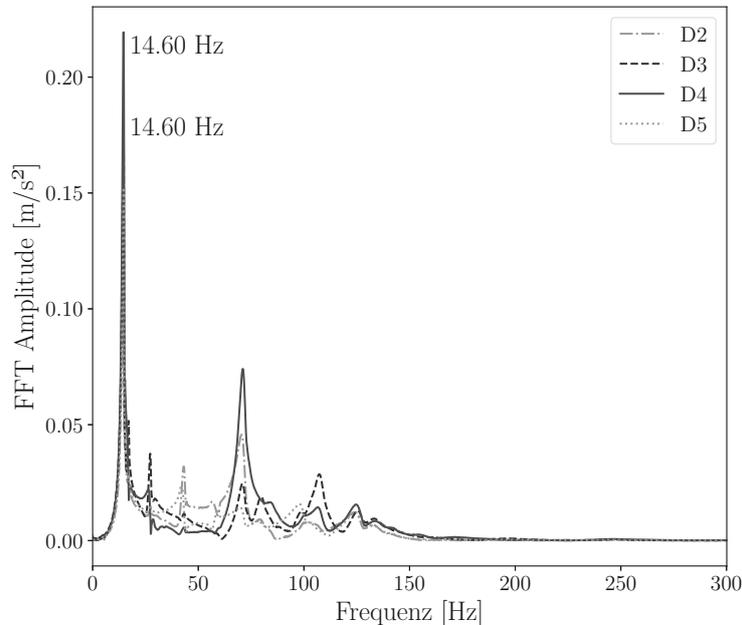


Abb. 4.5: Fouriertransformation der Antwort auf Impuls 1 der TXB-Verbunddecke, aufgezeichnet in der Trägermitte durch die Beschleunigungssensoren D3 und D4 sowie in den Viertelpunkten durch D2 und D5

Das Antwortspektrum zeigt für beide Beschleunigungssensoren in der Mitte der Verbunddecken den ersten Peak bei 14,60 Hz, was der ersten Eigenfrequenz f_0 entspricht. Die Auswertung der weiteren Impulse sowie der Versuche an der STB-Verbunddecke erfolgt nach dem gleichen Verfahren. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang B.1 dargestellt.

In Tabelle 4.5 sind alle ermittelten Werte für die erste Eigenfrequenz f_0 zusammengefasst. Bei Impuls 1 der STB-Verbunddecke und Impuls 7 der TXB-Verbunddecke wichen die ermittelten Werte für die erste Eigenfrequenz f_0 , gemessen durch die Beschleunigungssensoren D3 und D4, geringfügig voneinander ab. In diesen Fällen wurde der Mittelwert in der Tabelle angegeben. Bei allen anderen Impulsen lieferten beide Beschleunigungssensoren in der Mitte der Verbunddecken identische Werte.

Tab. 4.5: Eigenfrequenz aus dem dynamischen Schwingungsversuch

Impuls	Eigenfrequenz f_0 [Hz]	
	TXB	STB
1	14,60	14,23
2	14,47	14,08
3	14,44	14,45
4	14,63	14,79
5	14,69	14,93
6	14,65	-
7	14,83	-
\emptyset	14,62	14,50

4.3.2 Dämpfung

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß wird für den dynamischen Schwingungsversuch über das logarithmische Dekrement und vergleichend über die Annäherung der umhüllenden Exponentialfunktion bestimmt.

4.3.2.1 Logarithmisches Dekrement Λ

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Dämpfung über das logarithmische Dekrement Λ ist in Kapitel 2.1.7.2 erläutert. Bei der Auswertung der Versuchsdaten wird ein Abstand von $10 \cdot T_D$ zwischen den zur Berechnung verwendeten Extremwerten gewählt. Der betrachtete Ausschnitt des Beschleunigungsverlaufs im Ausschwingvorgang wird so gewählt, dass er möglichst störungsfrei ist. Der zugehörige Python-Code zur Auswertung ist in Anhang C.2 zu finden.

Abbildung 4.6 zeigt einen Ausschnitt des Beschleunigungsverlaufs des Beschleunigungssensors D3 nach Impuls 1. Dargestellt ist der Verlauf, beginnend nach der Anregungsstörung, für eine Dauer von einer Sekunde. Die Amplitudenwerte des ersten und zehnten Extremwertes sind in der Darstellung beschriftet.

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ berechnet sich über das logarithmischen Dekrement Λ nach Gleichung 2.46 zu:

$$\zeta_i = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \underbrace{\ln \frac{\dot{x}(t)}{\dot{x}(t+n \cdot T_D)}}_{\text{log. Dekrement } \Lambda} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{10} \cdot \ln \frac{1,650}{0,494} = 1,92\% \quad (4.14)$$

Die Auswertung der weiteren Impulse erfolgt nach dem gleichen Verfahren. Die Abbildungen sind in Anhang B.1 zu finden. Die Ergebnisse des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

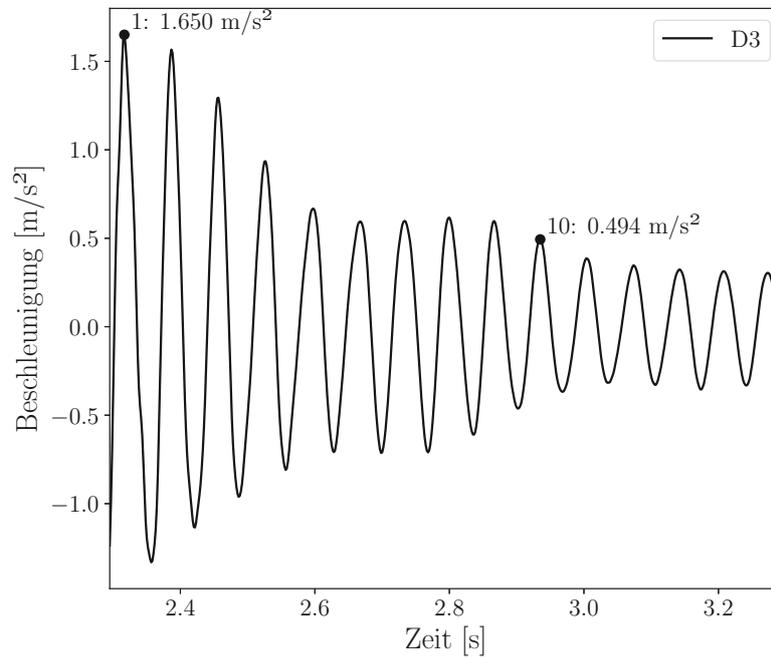


Abb. 4.6: Extremwerte des Beschleunigungsverlaufes infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke

Tab. 4.6: Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ aus dem dynamischen Schwingungsversuch bestimmt über das logarithmische Dekrement Λ

Impuls	Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ [%]	
	TXB	STB
1	1,92	2,56
2	1,93	2,69
3	1,87	2,31
4	2,20	2,00
5	1,64	1,97
6	1,68	-
7	1,58	-
\emptyset	1,83	2,31

4.3.2.2 Umhüllende Exponentialfunktion

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Dämpfung über die umhüllenden Exponentialfunktion ist in Kapitel 2.1.7.2 erläutert. Da die Amplitude beim Ausschwingen der TXB-Verbunddecke in Abbildung 4.6 keine kontinuierliche Abnahme zeigt, wird diese Methode ausschließlich auf die Versuche an der STB-Verbunddecke angewendet.

Für die Annäherung der umhüllenden Exponentialfunktion werden in Gleichung 2.48 die Parameter für die Amplitude a und das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ manuell angepasst. Die Eigenkreisfrequenz ω_0 wird dabei aus den Eigenfrequenzen f_0 in Tabelle 4.5 berechnet:

$$\omega_{0,i} = 2\pi f_{0,i} \quad (4.15)$$

Abbildung 4.7 zeigt die angenäherte Exponentialfunktion an den Ausschwingvorgang infolge Impuls 1 an der STB-Verbunddecke. Der ermittelte Wert des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ ist in der Legende angegeben.

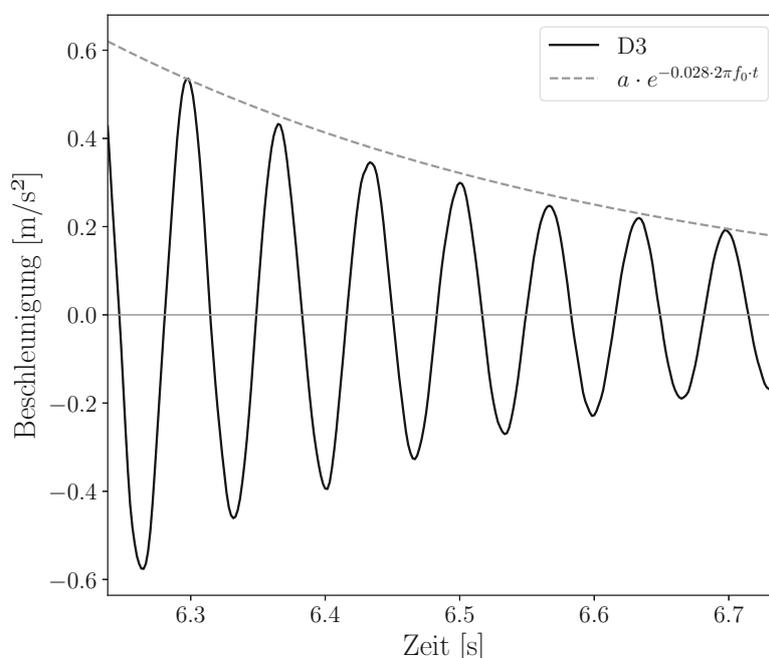


Abb. 4.7: Umhüllende Exponentialfunktion an den Ausschwingvorgang infolge Impuls 1 an der STB-Verbunddecke

Die Plots der Impulse 2-5 an der STB-Verbunddecke sind im Anhang B.1 dargestellt, der Python-Code zur Auswertung befindet sich im Anhang C.2. Die Ergebnisse des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

4.4 Impulshammer

Die Versuche mit dem Impulshammer ähneln den dynamischen Schwingungsversuchen, da die Anregung ebenfalls durch einen Schlag mit einem Hammer erfolgte. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Impulshammer zusätzlich die Anregung aufzeichnete. Die Zeitintervalle der Messdaten des Impulshammers sind identisch mit denen der Beschleunigungssensoren. Die

Tab. 4.7: Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ aus dem dynamischen Schwingungsversuch bestimmt über die Annäherung der Exponentialfunktion

Impuls	Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ [%]
STB	
1	2,8
2	2,9
3	2,5
4	2,1
5	2,1
\emptyset	2,48

Antwort wurde wie zuvor durch die Beschleunigungssensoren an den Verbunddecken gemessen. Somit stehen sowohl Messdaten für die Anregung als auch für die Antwort des Systems zur Verfügung. Insgesamt wurden fünf Schläge an der TXB-Verbunddecke durchgeführt. An der STB-Verbunddecke fanden keine Versuche mit dem Impulshammer statt, da das Equipment nur am Tag des Versuches an der TXB-Verbunddecke zur Verfügung stand. Abbildung 4.8 zeigt den Beschleunigungsverlauf der Anregung und Abbildung 4.9 den Verlauf der Antwort. Bei der Auswertung wurde nur der Beschleunigungssensor D3 in der Mitte der Verbunddecke berücksichtigt.

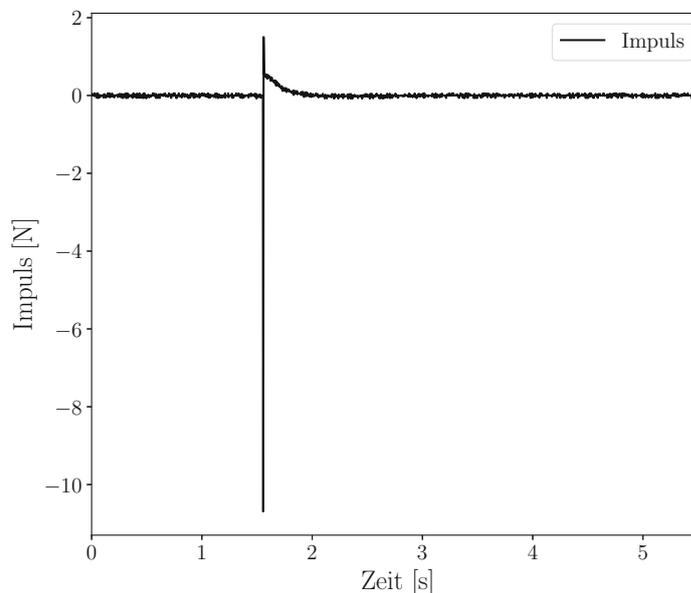


Abb. 4.8: Beschleunigungsverlauf der Anregung infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke

Die Beschleunigungsverläufe der anderen Impulse befinden sich im Anhang B.2.

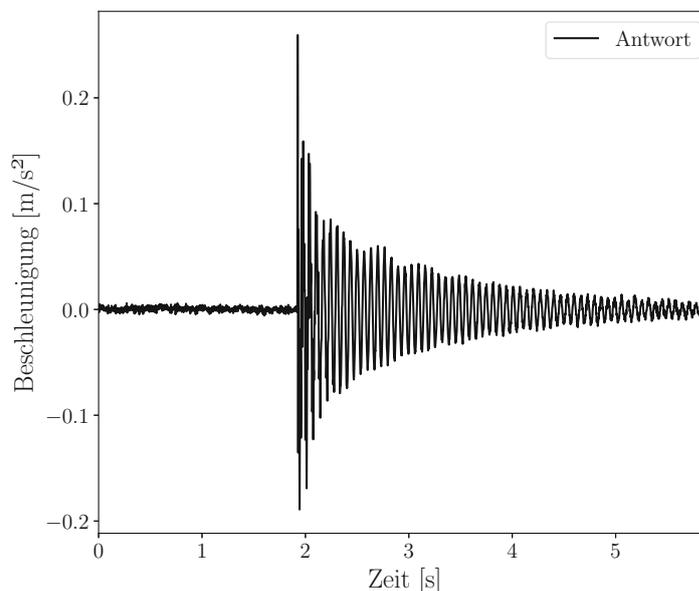


Abb. 4.9: Beschleunigungsverlauf der Antwort infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke

4.4.1 Eigenfrequenz

Die Bestimmung der Eigenfrequenz erfolgt wie beim dynamischen Versuch durch Fouriertransformation. Zusätzlich zur Analyse der Antwort der Versuchskörper wird hier auch die Fouriertransformation der Anregung durchgeführt (siehe Abbildung 4.10). Von den Messdaten wird jeweils der selbe Zeitbereich ausgewertet. Der Python-Code dazu ist im Anhang C.3 zu finden. Die Abtastfrequenz f_s und die Frequenzbandbreite Δf entsprechen den Werten aus Kapitel 4.3.1.

Das Antwortspektrum der Antwort in Abbildung 4.11 zeigt den ersten Peak bei 15,88 Hz, was der ersten Eigenfrequenz f_0 entspricht. Die Auswertung der weiteren Impulse erfolgt nach dem gleichen Verfahren. Die Abbildungen dazu sind im Anhang B.2 dargestellt.

In Tabelle 4.8 sind alle ermittelten Werte für die erste Eigenfrequenz f_0 zusammengefasst.

Tab. 4.8: Eigenfrequenz aus den Impulshammer-Versuchen

Impuls	Eigenfrequenz f_0 [Hz]
TXB	
1	15,88
2	14,94
3	15,88
4	14,94
5	14,94
\emptyset	15,32

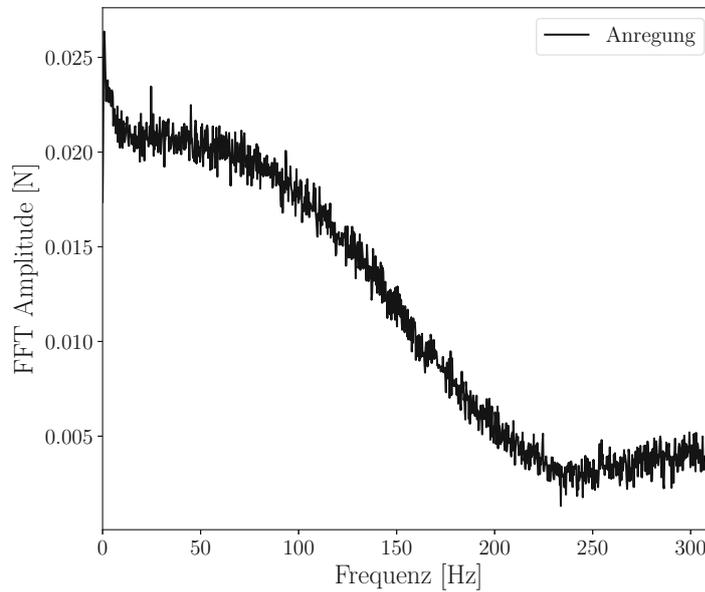


Abb. 4.10: Fouriertransformation der Anregung infolge Impulse 1 der TXB-Verbunddecke

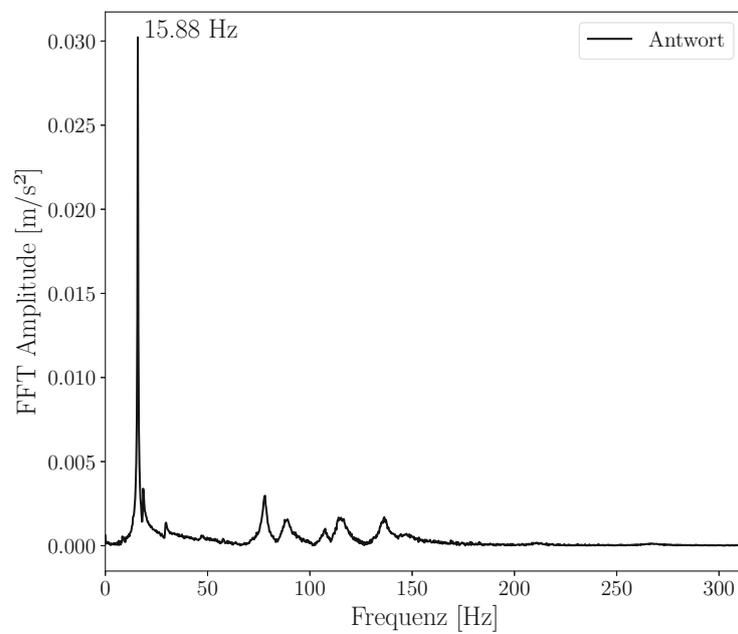


Abb. 4.11: Fouriertransformation der Antwort infolge Impulse 1 der TXB-Verbunddecke

4.4.2 Dämpfung

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß wurde für die Anregungen mit dem Impulshammer über die Bandbreitenmethode bestimmt.

4.4.2.1 Bandbreitenmethode

Mit Hilfe der fouriertransformierten Anregung $F(f)$ und der fouriertransformierten Antwort $X(f)$ aus Kapitel 4.4.1 kann die Übertragungsfunktion $H(f)$ nach Gleichung 2.36 berechnet werden. In weiterer Folge wird die Bandbreitenmethode auf die erste Eigenfrequenz f_0 angewendet (vgl. Kapitel 2.1.7.2). Im ersten Schritt werden aus der Übertragungsfunktion die beiden Frequenzen $f_{1/2}$, die zu den Amplituden $\frac{H(f_0)}{\sqrt{2}}$ gehören, ermittelt. Die wesentlichen Bestandteile des Python-Codes dazu sind in Anhang C.3 zu finden. In Abbildung 2.51 ist die Übertragungsfunktion inklusive der Frequenzen $f_{1/2}$ für den ersten Impulshammerschlag dargestellt. Die Abbildungen der weiteren Impulse sind in Anhang B.2 dargestellt.

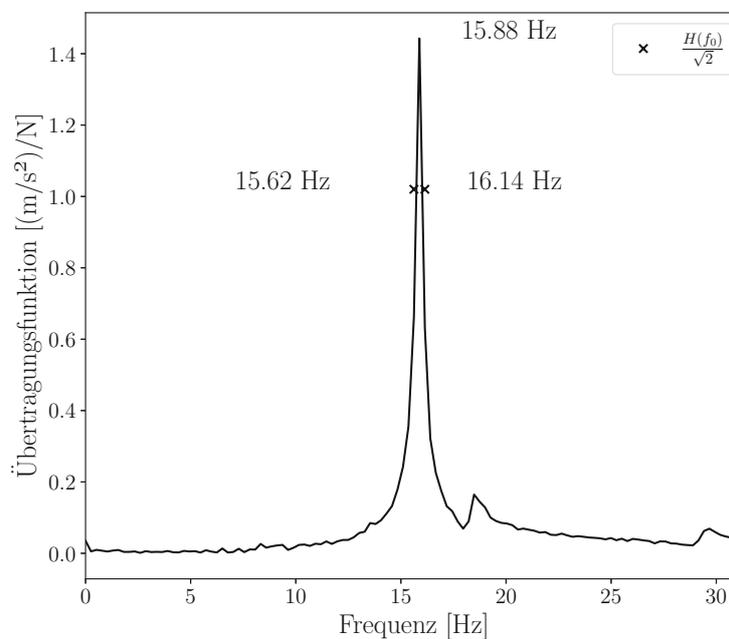


Abb. 4.12: Übertragungsfunktion infolge Impuls 1 der TXB-Verbunddecke

Mit Hilfe der beiden Frequenzen $f_{1/2}$ wird die Dämpfung nach Gleichung 2.51 ermittelt.

$$\zeta \approx \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} = \frac{16,14 - 15,62}{16,14 + 15,62} = 1,64\% \quad (4.16)$$

Die Auswertung der Impulse 2-5 erfolgt nach dem gleichen Schema. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß ergibt sich schlussendlich bei allen fünf Versuchen zu 1,64 %.

4.5 Finite-Elemente Berechnung

Für eine tiefere Analyse des Tragverhaltens der untersuchten Versuchskörper und zur Erweiterung des Parameterraums wird ein Modell basierend auf der FE-Methode erstellt. Die verwendete Software RFEM von der Firma Dlubal ist im Anhang A angeführt.

4.5.1 Modellierung der Versuchskörper

Die Geometrie des FE-Modells ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Spannweite, die Gesamtlänge und die Breite der Versuchskörper wird dabei aus Tabelle 4.1 entnommen. Die Auflager sind, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, auf einer Seite als Fixlager und auf der anderen als Gleitlager definiert.

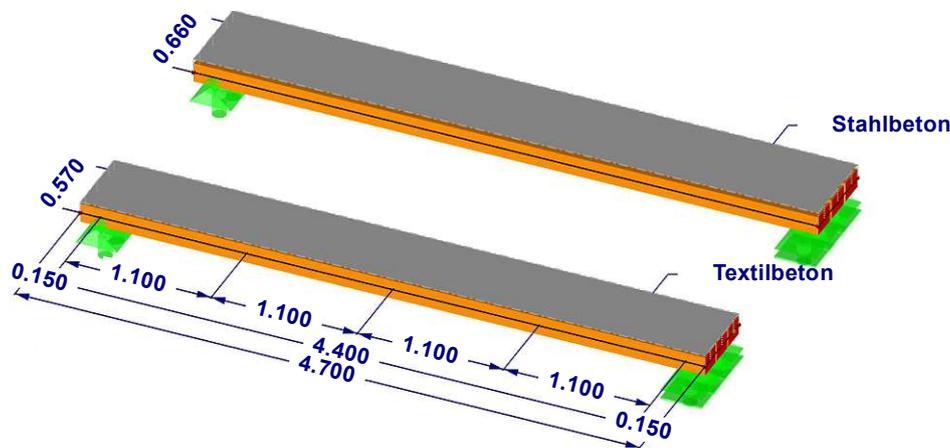


Abb. 4.13: Geometrie des FE-Modells

Die Dimpelbäume werden als Biegeträger mit einem Rechteckquerschnitt modelliert, wobei jeweils die mittlere Höhe h und Breite b gemäß Tabelle 3.1 angesetzt werden. Die Aufbetonplatten werden als Fläche mit einer Dicke d von 3 cm für das TXB-Modell und 7 cm für das STB-Modell modelliert. Die Materialparameter werden entsprechend den Tabellen 3.3 und 3.4 eingestellt.

Da die Aufbetonschicht über den Dimpelbäumen liegt, wird die Fläche, die zunächst im Modell in der Ebene der Schwerlinie der Holzträger eingegeben wurde, durch die Festlegung einer Exzentrizität verschoben. Die Exzentrizität $e_{z,\text{TXB}}$ für das TXB-Modell wird wie folgt berechnet:

$$e_{z,\text{TXB}} = \frac{h_{\text{TXB}} + d_{\text{TXB}}}{2} = \frac{14,8 + 3}{2} = 8,9 \text{ cm.} \quad (4.17)$$

Für das STB-Modell ergibt sich eine Exzentrizität von $e_{z,\text{STB}} = 11 \text{ cm}$.

Die Verbundsteifigkeit der Fuge wird für das FE-Modell über Gleichung 2.58 und 2.59 bestimmt. Die effektive Einbindelänge l_{eff} ergibt sich aus der Gesamtlänge der Schrauben unter einem Winkel von 45° (Kapitel 3.5.4) und der Dicke d der Aufbetonschicht, abzüglich 1 cm (vgl. Kapitel 3.3.3) bei der TXB-Verbunddecke zu $l_{\text{eff}} = 151,8 \text{ mm}$. Die Anzahl der Verbindungsmittel pro Meter und Dimpelbaum beträgt in den äußeren Vierteln der Verbunddecke 10 und in der

Mitte 5 (siehe Abbildung 3.1). Die Berechnung wird exemplarisch für die äußeren Bereiche der TXB-Verbunddecke durchgeführt.

$$K_{\text{ser,TXB}} = 100 \cdot l_{\text{eff}} \cdot n = 100 \cdot 151,8 \cdot 10 = 151\,800 \text{ kN/m}^2 \quad (4.18)$$

Für die STB-Verbunddecke ergibt sich für die äußeren Viertel $K_{\text{ser,STB}} = 101\,000 \text{ kN/m}^2$. Die Werte für den mittleren Teil betragen jeweils $K_{\text{ser}}/2$. Die Verschiebungsmodul K_{ser} werden im FE-Modell durch die Definition der Federsteifigkeit in Achsrichtung bei einer Linienfreigabe der drei Biegeträger eingegeben. Um ein ausreichend dichtes FE-Netz zu gewährleisten, wird für die FE-Elemente eine angestrebte Elementlänge von 0,05 m festgelegt. Da im FE-Modell effektive Querschnitte verwendet werden, ist dessen Gewicht geringer als das gemessene Gewicht der Versuchskörper. Die Differenz wird für die dynamische Berechnung mit dem Zusatzmodul RF-DYNAM Pro als Flächenlast in das Modell eingebracht. Die Durchbiegung w_{SLS} wird durch die Eingabe einer Flächenlast von $q_{\text{SLS}} = 5 \text{ kN/m}^2$ ermittelt. Für das Steifigkeitskriterium nach EC5 [23] wird die Durchbiegung w_{stat} durch Aufbringen der in Kapitel 4.2 bestimmten Kräfte in der Modell-Mitte berechnet.

Die Ergebnisse sind in Tabelle zusammengestellt.

Tab. 4.9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem FE-Modell

Modell	Eigenfrequenz f_0 [Hz]	Durchbiegung w_{SLS} [mm]	Durchbiegung w_{stat} [mm]
TXB	13,51	4,95	0,278
STB	14,41	2,95	0,100

4.5.2 Parametervariation auf baupraktische Spannweiten

Um das Verhalten der Dippelbaumdecken im Bereich der typischen Spannweiten in Gründerzeithäusern bewerten zu können, wird nachfolgend die Bauteillänge im FE-Modell variiert. Laut [14] betragen die Spannweiten maximal 6 m. Da die Höhe der Dippelbäume der Versuchskörper mit ca. 15 cm im unteren Bereich der üblichen Dimensionen liegt (vgl. Kapitel 1), wird eine Spannweite von 5,5 m gewählt. Die Federsteifigkeit und damit das Schraubenlayout werden analog zum Modell der Versuchsträger gewählt. Das bedeutet, dass in den äußeren Vierteln der Spannweite alle 10 cm und in der Mitte alle 20 cm eine Schraube angesetzt wird.

In Tabelle 4.10 sind die Ergebnisse aus dieser Berechnung zusammengestellt.

Tab. 4.10: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Längenvariation

Modell	Eigenfrequenz f_0 [Hz]	Durchbiegung w_{SLS} [mm]	Durchbiegung w_{stat} [mm]
TXB	8,89	11,44	0,41
STB	9,65	6,60	0,14

Kapitel 5

Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 4 gewonnenen Ergebnisse interpretiert und anhand der Vorgaben aus EC5 [23] bewertet (vgl. Kapitel 2.3).

5.1 Belastungsversuch

Die Ergebnisse des Belastungsversuches sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

In Gleichung 4.1 ist der Grenzwert der Durchbiegung $w_{\text{inst,max}}$ für die Spannweite der Versuchskörper berechnet. Obwohl die TXB-Verbunddecke mit $w_{\text{SLS}} = 7,12$ mm im Vergleich zur STB-Verbunddecke mit $w_{\text{SLS}} = 3,82$ mm eine deutlich größere Verformung aufweist, wird der Grenzwert der Durchbiegung nach EC5 [23] bei beiden Verbunddecken eingehalten. Die Durchbiegung w_{SLS} liegt in beiden Fällen deutlich unter dem Grenzwert von $w_{\text{inst,max}} = 14,7$ mm.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit zeigen die Versuche, dass die maximale Belastung q_{max} beider Verbunddecken deutlich über den typischen Belastungen in Wohn- und Bürogebäuden liegen [16].

Der Grad der Verbundsteifigkeit DCA [31] ist bei der TXB-Verbunddecke mit 84,2% etwas höher als bei der STB-Verbunddecke mit 72,1%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anordnung der Schrauben bei beiden Decken identisch gewählt wurde. Dadurch ist die Einbindetiefe der Schrauben in die TXB-Verbunddecke um ca. 5 cm größer als bei der STB-Verbunddecke. Somit ist auch die Steifigkeit in der Fuge nach Gleichung 2.58 größer. Außerdem ist die Biegesteifigkeit der TXB-Verbunddecke geringer als die der STB-Verbunddecke, was zu einem höheren DCA führt [16].

5.2 Statischer Schwingungsversuch

Die Ergebnisse des statischen Schwingungsversuchs sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Der Mittelwert der Eigenfrequenz f_0 beträgt für die TXB-Verbunddecke 12,98 Hz und für die STB-Verbunddecke 13,47 Hz. Somit überschreiten beide den Grenzwert für Deckenklasse I von 8 Hz und erfüllen somit das Frequenzkriterium.

Die Durchbiegung w_{stat} der STB-Verbunddecke beträgt 0,11 mm und erfüllt somit das Steifigkeitskriterium für Deckenklasse I mit einem Grenzwert von $w_{\text{stat}} \leq 0,25$ mm. Bei der TXB-Verbunddecke liegt die Durchbiegung bei 0,27 mm und erfüllt somit das Steifigkeitskriterium für Deckenklasse II mit einem Grenzwert von $w_{\text{stat}} \leq 0,5$ mm.

Zu beachten ist, dass bei der Berechnung der mitwirkenden Plattenbreite für die Biegesteifigkeit in Querrichtung nur die Aufbetonplatte berücksichtigt wurde. Wie in Kapitel 1 beschrieben, weisen Dippelbaumdecken in der Regel eine Verdübelung in Längsrichtung auf, wodurch eine gewisse Biegesteifigkeit in Querrichtung entsteht. Dies würde im Hinblick auf das Steifigkeitskriterium zu einer geringeren Durchbiegung führen. Eine genauere Untersuchung dieses Effekts ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.3 Dynamischer Schwingungsversuch

Das Frequenzkriterium für die Deckenklasse I ist $f_0 \geq 8$ Hz. Betrachtet man die Mittelwerte der ersten Eigenfrequenz f_0 der beiden Verbunddecken in Tabelle 4.5, so zeigt sich, dass sowohl die TXB-Verbunddecke mit 14,62 Hz als auch die STB-Verbunddecke mit 14,50 Hz das Frequenzkriterium erfüllen (siehe Tabelle 4.5).

Die ermittelten Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ liegen mit 1,83% für die TXB-Verbunddecke und mit 2,40% für die STB-Verbunddecke im Bereich der typischen Werte für Holz- bzw. Betonkonstruktionen (siehe Tabelle 2.1). Für den Wert der STB-Verbunddecke sind die Ergebnisse für das Lehr'sche Dämpfungsmaß aus der Bestimmung über das logarithmische Dekrement (siehe Tabelle 4.6) sowie aus der Annäherung der Exponentialfunktion (siehe Tabelle 4.7) gemittelt.

Der Verlauf des Ausschwingvorgangs der TXB-Verbunddecke in Abbildung 4.6 zeigt im Gegensatz zur STB-Verbunddecke, dass die Amplituden nicht gleichmäßig exponentiell abnehmen. Dies deutet darauf hin, dass der Versuchskörper nicht ausschließlich in seiner ersten Eigenfrequenz ausschwingt. Die Methoden zur Bestimmung der Dämpfung basieren jedoch auf der Annahme des Ausschwingens in einer Eigenform, weshalb die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren sind.

5.4 Impulshammer

Das Antwortspektrum der Anregung in Abbildung 4.10 zeigt nicht den erwarteten konstanten Verlauf (vgl. Gleichung 2.39). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der Impulshammer nicht optimal auf die Masse der Versuchskörper abgestimmt war. Vergleicht man die Beschleunigungsverläufe des dynamischen Versuchs in Anhang B.1 mit denen des Impulshammerversuchs in Anhang B.2, so erkennt man, dass die Amplituden und damit die Anregung beim Impulshammer um mehr als ein Zehntel geringer sind. Aufgrund dieser nicht optimalen Anregung sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren.

Der Mittelwert der erste Eigenfrequenz f_0 der TXB-Verbunddecke aus dem Impulshammerversuchen beträgt 15,32 Hz (siehe Tabelle 4.8). Somit ist das Frequenzkriterium nach EC5 für Deckenklasse I mit dem Grenzwert von 8 Hz erfüllt.

Der ermittelten Werte des Lehr'schen Dämpfungsmaßes ζ aus der Bestimmung über die Bandbreitenmethode beträgt 1,64%. Dieser liegt im Bereich der typischen Werte aus Tabelle 2.1.

5.5 Finite-Elemente Berechnung

5.5.1 Modellierung der Versuchskörper

Die Ergebnisse des FE-Modells zeigen ähnliche Ergebnisse wie die der experimentellen Untersuchung und sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

Die Durchbiegung unter Last q_{SLS} beträgt für die STB-Verbunddecke $w_{SLS} = 2,95$ mm und für die TXB-Verbunddecke 4,95 mm. Die Durchbiegungen w_{SLS} liegen in beiden Fällen deutlich unter dem Grenzwert von $w_{inst,max} = 14,7$ mm.

Das Frequenzkriterium für die Deckenklasse I gilt als erfüllt, wenn $f_0 \geq 8$ Hz. Die erste Eigenfrequenz f_0 der TXB-Verbunddecke beträgt 13,55 Hz und die der STB-Verbunddecke 14,55 Hz. Das Kriterium ist somit erfüllt.

Das Steifigkeitskriterium in Deckenklasse I mit $w_{stat} \leq 0,25$ mm ist für die STB-Verbunddecke mit einer Durchbiegung $w_{stat} = 0,1$ mm erfüllt. Die Durchbiegung $w_{stat} = 0,278$ mm der TXB-Verbunddecke erfüllt das Kriterium für Deckenklasse II mit $w_{stat} \leq 0,5$ mm.

Wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, wurde bei der Berechnung der Durchbiegung w_{stat} die zusätzliche Biegesteifigkeit in Querrichtung durch die Verdübelung der Dippelbäume nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieses Effekts würde zu einer geringeren Durchbiegung führen.

5.5.2 Parametervariation auf baupraktische Spannweiten

Durch ein Anpassen des FE-Modells, werden die erforderlichen Werte für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise nach EC5 [23] für eine Spannweite von 5,5 m ermittelt. Diese sind in Tabelle 4.10 dargestellt.

Der zulässige Grenzwert für die Durchbiegung ergibt sich nach Gleichung 2.60 für die erweiterte Spannweite zu $w_{\text{inst,max}} = 18,3$ mm. Dieser wird sowohl von der STB-Verbunddecke mit einer Durchbiegung von $w_{\text{SLS}} = 6,48$ mm als auch von der TXB-Verbunddecke mit 11,38 mm eingehalten.

Die ersten Eigenfrequenz für die STB-Verbunddecke beträgt 9,73 Hz und für die TXB-Verbunddecke 8,91 Hz. Somit überschreiten beide den Grenzwert für Deckenklasse I von 8 Hz und erfüllen somit das Frequenzkriterium.

Hinsichtlich des Steifigkeitskriteriums erreicht die STB-Verbunddecke mit einer Durchbiegung von $w_{\text{stat}} = 0,14$ mm die Anforderungen der Deckenklasse I mit $w_{\text{stat}} \leq 0,25$ mm. Die TXB-Verbunddecke weist eine Durchbiegung von $w_{\text{stat}} = 0,41$ mm auf und erfüllt damit die Anforderungen der Deckenklasse II mit $w_{\text{stat}} \leq 0,50$ mm.

5.6 Zusammenfassung

In Tabelle 5.1 sind alle Ergebnisse zusammengefasst. Dabei ist jeweils der Mittelwert der einzelnen Auswertungen aus Kapitel 4 angegeben.

Tab. 5.1: Zusammenfassung der Ergebnisse

	TXB				STB			
	w_{SLS} [mm]	w_{stat} [mm]	f_0 [Hz]	ζ [%]	w_{SLS} [mm]	w_{stat} [mm]	f_0 [Hz]	ζ [%]
Belastungsversuch	7,12	-	13,90	-	3,82	-	14,96	-
stat. Schwingungsversuch	-	0,27	12,98	-	-	0,11	13,47	-
dyn. Schwingungsversuch	-	-	14,62	1,83	-	-	14,50	2,40
Impulshammer	-	-	15,32	1,64	-	-	-	-
FE-Modell	4,95	0,278	13,51	-	2,95	0,10	14,41	-

Der größte Unterschied tritt bei der Ermittlung der Durchbiegung w_{SLS} zwischen dem Belastungsversuch und dem FE-Modell auf, wobei eine Abweichung von etwa 30% festgestellt wurde. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass beim FE-Modell idealisierte Querschnitte mit durchgehend gleichen Materialeigenschaften ohne Störstellen angenommen wurden. Zudem wurde die Federsteifigkeit der Verbundfuge auf Basis der Zulassung der Schrauben definiert, wobei Äste oder andere Unebenheiten der Dippelbäume nicht berücksichtigt wurden.

Im Gegensatz dazu weisen die Werte für die Eigenfrequenz f_0 und die statische Durchbiegung w_{stat} eine deutlich geringere Abweichung von etwa 10% auf und haben somit eine bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment.

Die Ergebnisse der ersten Eigenfrequenz f_0 aus dem statischen und dynamischen Schwingungsversuch zeigen eine Differenz von rund 10%. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnung der Eigenfrequenz im statischen Versuch unter der Annahme eines idealen Einfeldträgers mit konstanter Biegesteifigkeit erfolgte, was in der Realität nicht exakt gegeben ist.

Die aufgrund der Impulshammerversuche ermittelte Eigenfrequenz f_0 wurde, wie beim dynamischen Schwingungsversuch, durch eine Fourier-Transformation der Beschleunigungsantwort des Versuchskörpers auf einen Impuls bestimmt. Die Werte weisen eine Abweichung von 15% auf. Wie bereits in Kapitel 5.4 erläutert, war die Anregung durch den Impulshammer nicht optimal, was die Abweichungen erklären könnte.

Alle ermittelten Werte erfüllen die Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeitsnachweise gemäß EC5, wodurch die dünne, basaltbewehrte Aufbetonschicht als eine praktikable und ressourcenschonende Sanierungsvariante für Dippelbaumdecken betrachtet werden kann.

Kapitel 6

Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war, die Anwendung einer dünnen Basalt-textilbewehrten Aufbetonschicht zur Verstärkung von Dippelbaumdecken, die häufig im obersten Geschoss in Wiener Gründerzeithäusern anzutreffen sind, zu untersuchen. Dazu wurden experimentelle Untersuchungen an jeweils einem Deckenstreifen durchgeführt, der nach dieser neuen Methode hergestellt wurde, sowie mit der bereits erprobten Sanierungsmaßnahme einer STB-Aufbetonschicht. Zusätzlich wurden die Versuchskörper in einem FE-Modell nachgebildet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Aufgrund der guten Übereinstimmung wurde mit Hilfe des FE-Modells eine Untersuchung an typischen Spannweiten bestehender Dippelbaumdecken durchgeführt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen sowie die erstellten FE-Modelle lassen den Schluss zu, dass eine dünne Aufbetonschicht mit Basalt-Textilbewehrung hinsichtlich Tragfähigkeit und Schwingungsverhalten eine ressourcenschonende Verstärkungsoption darstellt. Obwohl die STB-Verbunddecke in allen Gebrauchstauglichkeitsnachweisen bessere Werte als die TXB-Verbunddecke aufweist, erfüllen beide den Grenzwert der Durchbiegung und das Frequenzkriterium für die Deckenklasse I. Lediglich das Steifigkeitskriterium wird von der TXB-Verbunddecke in der Deckenklasse II erfüllt, während die STB-Verbunddecke auch hier die Anforderungen der Deckenklasse I erfüllt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Biegesteifigkeit in Querrichtung zufolge Verdübelung der Dippelbäume nicht berücksichtigt wurde.

Im direkten Vergleich der TXB-Verbunddecke mit der STB-Verbunddecke zeigt sich, dass die Biegesteifigkeit um ca. 50% reduziert ist, was aufgrund der geringeren Höhe der TXB-Aufbetonschicht und der etwas geringeren Höhe der Dippelbäume des TXB-Versuchskörpers zu erwarten war. Die Unterschiede im dynamischen Verhalten sind aufgrund der gleichzeitig geringeren Masse der TXB-Verbunddecke aber deutlich geringer. Die Unterschiede bei der ersten Eigenfrequenz f_0 liegen unter 10% und beim Lehr'schen Dämpfungsmaß ζ bei ca. 25%. Der Vergleich der Massen der Versuchskörper zeigt, dass die TXB-Verbunddecke um ca. 30% leichter ist, wodurch etwaige Verstärkungsmaßnahmen an der bestehenden Tragstruktur entfallen können.

Die Betrachtung üblicher Spannweiten zeigt ähnliche Ergebnisse. Auch hier werden die Gebrauchstauglichkeitsnachweise für beide Decken erfüllt, wobei für das Steifigkeitskriterium das TXB-Modell nur die Kriterien der Deckenklasse II erfüllt.

Diese Ergebnisse zeigen das Potential dieser neuen Sanierungsmethode für Dippelbaumdecken. Abschließend ist anzumerken, dass in weiterführenden Untersuchungen noch auf das Langzeitverhalten und die horizontale Lastabtragung einzugehen ist.

Literatur

- [1] Adolf Würth GmbH Co. KG. *HOLZ-BETON-VERBUND Konstruktionsvarianten und Anwendungsempfehlungen; 1. Auflage*. 2021. URL: https://media.witglobal.net/stmedia/wuerth/documents/documents/LANG_de/56274968.pdf (Zugriff am 30.09.2024).
- [2] Brüel Kjøer. *Product Data, Impact Hammer — Type 8202*. en.
- [3] A. K. Chopra. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. en. 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2012. ISBN: 978-0-13-285803-8.
- [4] *DIN 1055: Lastannahmen für Bauten, Teil 4: Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken*. de. Deutsches Institut für Normung, Aug. 1986.
- [5] M. Drmota, B. Gittenberger, G. Karigl und A. Panholzer. *Mathematik für Informatik*. de. Heldermann Verlag, 2014. ISBN: 978-3-88538-117-4.
- [6] *ETA-13/0029 vom 11/07/2017: ASSY plus VG-Schrauben, Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung in HolzBeton-Verbundbauteilen*. de. Juli 2017.
- [7] B. F. GmbH. *Technisches Datenblatt TDB – Basalt Bewehrungsnetz 21x21 (Geogrid / Mesh)*. URL: https://www.basalt-fibertec.ch/media/attachments/2024/01/13/030_tdb_bewehrungsnetze_21.pdf (Zugriff am 07.03.2025).
- [8] P. Hamm. „Ein Beitrag zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Holz“. de. Dissertation. München: TU München, 2003.
- [9] P. Hamm und A. Richter. *Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken*. de. Stuttgart, 2009.
- [10] K. Holschemacher, S. Klotz und S. Köhler. „Verbunddecken aus Stahlfaserbeton und Holz“. en. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99.1 (Jan. 2004), S. 10–15. ISSN: 0005-9900, 1437-1006. DOI: 10.1002/best.200490001. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.200490001> (Zugriff am 04.09.2024).
- [11] K. Holschemacher, R. Selle, J. Schmidt und H. Kieslich. „Holz-Beton-Verbund“. de. In: *Beton-Kalender 2013*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, S. 241–287. ISBN: 978-3-433-60259-1. DOI: 10.1002/9783433602591.ch10. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%209783433602591.ch10> (Zugriff am 04.09.2024).
- [12] T. Huber. „Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit bestehender Stahlbetonplattenbrücken mit Aufbiegungen“. Dissertation. Wien: TU Wien, 2019.
- [13] H. Jäger, R. Mastel und M. Knaebel. *Technische Schwingungslehre*. de. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-13792-2 978-3-658-13793-9. DOI: 10.1007/978-3-658-13793-9. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-13793-9> (Zugriff am 24.01.2025).
- [14] A. Kolbitsch. „Hölzerne Deckenkonstruktionen“. In: *Altbaukonstruktionen: Charakteristika Rechenwerte Sanierungsansätze*. Vienna: Springer Vienna, 1989, S. 97–112. ISBN: 978-3-7091-9033-3. DOI: 10.1007/978-3-7091-9033-3_5. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9033-3_5.

- [15] T. Krapfenbauer. *Bautabellen*. de. Verlag Jugend & Volk GmbH, 2013. ISBN: 978-3-7100-2872-4.
- [16] S. Leitner. „Thin concrete-timber-composite floors reinforced with basalt textile“. en. In: *Environmentally Friendly Technologies and Structures - Focusing on Sustainable Approaches*. IABSE Symposium 2025. Tokyo, Japan, 2025.
- [17] Luna Innovations. *ODiSI 6000 Series*. 2022. URL: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/data-sheet/Luna%20DiSI%206000%20Data%20Sheet.pdf> (Zugriff am 16. 10. 2024).
- [18] B. Mahltig. „Basalt Fibers“. en. In: *Inorganic and Composite Fibers*. Elsevier, 2018, S. 195–217. ISBN: 978-0-08-102228-3. DOI: 10.1016/B978-0-08-102228-3.00009-8. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081022283000098> (Zugriff am 25. 02. 2025).
- [19] E. Mohamed. „Analyse von Methoden zur Ermittlung der Lehr’schen Dämpfung im Zeit- und Frequenzbereich“. de. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2019.
- [20] nerve-sensors.com. *EpsilonSensor*. URL: https://nerve-sensors.com/wp-content/uploads/2024/10/EpsilonSensor_DE.pdf (Zugriff am 06. 03. 2025).
- [21] *ÖNORM B 1991-1-1:2020-12-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Austrian Standards, Feb. 2015.
- [22] *ÖNORM B 1991-1-1:2020-12-01: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht, Nutzlasten im Hochbau*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2020.
- [23] *ÖNORM B 1995-1-1:2019-06-01: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktionen von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1*. de. Wien: Austrian Standards, Juni 2019.
- [24] *ÖNORM B 4710-3:2023 01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 3: Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*. de. Wien: Austrian Standards, Jan. 2023.
- [25] *ÖNORM EN 12390-3:2021 09: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. de. Wien: Austrian Standards, Sep. 2021.
- [26] *ÖNORM EN 12390-3:2024 05: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. de. Wien: Austrian Standards, Nov. 2019.
- [27] *ÖNORM EN 12390-6:2024 05: Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*. de. Wien: Austrian Standards, Mai 2024.
- [28] A. Pech, A. Kolbitsch und F. Zach. *Baukonstruktionen Band 5 – Decken*. de. 2. Auflage. Birkhäuser Verlag GmbH, 2021. ISBN: 978-3-0356-2135-8.
- [29] C. Petersen und H. Werkle. *Dynamik der Baukonstruktionen*. de. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-8348-1459-3 978-3-8348-2109-6. DOI: 10.1007/978-3-8348-2109-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-8348-2109-6> (Zugriff am 24. 01. 2025).
- [30] D. Proske. *Baudynamik for Beginners*. de. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 978-3-658-33583-0 978-3-658-33584-7. DOI: 10.1007/978-3-658-33584-7. URL: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-33584-7> (Zugriff am 24. 01. 2025).

- [31] K. Quang Mai, A. Park, K. T. Nguyen und K. Lee. „Full-scale static and dynamic experiments of hybrid CLT–concrete composite floor“. en. In: *Construction and Building Materials* 170 (Mai 2018), S. 55–65. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.042. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818305257> (Zugriff am 04.09.2024).
- [32] S. Scheerer. „Was ist Textilbeton?“ de. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1 (2015). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/best.201400104>, S. 4–7. ISSN: 1437-1006. DOI: 10.1002/best.201400104. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/best.201400104> (Zugriff am 25.02.2025).
- [33] G. Schmidt-Thrö, W. Scheufler und O. Fischer. „Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau“. de. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111.8 (Aug. 2016), S. 496–504. ISSN: 0005-9900, 1437-1006. DOI: 10.1002/best.201600026. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.201600026> (Zugriff am 11.11.2024).
- [34] S. Winter, P. Hamm und A. Richter. *Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken*. de. München, 2010.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Querschnitt und Längsschnitt einer Dippelbaumdecke nach [14]	12
2.1	Schematische Darstellung des (a) Hooke'schen, (b) Newton'schen und (c) Voigt-Kelvin Modells	16
2.2	Gedämpfter Einmassenschwinger mit Freiheitsgrad $x(t)$	16
2.3	Gegenüberstellung der gedämpften mit der ungedämpften Schwingung bei gleicher Amplitude a und Phasenwinkel ε	19
2.4	Auswirkung der Dämpfung auf die Eigenkreisfrequenz nach [3]	19
2.5	Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von η und ζ nach [8]	23
2.6	Einteilung in innere- und äußere Dämpfung nach [8]	24
2.7	Extremwerte einer gedämpften Schwingung	26
2.8	Gedämpfte Schwingung mit der umhüllenden Exponentialfunktion	27
2.9	Tragverhalten eines Verbundträgers mit (a) keinem Verbund, (b) starren Verbund und (c) nachgiebigen Verbund	29
2.10	Ausrichtung und Einbindetiefe einer Schraube	30
3.1	Planausschnitte - Versuchskonzept	35
3.2	Planausschnitt - Messkonzept	36
3.3	Messsysteme an der STB-Verbunddecke (a) am rechten Auflager und (b) in der Verbunddeckenmitte	37
3.4	Rohe Dippelbäume für die (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke	40
3.5	DMS auf den Dippelbäumen für die (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke	40
3.6	Ablauf Probebetonage	41
3.7	Herstellungsablauf der Aufbetonschicht	43
3.8	Vorbereitungen für den Versuch	44
3.9	Schwingungsversuche an der TXB-Verbunddecke	45
3.10	Versuchsaufbau mit eingebauter STB-Verbunddecke während des Belastungsversuches	46
3.11	Versuche zur Bestimmung des E-Moduls und der Druckfestigkeit	48
3.12	Versuch zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit	49
4.1	Last-Verformungs-Diagramm des Belastungsversuches	53
4.2	Biegelinie des (a) STB und (b) TXB Versuchskörper	53
4.3	Biegelinie der (a) STB und (b) TXB Verbunddecke	54
4.4	Beschleunigungsverlauf D3 infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke	57
4.5	Fouriertransformation der Antwort auf Impuls 1 der TXB-Verbunddecke, aufgezeichnet in der Trägermitte durch die Beschleunigungssensoren D3 und D4 sowie in den Viertelpunkten durch D2 und D5	58
4.6	Extremwerte des Beschleunigungsverlaufes infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke	60
4.7	Umhüllende Exponentialfunktion an den Ausschwingvorgang infolge Impuls 1 an der STB-Verbunddecke	61
4.8	Beschleunigungsverlauf der Anregung infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke	62

4.9	Beschleunigungsverlauf der Antwort infolge Impuls 1 an der TXB-Verbunddecke	63
4.10	Fouriertransformation der Anregung infolge Impulse 1 der TXB-Verbunddecke	64
4.11	Fouriertransformation der Antwort infolge Impulse 1 der TXB-Verbunddecke	64
4.12	Übertragungsfunktion infolge Impuls 1 der TXB-Verbunddecke	65
4.13	Geometrie des FE-Modells	66
B.1	Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 1	80
B.2	Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 2	80
B.3	Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 3	81
B.4	Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 4	81
B.5	Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 5	81
B.6	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 1	82
B.7	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 2	82
B.8	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 3	82
B.9	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 4	83
B.10	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 5	83
B.11	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 6	83
B.12	Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 7	84
B.13	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der STB-Verbunddecke	84
B.14	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der STB-Verbunddecke	84
B.15	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke	85
B.16	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke	85
B.17	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke	85
B.18	Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke	86
B.19	Umhüllende Exp.funktion an den Ausschwingvorgang an der STB-Verbunddecke	86
B.20	Umhüllende Exp.funktion an den Ausschwingvorgang an der STB-Verbunddecke	86
B.21	Auswertung Impulshammer 1 - Beschleunigungsverläufe	87
B.22	Auswertung Impulshammer 1 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion	87
B.23	Auswertung Impulshammer 2 - Beschleunigungsverläufe	88
B.24	Auswertung Impulshammer 2 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion	88
B.25	Auswertung Impulshammer 3 - Beschleunigungsverläufe	88
B.26	Auswertung Impulshammer 3 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion	89
B.27	Auswertung Impulshammer 4 - Beschleunigungsverläufe	89
B.28	Auswertung Impulshammer 4 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion	89
B.29	Auswertung Impulshammer 5 - Beschleunigungsverläufe	90
B.30	Auswertung Impulshammer 5 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion	90

Tabellenverzeichnis

2.1	Typische Werte für das Lehr'sche Dämpfungsmaß	25
3.1	Abmessungen der Dippelbaum-Querschnitte	39
3.2	Zeitlicher Ablauf der Herstellung der Aufbetonschicht und der Probekörper	47
3.3	Materialparameter für den Beton	50
3.4	Materialparameter für das Holz	50
3.5	Materialparameter für die Bewehrung	51
3.6	Materialparameter der Assy Würth VG-Schrauben [6]	51
4.1	Zusammenfassung der Versuchskörperparameter	52
4.2	Biegesteifigkeit in den Extremfällen ohne Verbund und starrer Verbund	54
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Belastungsversuch	55
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem statischen Schwingungsversuch	56
4.5	Eigenfrequenz aus dem dynamischen Schwingungsversuch	59
4.6	Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ aus dem dynamischen Schwingungsversuch bestimmt über das logarithmische Dekrement Λ	60
4.7	Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ aus dem dynamischen Schwingungsversuch bestimmt über die Annäherung der Exponentialfunktion	62
4.8	Eigenfrequenz aus den Impulshammer-Versuchen	63
4.9	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem FE-Modell	67
4.10	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Längenvariation	67
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	70

Anhang A

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

KI-Tools

Die folgenden KI-Tools wurden zur Verbesserung des Textflusses verwendet:

- OpenAI. (2025). *ChatGPT* (2025 Version). OpenAI. <https://chat.openai.com>
- DeepL. (2025). *DeepL Write* (2025 Version). DeepL. <https://www.deepl.com/write>

Zusätzlich wurde *ChatGPT* als Programmierhilfe verwendet.

Software

Zur Auswertung der Daten wurden die folgenden Softwares verwendet:

- MathWorks. (2022). *MATLAB R2022b*. MathWorks. <https://www.mathworks.com>
- Microsoft. (2025). *Visual Studio Code* (Version 1.97.2) mit *Python* 3.12. Microsoft. <https://code.visualstudio.com>

Zur Erstellung des FEM-Modells wurde die folgende Software verwendet:

- Dlubal Software GmbH. (2012). *RFEM* 5.31.01. <https://www.dlubal.com>

Anhang B

Plots

B.1 Auswertung dynamischer Schwingungsversuch

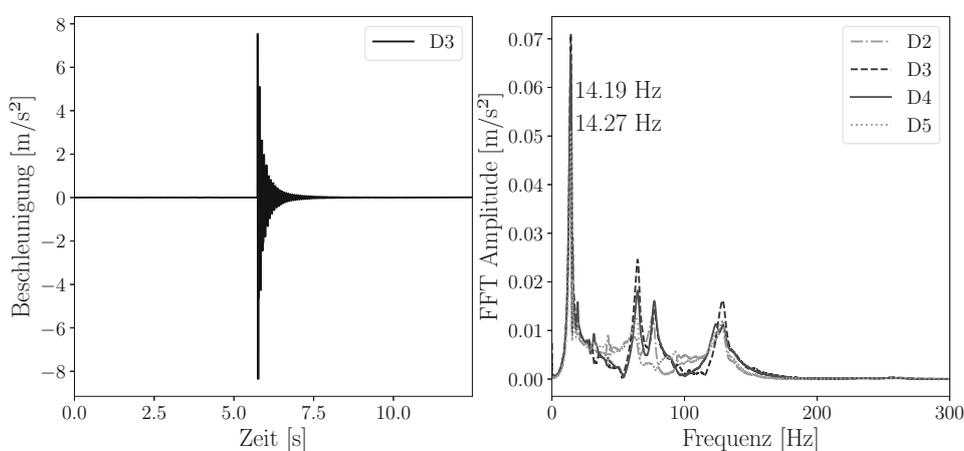


Abb. B.1: Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 1

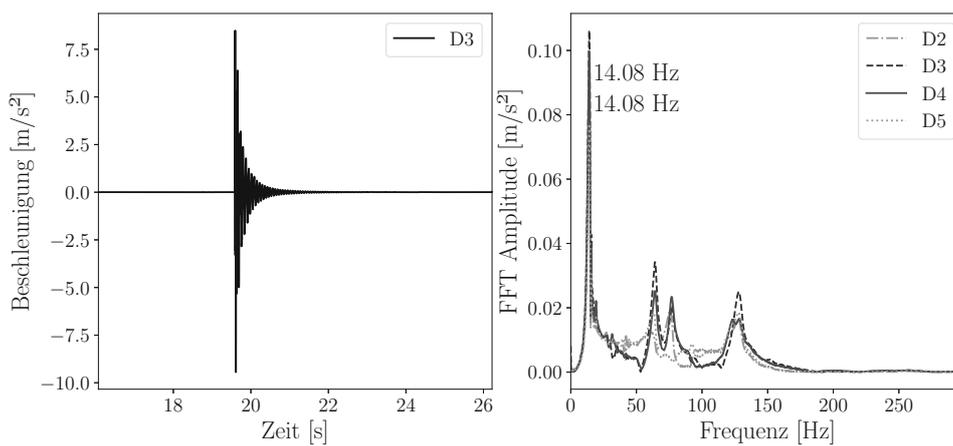


Abb. B.2: Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 2

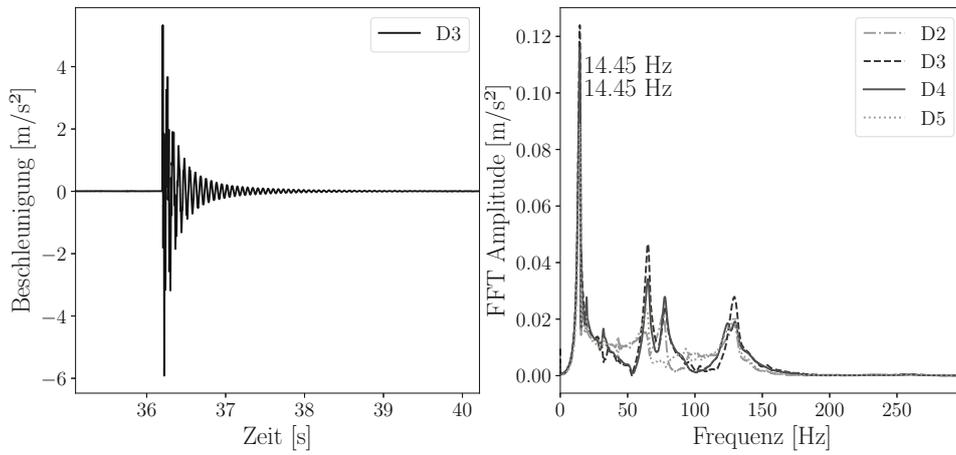


Abb. B.3: Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 3

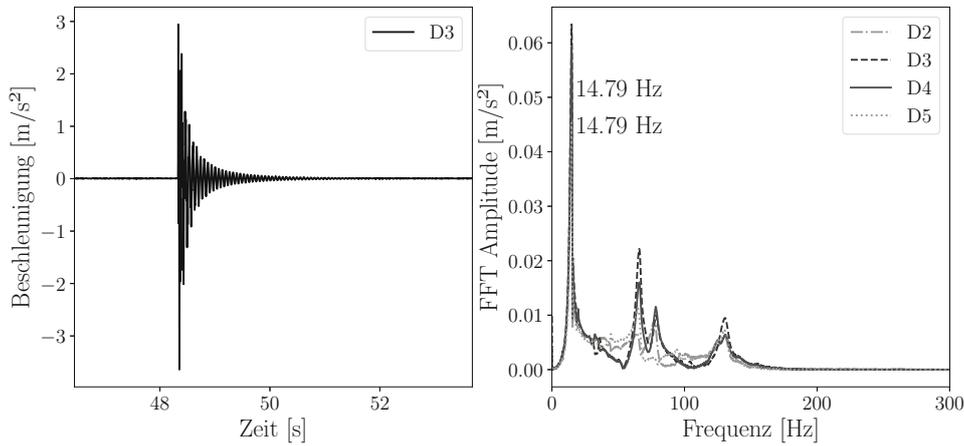


Abb. B.4: Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 4

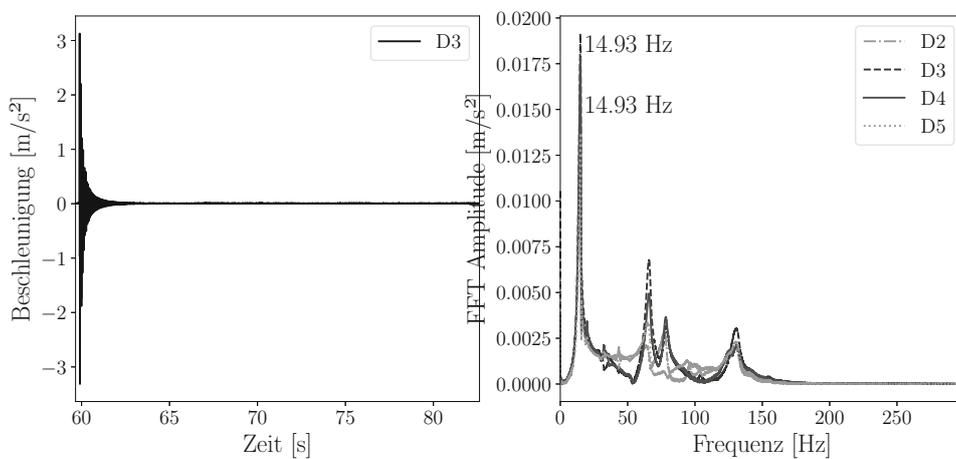


Abb. B.5: Auswertung STB-Verbunddecke - Impuls 5

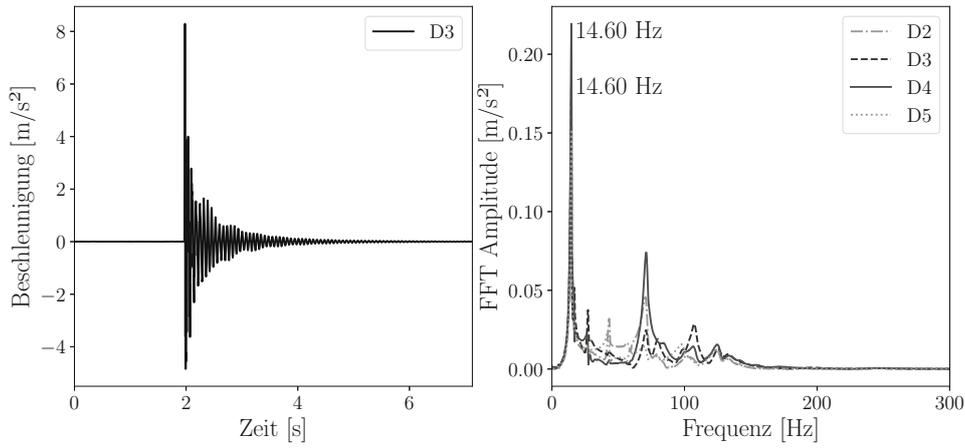


Abb. B.6: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 1

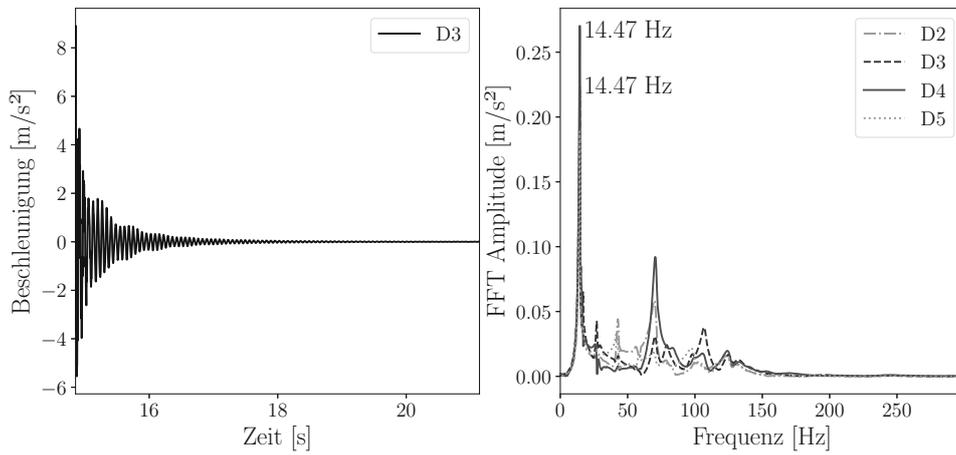


Abb. B.7: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 2

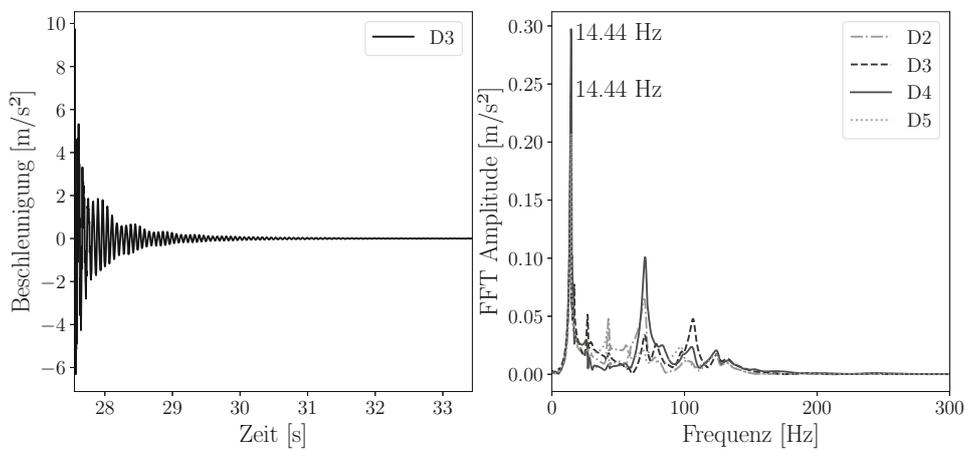


Abb. B.8: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 3

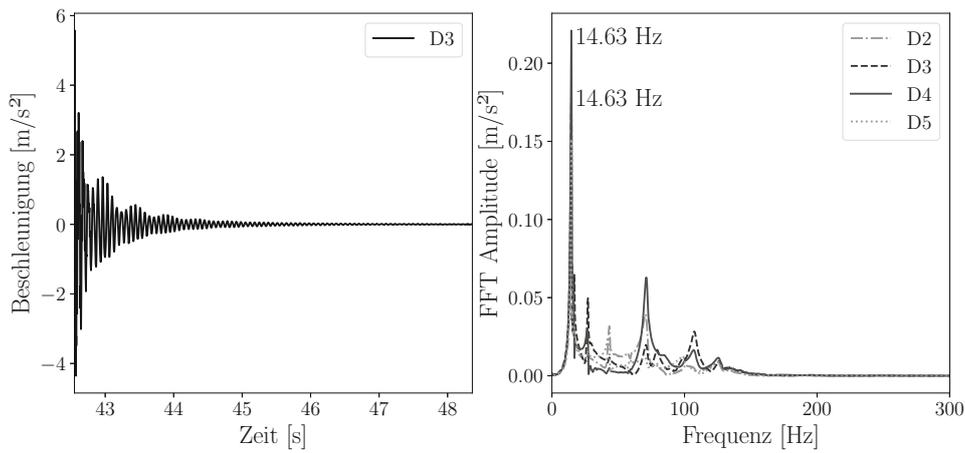


Abb. B.9: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 4

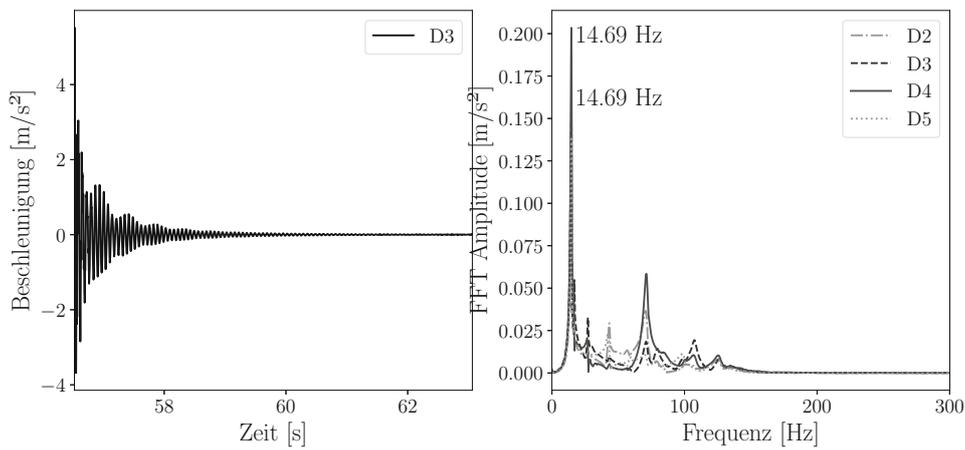


Abb. B.10: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 5

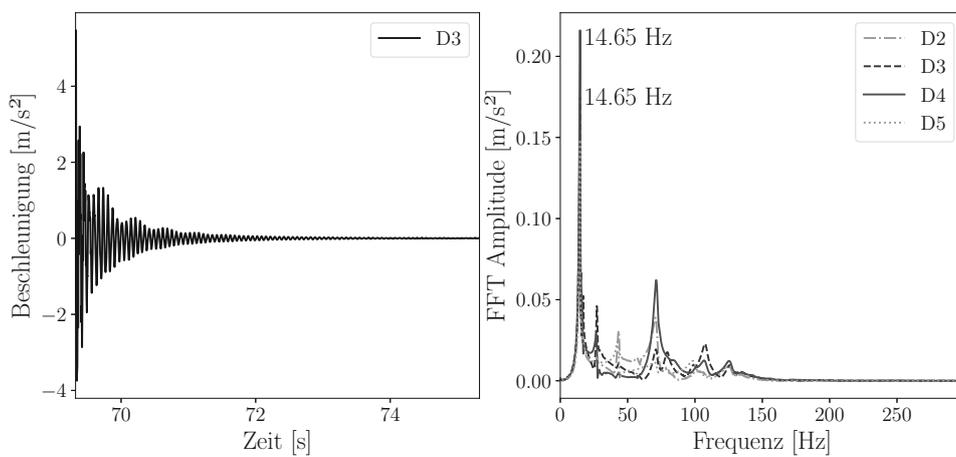


Abb. B.11: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 6

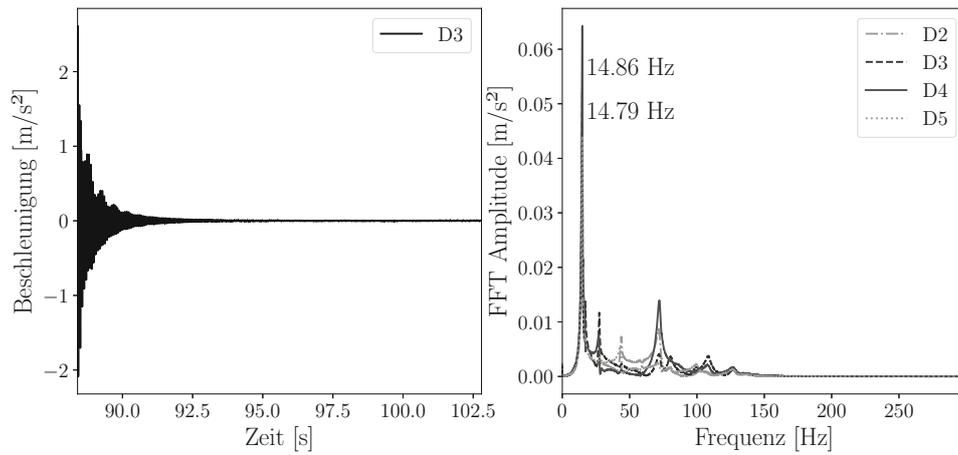
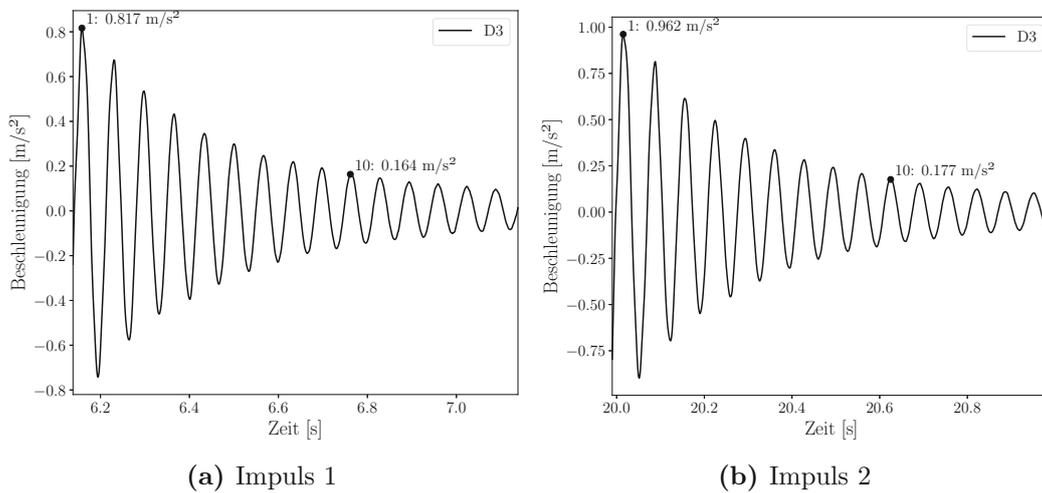


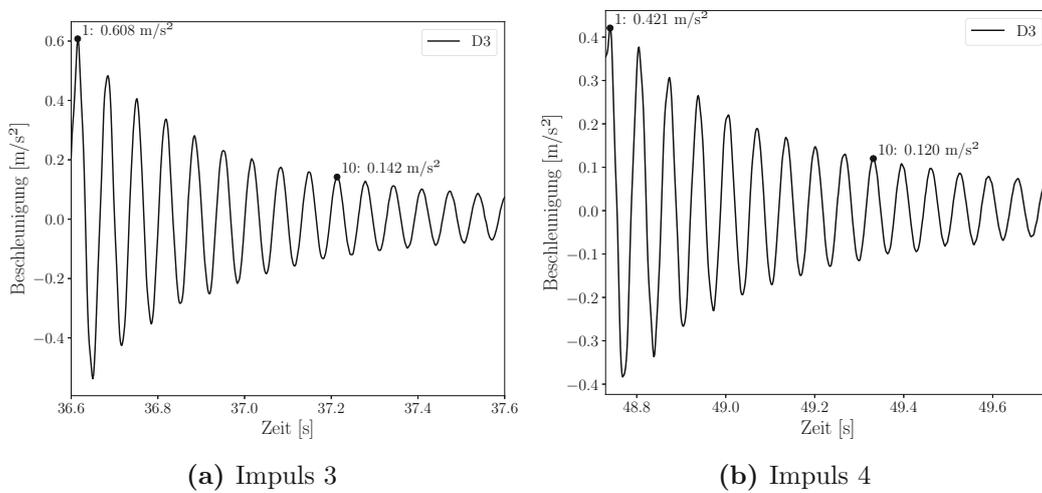
Abb. B.12: Auswertung TXB-Verbunddecke - Impuls 7



(a) Impuls 1

(b) Impuls 2

Abb. B.13: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der STB-Verbunddecke



(a) Impuls 3

(b) Impuls 4

Abb. B.14: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der STB-Verbunddecke

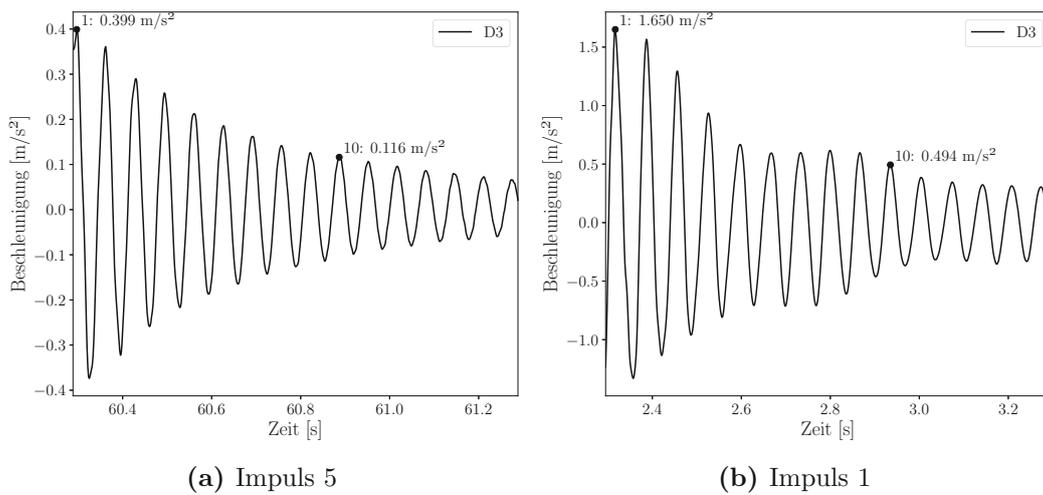


Abb. B.15: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der (a) STB- und (b) TXB-Verbunddecke

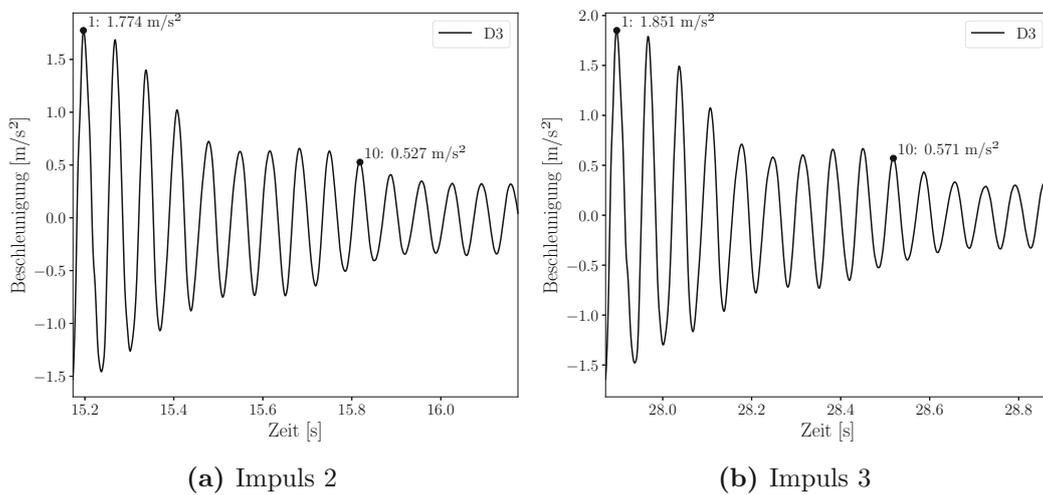


Abb. B.16: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke

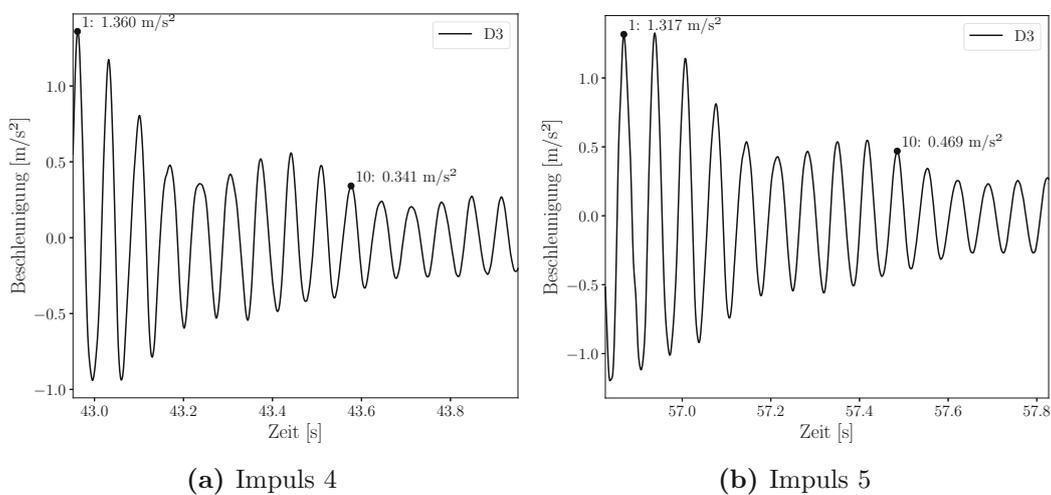
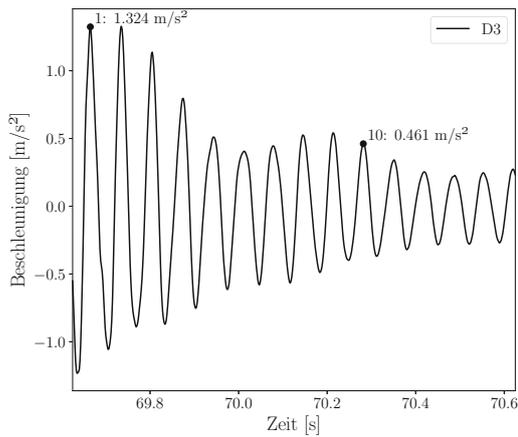
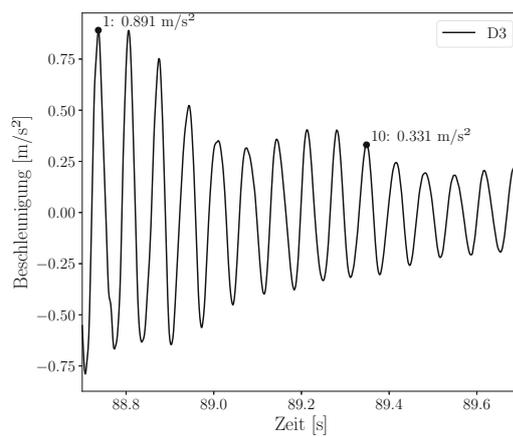


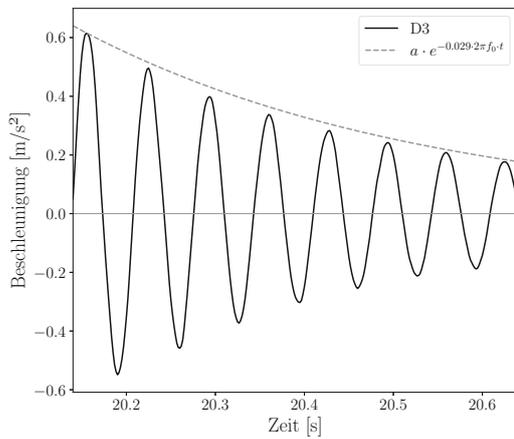
Abb. B.17: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke



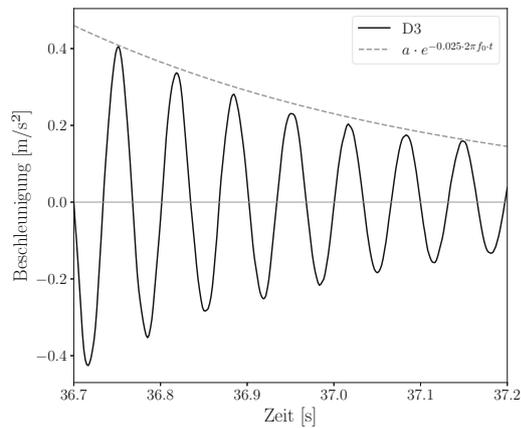
(a) Impuls 6



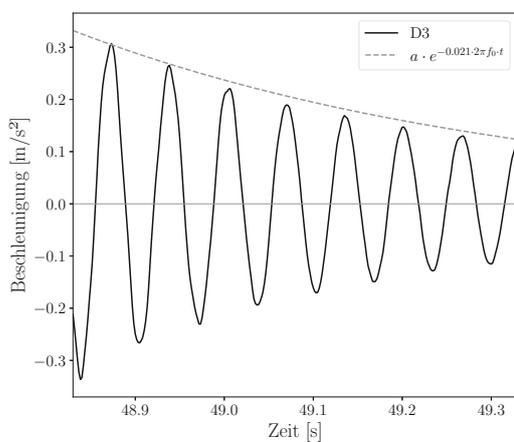
(b) Impuls 7

Abb. B.18: Extremwerte des Ausschwingvorgangs an der TXB-Verbunddecke

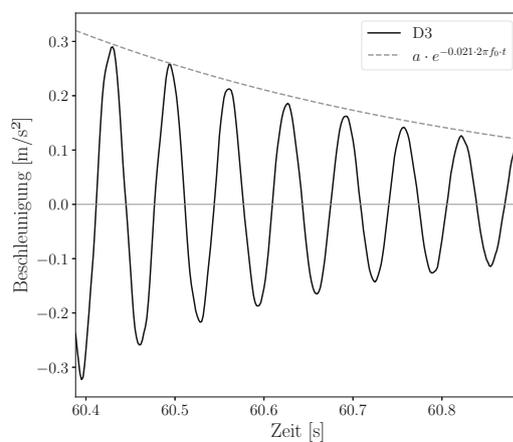
(a) Impuls 2



(b) Impuls 3

Abb. B.19: Umhüllende Exp.funktion an den Ausschwingvorgang an der STB-Verbunddecke

(a) Impuls 4



(b) Impuls 5

Abb. B.20: Umhüllende Exp.funktion an den Ausschwingvorgang an der STB-Verbunddecke

B.2 Auswertung Impulshammer

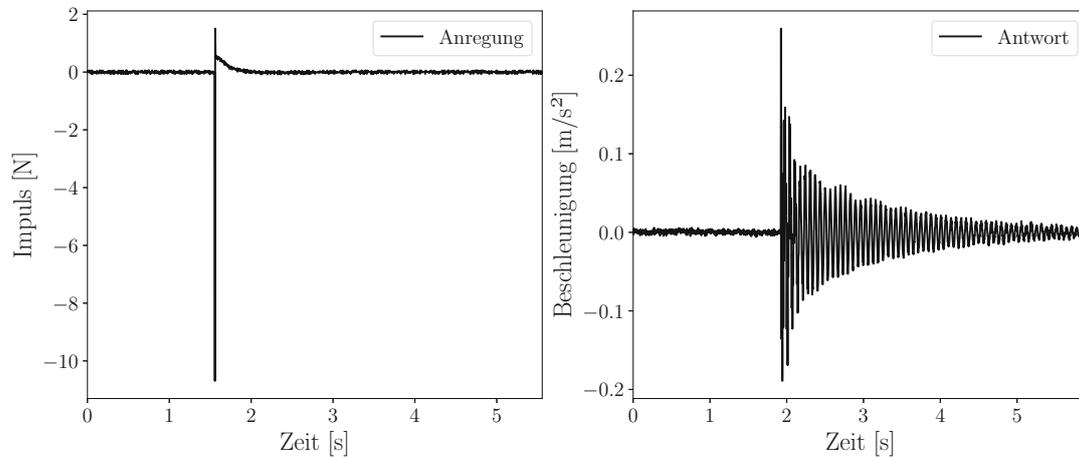


Abb. B.21: Auswertung Impulshammer 1 - Beschleunigungsverläufe

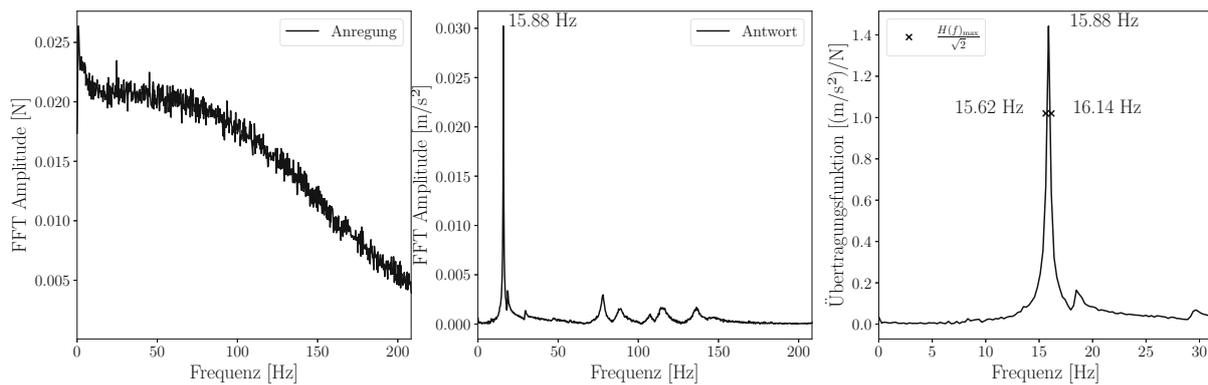


Abb. B.22: Auswertung Impulshammer 1 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion

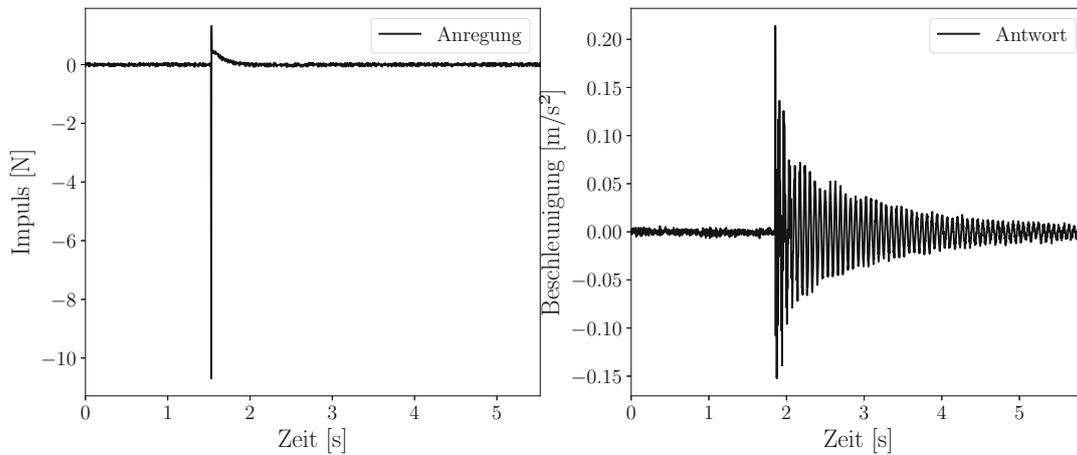


Abb. B.23: Auswertung Impulshammer 2 - Beschleunigungsverläufe

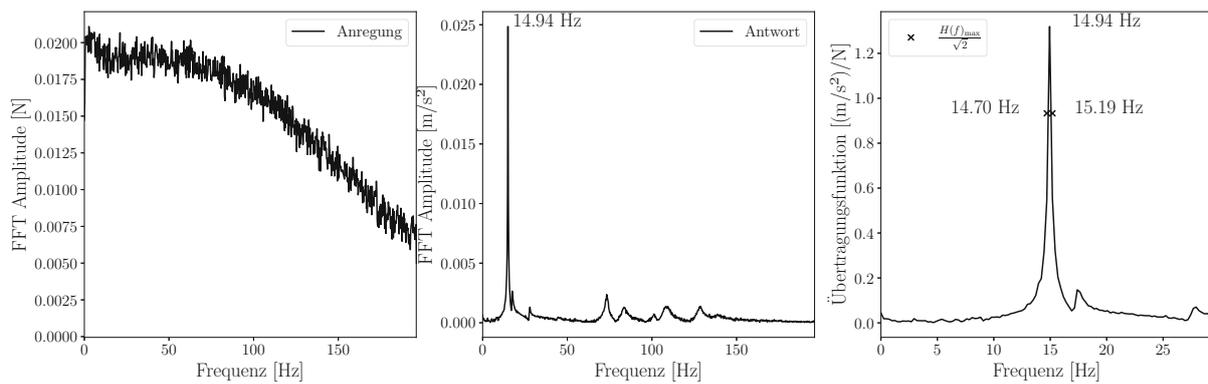


Abb. B.24: Auswertung Impulshammer 2 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion

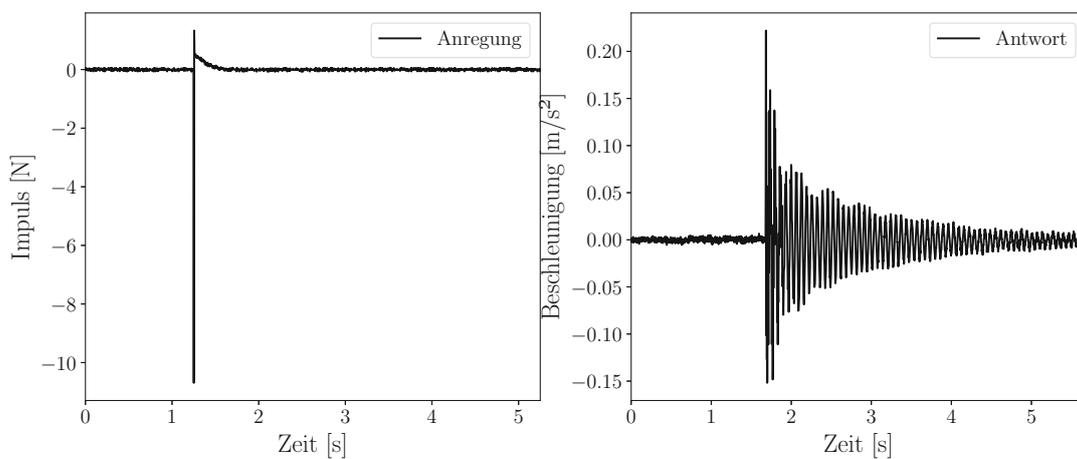


Abb. B.25: Auswertung Impulshammer 3 - Beschleunigungsverläufe

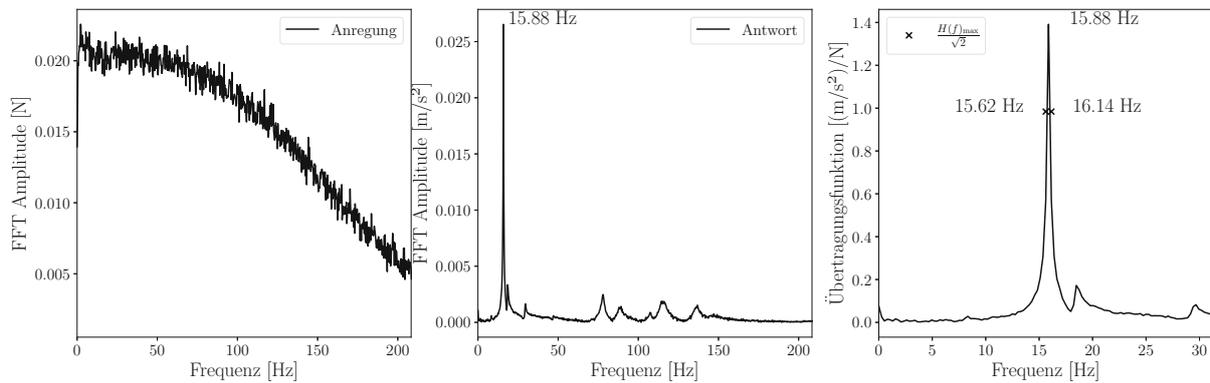


Abb. B.26: Auswertung Impulshammer 3 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion

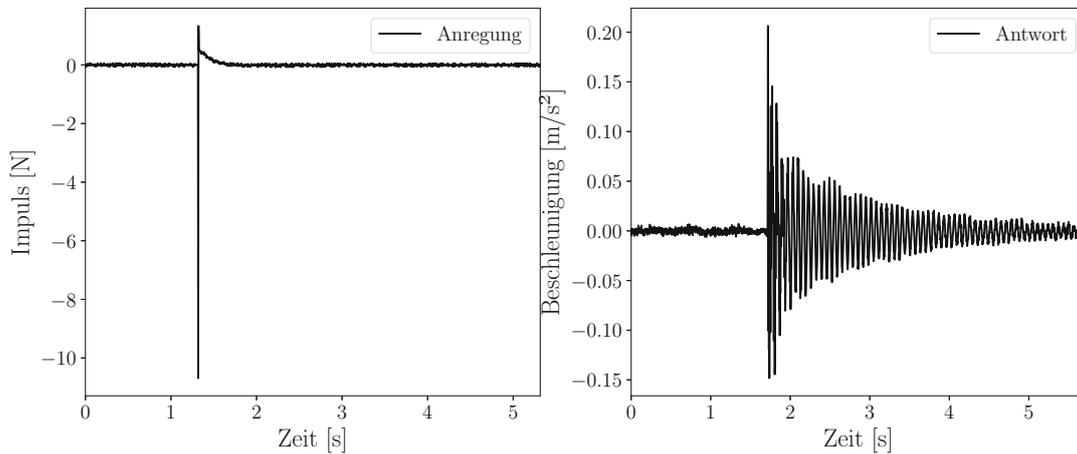


Abb. B.27: Auswertung Impulshammer 4 - Beschleunigungsverläufe

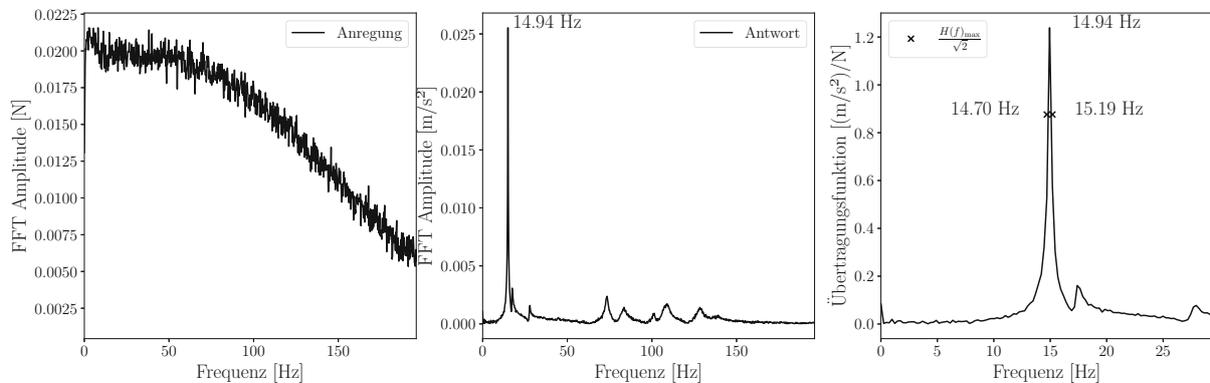


Abb. B.28: Auswertung Impulshammer 4 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion

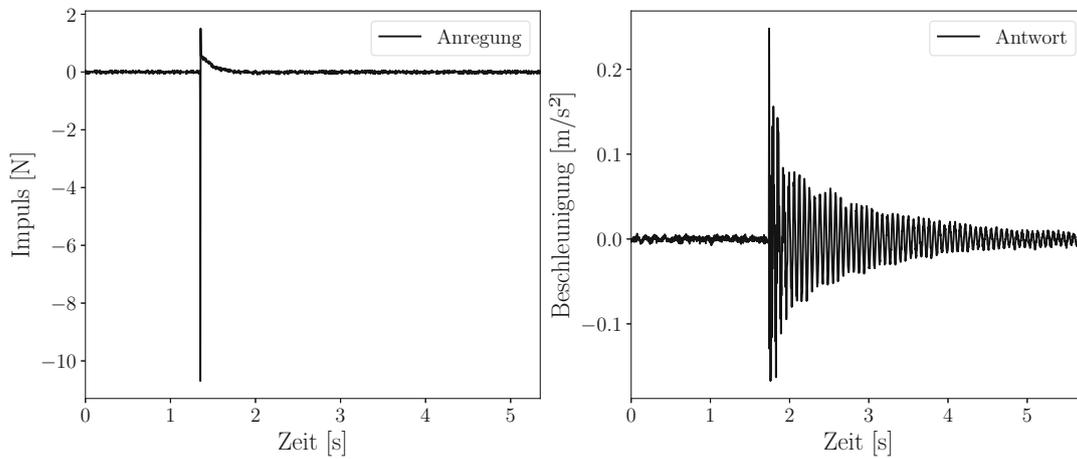


Abb. B.29: Auswertung Impulshammer 5 - Beschleunigungsverläufe

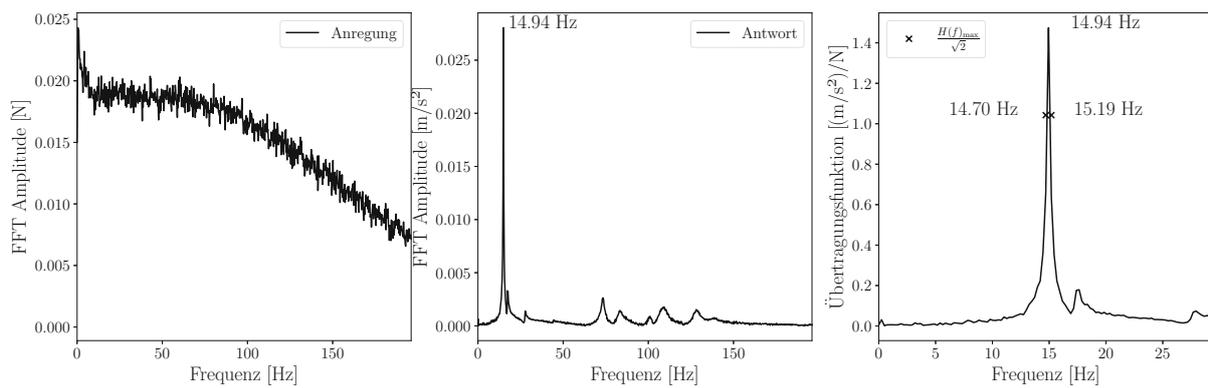


Abb. B.30: Auswertung Impulshammer 5 - FFT Anregung und Antwort, Übertragungsfunktion

Anhang C

MATLAB und Python Code

C.1 Auswertung Belastungsversuch

Der Code wurde beispielhaft für die TXB-Verbunddecke angegeben.

```
1 %% Eingangswerte
2 % Breiten der Platten
3 b_TXB = 0.57; %m          % Breite
4 b_TXB_e = 0.528; %m      % effektive Breite der Holzquerschnitte
5
6 % Höhe der Betonschicht / Holzquerschnitt
7 h_c_TXB = 0.03; %m
8 h_t_TXB = 0.148; %m
9
10 % Spannweite
11 l_system = 4.4; %m
12
13 % Materialparameter
14 E_c = 27546; %N/mm2
15 E_t = 8264; %N/mm2
16
17 %% Datei einlesen
18 data_TXB = readtable("filename.txt", 'VariableNamingRule', 'preserve');
19 max_data_TXB = find(data_TXB.Gesamtlast == max(data_TXB.Gesamtlast), 1, '
    first'); % Zeile max. Gesamtlast
20 data_TXB(max_data_TXB+1000:end, :) = []; % Werte Gesamtlast + 1000 Zeilen
21
22 %Daten Nullsetzten
23 data_TXB{:, :} = data_TXB{:, :} - data_TXB{1, :};
24
25 % Korrigieren der Verschiebungen um die Auflagerverformung - beispielhaft
    V2
26 data_TXB .V2 = data_TXB .V2+ data_TXB .A1 *0.50;
27 data_TXB .V2 = data_TXB .V2+ data_TXB .A2 *0.50;
28
29 % Gesamtlast als Flächenlast
30 data_TXB.Gesamtlast = data_TXB.Gesamtlast/(b_TXB*l_system);
31
32 %Index bestimmter Werte
33 % Für SLS Load = 5 kN/m2
34 [~, five_TXB] = min(abs(data_TXB.Gesamtlast - 5));
35
36 % für 40% von qmax
37 [~, maxtimes0_40_TXB] = min(abs(data_TXB.Gesamtlast - 0.4*data_TXB.
    Gesamtlast(max_data_TXB)));
38
39 % EI_eff bei 40% von q_max
```

```

40 EI_TXB_eff = 5 * data_TXB.Gesamtlast(maxtimes0_40_TXB)*b_TXB*10^-3 *
    l_system^4 / (384 * data_TXB.V2(maxtimes0_40_TXB)*10^-3);
41
42 %% Kraft-Verformungs-Diagramm TXB - Berechnungen
43 % Steifigkeit ohne Verbund:
44 EI_TXB_nocomp = E_t*b_TXB_e*h_t_TXB^3/12 + E_c*b_TXB*h_c_TXB^3/12; %
    MNm2
45
46 % Steifigkeit starrer Verbund:
47 a_c_TXB = (h_c_TXB+h_t_TXB) / 2 * E_t*h_t_TXB / (E_c*h_c_TXB+E_t*
    h_t_TXB);
48 a_t_TXB = (h_c_TXB+h_t_TXB) / 2 * E_c*h_c_TXB / (E_c*h_c_TXB+E_t*
    h_t_TXB);
49
50 EI_TXB_fullcomp = EI_TXB_nocomp + E_t*b_TXB_e*h_t_TXB*a_t_TXB^2 + E_c*
    b_TXB*h_c_TXB*a_c_TXB^2; %MNm2
51
52 %Verbundwirkung
53 DCA_TXB = (EI_TXB_eff - EI_TXB_nocomp) / (EI_TXB_fullcomp -
    EI_TXB_nocomp);
54
55 %Durchbiegungen
56 TXB_V2_fullcomp = (5*data_TXB.Gesamtlast(max_data_TXB)*10^-3*b_TXB*
    l_system^4)/(384*EI_TXB_fullcomp)*10^3;
57 TXB_V2_nocomp = (5*data_TXB.Gesamtlast(max_data_TXB)*10^-3*b_TXB*
    l_system^4)/(384*EI_TXB_nocomp)*10^3;
58 TXB_V2_comp = (5*data_TXB.Gesamtlast(max_data_TXB)*10^-3*b_TXB*l_system
    ^4)/(384*EI_TXB_eff)*10^3;

```

C.2 Auswertung dynamischer Schwingungsversuch

C.2.1 FFT

```

1 # Daten laden
2 t = np.loadtxt(file_path, usecols=(time_column)) #Zeitdaten
3 p_data = np.loadtxt(file_path, usecols=data_columns) #Beschleunigungsdaten
4
5 # Sampling-Parameter
6 N = len(t) # Anzahl der Datenpunkte
7 Tf = t[-1] # Endzeitpunkt
8 dt = t[2] - t[1] # Zeitintervall
9
10 # Frequenzvektor für die FFT
11 fmax = 1 / dt # Abtastfrequenz
12 df = 1 / (N * dt) # Frequenzbandbreite
13 freq = np.arange(0, fmax, df)
14
15 # FFT
16 for i, col_data in enumerate(p_data.T):
17     P = 2 / N * fft(col_data)
18     P_magnitude = np.abs(P[:N//2])
19
20 # Plotten der FFT
21 plt.plot(freq[:N//2], P_magnitude)

```

C.2.2 Extremwerte für logarithmisches Dekrement

```

1  # Daten laden
2  t = np.loadtxt(file_path, usecols=(time_column)) # Zeitdaten
3  p_data = np.loadtxt(file_path, usecols=data_columns) #Beschleunigungsdaten
4
5  # Zeitpunkt Anregung
6  threshold = 0.1
7  condition = np.abs(p_data) > threshold
8
9  # Startzeit bestimmen
10 start_index = np.argmax(condition)
11 start_time = t[start_index]
12
13 # Zeitparameter
14 t_start = start_time + 0.4 # Nach 0.4 Sekunden
15 t_end = t_start + 1 # Weitere 1 Sekunde
16 start_index = np.where(t >= t_start)[0][0] # Index der ersten Zeit >=
    t_start
17 end_index = np.where(t <= t_end)[0][-1] # Index der letzten Zeit <=
    t_end
18
19 # Daten im gewünschten Zeitfenster ausschneiden
20 t_cut = t[start_index:end_index]
21 p_data_cut = p_data[start_index:end_index]
22
23 # Lokale Maxima finden
24 local_maxima = argrelextrema(p_data_cut, np.greater)[0]
25
26 if len(local_maxima) >= 10:
27     filtered_maxima = [local_maxima[0], local_maxima[9]] # Erster und 10.
        Maximalwert
28 else:
29     filtered_maxima = local_maxima[:1] # Nur den ersten Maximalwert, wenn
        weniger als 10 vorhanden sind
30
31 # Plot
32 plt.figure()
33 plt.plot(t_cut, p_data_cut)
34
35 for i, idx in enumerate(filtered_maxima):
36     extremum_time = t_cut[idx]
37     extremum_value = p_data_cut[idx]

```

C.2.3 Umhüllende Exponentialfunktion

Das Laden und zuschneiden der Daten erfolgt wie in Anhang C.2.2 und wird hier nicht nochmal angeführt.

```

1  # Parameter zum Anpassen
2  f_0 =
3  amplitude =
4  d =
5
6  #Zeitvektor für die exponentielle Funktion
7  delta_t = t_cut[1] - t_cut[0] # Zeitabstand berechnen

```

```

8  t_exp = np.arange(0, len(t_cut) * delta_t, delta_t)[:len(t_cut)] #
    Zeitvektor ab 0 erstellen
9
10 # Funktion erstellen
11 exp_function = amplitude * np.exp(-d * 2 * np.pi * f_0 * t_exp)
12
13 # Plot
14 plt.figure()
15 plt.plot(t_cut, p_data_cut)
16 plt.plot(t_cut, exp_function)

```

C.3 Auswertung Impulshammer

```

1  # Datei einlesen - Anregung
2  with open(file_path_h, 'r') as file:
3      lines = file.readlines()[1:] # Überspringt die Headerzeile
4
5  # Spalten extrahieren und Einheiten entfernen
6  t_h = np.array([float(line.split(',')[0].replace('sec', '')) for line in
    lines])
7  p_data_h = np.array([float(line.split(',')[1]) for line in lines])
8
9  # Daten laden - Antwort
10 t_t = np.loadtxt(file_path_t, usecols=(time_column)) # Zeitdaten
11 p_data_t = np.loadtxt(file_path_t, usecols=data_columns) #
    Beschleunigungsdaten
12
13 # Daten schneiden
14 threshold = 0.1
15 condition_h = np.abs(p_data_h) > threshold
16 condition_t = np.abs(p_data_t) > threshold
17
18 # Startzeit bestimmen
19 start_index_h = np.argmax(condition_h)
20 start_index_t = np.argmax(condition_t)
21 start_time_h = t_h[start_index_h]
22 start_time_t = t_t[start_index_t]
23
24 # Endzeitpunkt bestimmen
25 end_time_h = start_time_h + 4 # Weitere 4 Sekunden
26 end_index_h = np.where(t_h <= end_time_h)[0][-1]
27 end_index_t = start_index_t + (end_index_h - start_index_h)
28
29 # Zeitfenster ausschneiden
30 t_cut_h = t_h[start_index_h:end_index_h + 1]
31 t_cut_t = t_t[start_index_t:end_index_t + 1]
32 p_data_cut_h = p_data_h[start_index_h:end_index_h + 1]
33 p_data_cut_t = p_data_t[start_index_t:end_index_t + 1]
34
35 # Sampling-Parameter
36 N = len(t_cut_h) # Anzahl der Datenpunkte
37 Tf = t_cut_h[-1] # Endzeitpunkt
38 dt = t_cut_h[2] - t_cut_h[1] # Zeitintervall
39
40 # Frequenzvektor für die FFT
41 fmax = 1 / dt

```

```

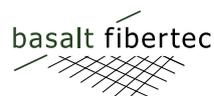
42 df = 1 / (N * dt)
43 freq = np.arange(0, fmax, df)
44
45 # FFT
46 P_h = 2 / N * fft(p_data_cut_h) # Anregung
47 P_t = 2 / N * fft(p_data_cut_t) # Antwort
48 P = P_t / P_h # Übertragungsfunktion
49 P_magnitude = np.abs(P[:N//2]) # Absolutwert der FFT - Übertragungsf.
50 P_magnitude_h = np.abs(P_h[:N//2]) # Absolutwert der FFT - Anregung
51 P_magnitude_t = np.abs(P_t[:N//2]) # Absolutwert der FFT - Antwort
52
53 # Maximalwert - Antwort
54 max_idx = np.argmax(P_magnitude_t) # Index des Maximalwerts
55 max_freq = freq[max_idx] # Frequenz des Maximalwerts
56 max_amplitude = P_magnitude_t[max_idx] # Maximalwert der Amplitude
57
58 # Maximalwert - Übertragungsfunktion
59 max_idx = np.argmax(P_magnitude) # Index des Maximalwerts
60 max_freq = freq[max_idx] # Frequenz des Maximalwerts
61 max_amplitude = P_magnitude[max_idx] # Maximalwert der Amplitude
62
63 # Bandbreitenmethode
64 threshold = max_amplitude / math.sqrt(2)
65
66 # Indizes links und rechts vom Maximum finden
67 left_idx = np.where(P_magnitude[:max_idx] < threshold)[0][-1] # letzter
        Punkt vor max_idx unter threshold
68 right_idx = np.where(P_magnitude[max_idx:] < threshold)[0][0] + max_idx #
        erster Punkt nach max_idx unter threshold
69
70 # Frequenzen f1 und f2
71 left_freq = freq[left_idx]
72 right_freq = freq[right_idx]

```

Anhang D

Pläne und Material

Technisches Datenblatt TDB



The Future in Construction

Bau + Instandsetzung	Landwirtschaft	Textilprodukte	Schiffsbau	Industrie
-----------------------------	----------------	----------------	------------	-----------

Basalt Bewehrungsnetze für Beton

Artikel-Nr.		031.0021.20.30	031.0021.20.05	031.0021.20.90
Maschenweite	mm	21x21	21x21	21x21
Gitteröffnung (Kette)	mm	15	15	15
Gitteröffnung (Schuss)	mm	19	19	19
Fäden pro Meter		47 x 2	47 x 2	47 x 2
Bew.-Querschnitt	mm ² /m	82	82	82
Zugfestigkeit	kN/m	147	147	147
Dehnung (Kette)	%	1,56	1,56	1,56
Dehnung (Schuss)	%	1,32	1,32	1,32
Ausrüstung		Acrylat, steif	Acrylat, weich	Acrylat, steif
Anwendung		Beton	Beton	Beton
Aufmachung		Matten	Rollen	Profile
Breite		300 cm	300 cm	max 300 cm
Länge		200 cm	50 m	max 300 cm



Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

Abb. 1-3: Thermisch gebogene Bewehrungsnetze

Abb 4: Bituminiertes Bewehrungsnetz

Die Prüfwerte wurden auf Basis von experimentellen Untersuchungen an Rovingzugversuchen abgeleitet. Diese Wert ist nur als statistische Kurzzeifestigkeit zu bewerten. Einflüsse aus Dauerhaftigkeit, Dauerstandslasten, zyklischen Beanspruchungen, Verarbeitung usw. sind hier nicht berücksichtigt. Die Prüfung der Eignung unserer Artikel für Ihren Anwendungsbereich obliegt Ihnen als Kunde.

Chargenprotokolle

Werk	Datum	Zeit	LS-Nr	Chp-Nr	Mandant / Betrieb	Kunde												
2138 Liesing	25.07.2024	09:19 - 09:19	1316707	950162	10000/103 - Rohrdorfer Baustoffe A	123109 - Träger GmbH												
Projekt																		
Baubabschnitt																		
232939 - 3., TU Wien, Objekt OC - Tor 1, Lilienthalgasse 14																		
Menge	Rückmenge	Rückm LS-Nr	Mischer	Anzahl Chargen	Fahrzeug-Nr	Kennzeichen												
1,00			1	1	448	PL 948 ME												
Fehler																		
Fehler																		
Sorte	Bezeichnung	Artikel	Bezeichnung	Fest-Kl	Kons-Kl	Gr-Korn	Rohd-Kl	Luftgehalt (%)										
B40GP0859Z00	C40/50 B4 PB GK8 F59 ZG2	C401GP0859Z	C40/50 B4 PB GK8 F59 ZG2	C40/50	F59	8		2,0										
Expositionsklassen																		
B4, XC4, XW2, XD2, XF1, XA1L, (A)																		
Mischzeit (s)	Konsistenz	Betontemperatur (°C)	Lufttemperatur (°C)	Spülwasser (kg)	Mischarwasser (kg)	Trommelwasser (kg)	Reinigungswasser (kg)	Wasserkorrektur (kg/m³)										
Soll	Ist																	
25	141	23,7	19,9															
Mat-Nr	Bezeichnung	Wg	Silo	Soll trocken	Eh	Istwert	Eh	Abw (%)	F (M-%)	A (M-%)	Rohdichte	Feststoff	Wa-Geh	Temp (°C)	k-Wert	ChKorr	Kennz	
1421302	4/8 GC85/20 SI40 f1,5 F1 (B)	11	1	766,15	kg	781,48	kg	0,32	kg	0,04	2,00	2750	100	15,33				
1402302	0/4 GF85 f5 F1 (BS)	11	3	950,03	kg	998,48	kg	-1,97	kg	-0,20	5,10	2790	100	48,36				
10100132	CEM III/A-S 42,5 R (Ma)	12	5	400,00	kg	400,00	kg	-0,96	kg	-0,24		3100	100					
10100102	Fluamix C (Ma)	12	6	100,00	kg	100,00	kg	0,26	kg	0,26		2800	100				0,80	
FLL0001	dynamIQ flow L - 01	14	1	4,75	kg	4,75	kg	0,05	kg	0,97		1050	25	3,42				
99900	Brauchwasser	13	2	58,50	kg	38,61	kg	39,31	kg	1,82		1050	37,44					
99800	Frischwasser	13	1	136,50	kg	91,07	kg	139,95	kg	53,68		1000	139,95					H +
W/B	Max	Soll	Ist	Rohdichte (kg/m³)	Wasser für W/B (kg)	Wasser für W/B (kg)	Bindemittel für W/B (kg)	Bindemittel für W/B (kg/m³)	Wasser für W/B (kg/m³)	Wasser für W/B (kg)	Bindemittel für W/B (kg)	Wa-Absorption (kg)	Mischerleistung vor Entleerung (%)					
Ist	0,51	0,50	2 462	2 414	244,50	244,50	479	479	244,50	244,50	479	13,463						

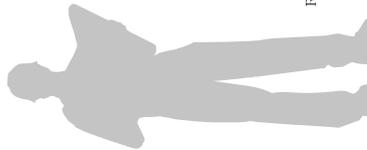
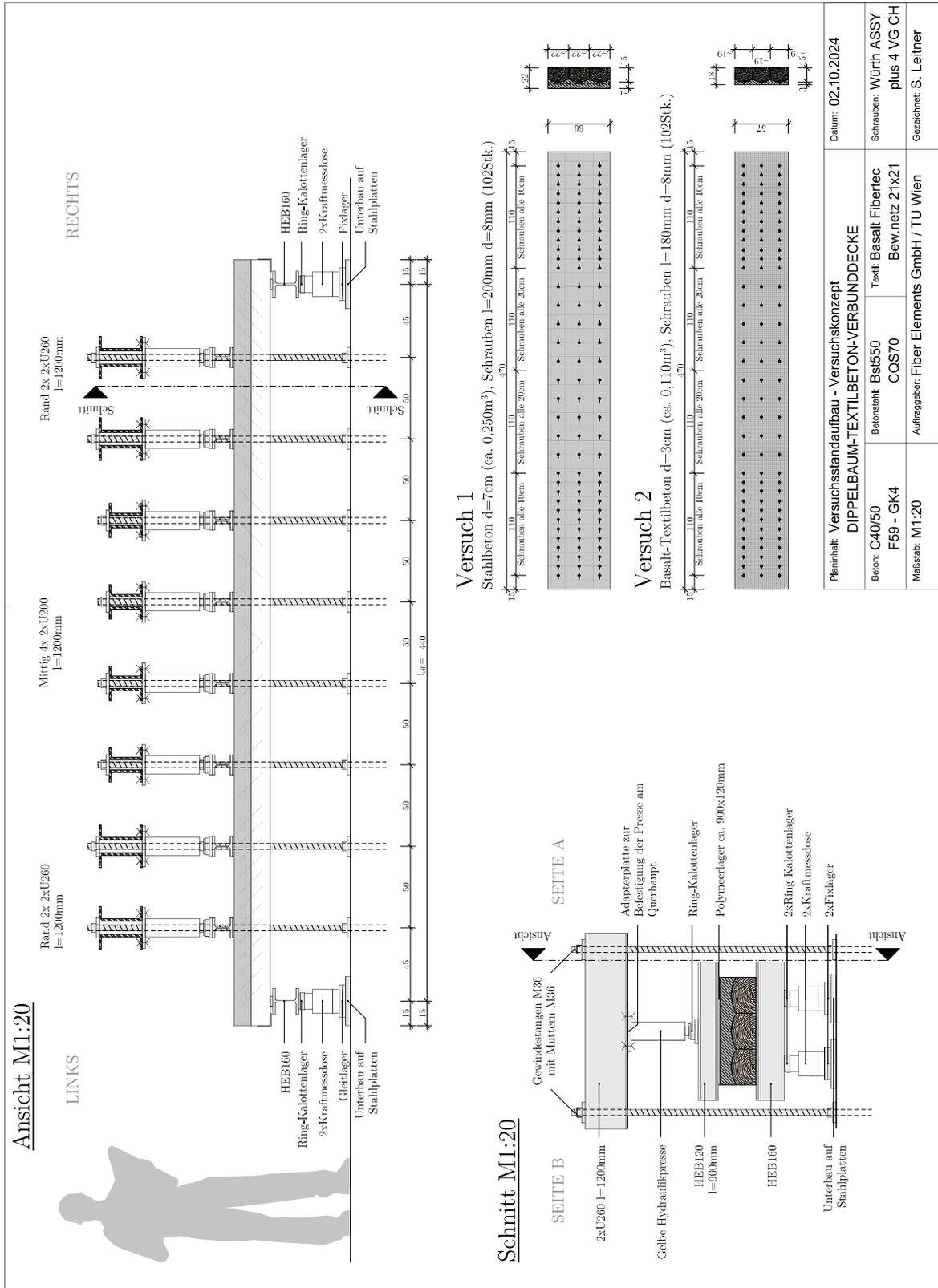


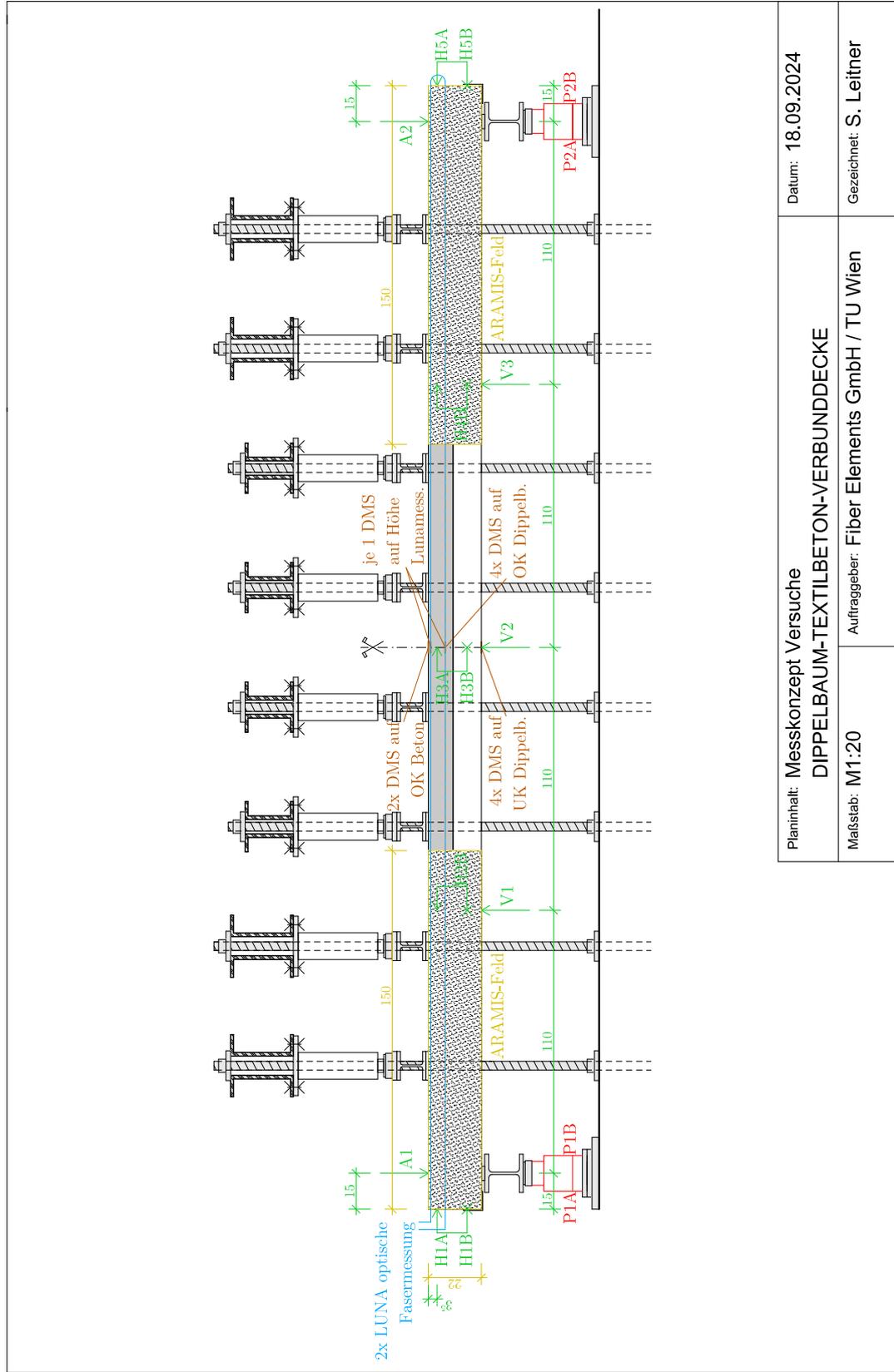
Biegefestigkeitsprüfung von Dippelbäumen in Anlehnung an EN 408

Auftraggeber: Technische Universität Wien **Auftrags Nr.:** 14274/2024
Probeneingang: 09.10.2024
Prüfdatum: 09.10.2024
PrüferIn: KAM
 Sortierklasse nach ÖN DIN 4074-1, 2250 mm
 Tab. 2 Stützweite: 900 mm
 Abstand zwischen den Lasteinleitungen: 750 mm
 Messlänge für lokalen E-Modul

Nummer HFA	Breite <i>b</i> [mm]	Höhe <i>h</i> [mm]	Länge <i>l</i> [mm]	Gewicht <i>g</i> [mm]	Bruchkraft <i>F_{max}</i> [kN]	Biege- festigkeit <i>f_m</i> [N/mm ²]	Biege- E-Modul gl. <i>E_{gl}</i> [N/mm ²]	Biege- E-Modul lo. <i>E_{loc}</i> [N/mm ²]	Bauteil- dichte <i>ρ</i> [kg/m ³]	Holz- feuchte <i>u_{dur}</i> [%]	Holzart	Sortierung DIN 4074-1 (nur Äste)	Sortierung alle Parameter	Bruch- ursache
1	228	143	2663	37968	53,13	23,1	7704	9278	437	12,2	Fichte	S 10	Ausschuss	Ast
2	258	158	2542	43221	85,34	26,8	6563	7249	417	12,2	Fichte	S 10	Ausschuss	globale Faser
3	172	133	2385	26157	54,52	36,3	9195	9850	479	11,5	Kiefer	S 13	Ausschuss	Ast
4	158	118	2400	21830	26,17	24,1	6594	6611	488	11,4	Kiefer	S 10	Ausschuss	Ast

Mittelwert (MW)	27,6	7514	8247	455
Minimum	23,1	6563	6611	417
Maximum	36,3	9195	9850	488





Planinhalt: Messkonzept Versuche DIPPELBAUM-TEXTILBETON-VERBUNDDECKE	Datum: 18.09.2024
Maßstab: M1:20	Gezeichnet: S. Leitner
Auftraggeber: Fiber Elements GmbH / TU Wien	