

# Holz-Glas-Fassaden

## Teilvorhaben 1

Konstruktive und bauphysikalische Vorplanung  
sowie Fassadenelement-Anschluss und -Prüfung

## Abschlussbericht

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff  
Bearbeiter: Aidin Azarpira M.Sc.  
Förderprogramm: Nachwachsende Rohstoffe  
Förderbereich: Biobasierte Produkte und Bioenergieträger  
Thema: Neue Materialkombinationen mit Holz  
Förderkennzeichen: 22009618  
Laufzeit: 01.03.2019 – 31.08.2022  
Datum: Hamburg, 15.06.2023

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kurzbericht</b>	<b>4</b>
1.1. Danksagung . . . . .	4
1.2. Projektkonsortium . . . . .	4
1.3. Zielstellung des Gesamtprojekts . . . . .	5
1.4. Haftungsausschluss . . . . .	6
1.5. Bezug zum Förderprogramm . . . . .	7
1.6. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele . . . . .	7
1.7. Chancen und Risiken des Vorhabens . . . . .	7
1.8. Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	8
1.8.1. Holzbauweise im Wohnungsbau . . . . .	8
1.8.2. Aussteifende Verglasungen . . . . .	9
1.8.3. Bestehende Lösungen . . . . .	9
1.8.4. Neuheitswert des Vorhabens . . . . .	10
1.9. Erfahrungen im Fachgebiet und projektbezogene Vorarbeiten – Projektpartner 1 . . . . .	11
1.10. Beschreibung des Arbeitsplans - Gesamtprojekt . . . . .	13
1.10.1. Zeitplanung und Arbeitspakete . . . . .	13
1.11. Resümee der wesentlichen Ergebnisse - Projektpartner 1 . . . . .	18
<b>2. Fugenplanung</b>	<b>19</b>
2.1. Horizontale Fuge . . . . .	20
2.1.1. Thermische Simulation der horizontalen Fuge . . . . .	20
2.1.2. Thermischer Einfluss der Glaslagerung . . . . .	21
2.1.3. Thermischer Einfluss der GFK-Holz-Verschraubung . . . . .	22
2.2. Vertikale Fuge . . . . .	24
2.2.1. Thermische Simulation der vertikalen Fuge . . . . .	25
2.2.2. Thermischer Einfluss der Glashalterung . . . . .	26
2.2.3. Thermischer Einfluss der GFK-Holz-Verschraubung . . . . .	26
2.2.4. Stand der Technik . . . . .	27
<b>3. Charakteristische Eigenschaften der verwendeten Materialien</b>	<b>29</b>
3.1. Verwendete Holzarten . . . . .	29
3.1.1. Eiche Brettschichtholz . . . . .	29
3.1.2. Buche Furnierschichtholz . . . . .	31
<b>4. vertikaler Elementstoß</b>	<b>35</b>
4.1. Einleitung . . . . .	35
4.1.1. Empirische Untersuchungen . . . . .	37
4.1.2. Einfluss des Randabstandes vom Arbeitsplattenverbinder . . . . .	38
4.1.3. Einfluss der Einbindetiefe vom Arbeitsplattenverbinder . . . . .	44
4.1.4. Zusammenfassung . . . . .	48
<b>5. Pfosten-Zwischenriegel-Verbindung</b>	<b>49</b>
5.1. Prüfkörper . . . . .	50
5.1.1. Prüfkörper mit dem Knapp-Ricon-Verbindern . . . . .	50

5.1.2.	Prüfkörper mit den Tellerkopfschrauben & Holzdübeln . . . . .	51
5.1.3.	Ergebnisse . . . . .	53
<b>6.</b>	<b>Fassadenelement-Primärkonstruktion-Anschluss</b>	<b>71</b>
6.1.	Holz-Primärkonstruktion-Anschluss für geschosshohe Fassadenelemente . . . . .	71
6.1.1.	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	74
6.1.2.	Geschossdeckenanschluss bei brüstungshohen Elementstößen . . . . .	94
6.1.3.	Variante2 . . . . .	114
<b>7.</b>	<b>Aufstockungsvariante - Untersuchung der Bauteilanschlüsse</b>	<b>122</b>
7.1.	Allgemein . . . . .	122
7.2.	Konstruktionsbeschreibung . . . . .	122
7.3.	Verbindung Pfosten / oberer Riegel . . . . .	123
7.4.	Experimentelle Untersuchung der Verbindung Pfosten / Eckversteifung . . . . .	125
7.4.1.	Übersicht der Versuche . . . . .	125
7.4.2.	Versuchsaufbau 1 . . . . .	125
7.4.3.	Versuchsaufbau 2 . . . . .	127
7.4.4.	Ergebnisse . . . . .	127
7.5.	Experimentelle Untersuchung der Verbindung Riegel / Eckversteifung . . . . .	135
7.5.1.	Versuchsaufbau . . . . .	135
7.5.2.	Ergebnisse . . . . .	136
<b>8.</b>	<b>Aufstockungsvariante - Experimentelle Untersuchung der Fassadenelemente</b>	<b>138</b>
8.1.	Allgemein . . . . .	138
8.2.	Großprüfkörper 1 - Großformat . . . . .	140
8.2.1.	Versuchsaufbau . . . . .	140
8.2.2.	Ergebnisse . . . . .	143
8.3.	Großprüfkörper 2 - Kleinformat . . . . .	152
8.3.1.	Versuchsaufbau 1 . . . . .	152
8.3.2.	Ergebnisse 1 . . . . .	156
8.3.3.	Anpassung Versuchsaufbau . . . . .	162
8.3.4.	Ergebnisse 2 . . . . .	163
8.4.	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	166
<b>Literatur</b>		<b>167</b>
<b>A.</b>	<b>Konstruktionszeichnung der Lager für den Großversuch</b>	<b>A-1</b>

## 1. Kurzbericht

### 1.1. Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft BMEL für die finanzielle Projektförderung und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR für die stets unkomplizierte Projektsteuerung.

Wir bedanken uns bei der Fa. Brüninghoff GmbH & Co KG für Ihren ingenieurtechnischen Input und die CNC Bearbeitungen der Holzprüfkörper.

In das Projekt wurden die Masterarbeiten von Herrn Nico Lorenzen mit dem Titel „Entwurf und experimentelle Untersuchung von Verbindungen in Elementfassaden aus Laubholz (05/2020)“ und Frau Celina Hunschok „Elementierte Fassadensysteme aus Laubholz: Numerische Modellierung und statisch-konstruktive Optimierung von Holz-Glas-Verbundsystemen (07/2023)“ eingebunden, die lobend zu erwähnen sind.

### 1.2. Projektkonsortium

Projektpartner 1: HafenCity Universität Hamburg  
Professur für Fassadensysteme und Gebäudehüllen  
Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff  
Tel. 040 42827-5681  
Email frank.wellershoff@hcu-hamburg.de

Projektpartner 2: HafenCity Universität Hamburg  
Professur für Baukonstruktion  
Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Dahlgrün  
Tel. 040 42827-5036  
Email bernd.dahlgruen@hcu-hamburg.de

Projektpartner 3: Universität Hamburg  
Professur für Baukonstruktion  
MIN-Fakultät / Institut für Holzwissenschaften  
Arbeitsgebiet Holzphysik  
Prof. Dr. Andreas Krause  
Tel. 040 73962-623  
Email andreas.krause@uni-hamburg.de

Projektpartner 4: Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe  
Arbeitsgebiet Holzphysik  
Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler  
Tel. 040 42878-3038  
Email fiedler@tuhh.de

### 1.3. Zielstellung des Gesamtprojekts

Die technischen Entwicklungen im Fassadenbau werden seit Jahren angetrieben von der architektonisch gewünschten maximalen Transparenz der Außenhülle unter den statisch-konstruktiven und bauphysikalischen Randbedingungen, sowie den Randbedingungen der Bauabläufe, des Verglasungsaustausches und des Rückbaus. Vorgefertigte Fassadenelemente werden häufig in der sogenannten Holzständerbauweise erstellt. Diese Bauweise zeigt noch ein großes Potential in der Maximierung der gewünschten Transparenz. Dies kann erzielt werden durch eine hybride Bauweise mit Hartholz (Laubholz), Glas und Kunststoff.

Das Hauptforschungsziel ist das Schaffen einer wissenschaftlichen Grundlage für die weiterführende Entwicklung von hybriden Fassadensystemen aus hochfesten Laubholzprodukten, Kunststoffadapterprofilen und austauschbaren Verglasungen, die entweder nur ausfüllend oder auch in der Fassadenebene aussteifend sind. Abbildung 1.1 zeigt ein Fassadenelement in Holzständerbauweise aus Nadelholz, eine aktuelle Bauweise für großflächige Wandscheiben (oben) und das Entwicklungspotential (unten). Durch hochfeste Laubhölzer und neue Verbindungstechniken, sowie der Nutzung der Verglasung als Schubfeld, können die Verglasungsanteile maximiert werden. Für eine anwendungsorientierte Weiterentwicklung werden die architektonischen und bauphysikalischen Aspekte parallel untersucht und eingebunden.

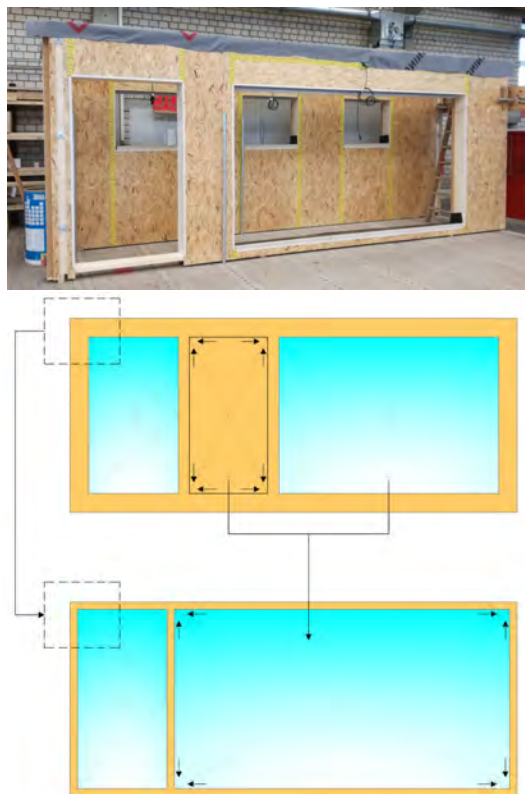


Abbildung 1.1: Holz-Glas-Fassadenelemente  
oben: Stand der Technik (Foto 04.01.2018)  
unten: Entwicklungspotentiale zur Maximierung der Transparenz

Einsetzbar sind solche aussteifenden Holz-Glas-Fassadenelemente im eingeschossigen Neubau oder bei leichten Aufstockungen auf bestehenden Gebäuden mit Flachdächern (städtische Nachverdichtung).

Im Hochbau wird heute bevorzugt eine Skelettstruktur für das primäre Gebäudetragwerk gewählt. Hierbei werden die Deckenscheiben durch ein Stützenraster getragen und die horizontale Aussteifungskräfte werden auf den Gebäudekern mit Treppenhaus und Fahrstuhlschächten konzentriert. Bei dieser Bauweise werden fertig verglaste Fassadenelemente von außen per Kran eingehoben, zwängungsfrei miteinander verbunden und an den Geschossdecken verankert. Diese Elemente nehmen lediglich ihr Eigengewicht und Windlasten senkrecht zur Verglasung auf.



Abbildung 1.2: Holzelementfassade (vorgehängt, nicht aussteifend)

Bevorzugt werden heute Aluminiumprofile bei Elementfassaden eingesetzt. Der Vorteil von Aluminium liegt in der Feuchteresistenz des Materials, so dass Planungs- und Ausführungsfehler zu keinen Feuchteschäden in den Elementen selber führen. Bei sorgfältiger Planung und Ausführung können entsprechende Feuchteschäden bei Holzelementen vermieden werden, so dass dann der materielle Vorteil des Holzes hinsichtlich seines Klimaimpacts genutzt wird. Durch das Forschungsprojekt sollen Impulse gesetzt werden, um Elementfassaden aus Holz (aussteifend oder nicht aussteifend) gesicherter nutzbar zu machen.

Basierend auf den Forschungsergebnissen können Holzbaufirmen entsprechende Systemlösungen weiter zur gewährleistungsfähigen Marktreife entwickeln.

#### 1.4. Haftungsausschluss

Die in diesem Forschungsbericht dargestellten Lösungsdetails sind nicht marktreif und bedürfen weiterer Entwicklungsschritte. Die Forschungsstellen sowie der Forschungsförderer schließen, wie üblich bei Forschungsprojekten, jedwede Gewährleistung und Haftung aus.

### 1.5. Bezug zum Förderprogramm

Bezüge des Gesamtprojekts zum Förderprogramm sind gegeben durch:

- Weiterentwicklung der Laubholzverwendung im Baubereich
- Entwicklung von modularen hybriden Bauteilen
- Entwicklung innovativer Fügetechniken zwischen Holz und anderen Materialien für dauerhafte und wieder lösbare Verbindungen, die den Glasausstausch und das Recycling der Materialien ermöglichen
- Nachweis der Eignung von Klebstoffen und Fertigungstechnologien für innovative Verbindungen von Holz mit anderen Werkstoffen (hier den Kunststoffadapterprofilen für die kraftschlüssige Verbindung von Glas und Holzrahmen).

### 1.6. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Aus statisch-konstruktiver Sicht sind im Einzelnen sechs Verbindungsstellen zu entwickeln:

- Hochsteife Holz-Holz-Rahmenverbindung (Riegel-Pfosten-Verbindungen) für minimierte Querschnitte (Projektpartner 1)
- Horizontale Kontaktstöße der Fassadenelemente (Projektpartner 1)
- Vertikale Kontaktstöße der Fassadenelemente (Projektpartner 1)
- Anschluss der Fassadenelemente an das primäre Gebäudetragwerk (Projektpartner 1)
- Hochfeste und von außen lösbare Verbindungen zwischen den Glasadapterprofilen und den Holzrahmen. (Projektpartner 2)
- Hochfeste dauerbeständige Verklebungen zwischen Glas und Kunststoffadapterprofilen mit mechanischer Resttragfähigkeitssicherung nach ETAG 002 (Projektpartner 3)

Aus bauphysikalischer Sicht sind die Gesamtkonstruktionen hinsichtlich des Feuchteschutzes, sowie des winterlichen und sommerlichen Wärmeschutzes zu prüfen und zu optimieren (Projektpartner 1). Aus architektonischer Sicht sind marktrelevante Wohnungsgrundrisse zu kategorisieren, in die die Fassadenelemente einbezogen werden. Hierzu gehören Analysen und Entwurfsoptimierungen, die in drei Hauptarbeitsschritten die wesentlichen Wirkungsparameter untersuchen, welche in den Wechselwirkungen zwischen Bauteilentwicklung und Architekturentwurf zu optimierten Bauteilen führen können. Die Arbeitsschritte beziehen sich auf Raum- und Grundrissdimensionen und -proportionen, auf Fassadenverläufe und Außenraumfunktionen sowie auf Bauteilfunktionen für die Innenräume (Projektpartner 2).

### 1.7. Chancen und Risiken des Vorhabens

Die Chancen liegen im Zuwachs der Anwendung von Holzwerkstoffen im Bauwesen mit den einhergehenden Vorteilen des CO<sub>2</sub>-neutralen Werkstoffs Holz, der geringen grauen Energiebeträge durch den Einsatz heimischer Laubhölzer sowie der Stärkung der heimischen Holzbau-Wertschöpfungskette.

Die Risiken liegen in der Kundenakzeptanz der Mehrkosten verglichen mit der aktuellen Holztafelbauweise aus Nadelhölzern. Die Mehrkosten können nur dann in größeren Projektzahlen getragen werden, wenn die Preisdifferenz moderat bleibt und durch den architektonischen Mehrwert bzw. Immobilienwert ausgeglichen wird. Daher sollten durch das Projekt Grundlagen geschaffen werden, die möglichst vielen Firmen der Branche eine mittelfristige Produktentwicklung mit vertretbaren Kosten ermöglicht.

## **1.8. Stand der Wissenschaft und Technik**

### **1.8.1. Holzbauweise im Wohnungsbau**

Holz wird im Wohnungsbau häufig als Tragstrukturwerkstoff angewandt. Ein Hauptvorteil gegenüber der „Stein auf Stein“-Bauweise liegt im hohen Vorfertigungsgrad, der die Bauzeit vor Ort unter wechselnden Klimabedingungen wesentlich verringert. Fertighäuser in Holzbauweise gewinnen derzeit kontinuierlich Marktanteile. Die Montage von Holzfertighäusern erfordert einen leistungsfähigen Kran. Da die Montagezeit sehr gering ist, wird üblich ein Autokran verwendet. Daher ist die Größe der Holzwandscheibenelemente lediglich durch den Straßentransport begrenzt.

Wesentliche Vorteile gegenüber der massiven Bauweise sind:

- Geringe Fehleranfälligkeit der Fertigung, da der „Rohbau“ zusammen mit der Gebäudetechnik aus einer Hand geplant wird und die Fertigung der Elemente unter klimaneutralen Bedingungen im Werk erfolgt.
- Große Vorplanungstiefe, d.h. das komplette Haus wird in 3-D konstruiert. Aus dem Gesamtmodell werden die CNC-Daten für die Holzbearbeitung generiert.
- Sehr kurze Montagezeiten. Ein Winterstillstand entfällt, da die thermische Hülle nach nur 2-3 Arbeitstagen bereits steht und der Innenausbau witterungsunabhängig weiterlaufen kann.

Wesentliche Nachteile gegenüber der massiven Bauweise sind:

- Geringere Baumasse. Ein guter Lärmschutz und sommerlicher Wärmeschutz sind jedoch bei entsprechender Planung möglich.
- Begrenzte Abmessungen der Verglasungsflächen. Diese werden derzeit durch folgende Aspekte begrenzt:
  - Erforderliche Steifigkeit der tragenden, opaken Holzrahmenkonstruktion (ohne planmäßige Tragwirkung der Verglasung). Die Steifigkeit muss entsprechend hoch sein, damit die bereits eingesetzten transparenten Elemente (feststehende und bewegliche Fensterelemente) während des Einhebens der Wandscheiben mit einem Kran frei von Zwängungen bleiben und keinen Schaden nehmen. Während der Nutzungszeit sind alle planmäßigen Vertikal- und Horizontallasten von den opaken Holzwandscheiben aufzunehmen.
  - Einbauseite der Verglasung. Üblicherweise werden „Standardfenster“ mit einem von der Innenseite zugänglichen Verglasungsfalz in das Holzständerwerk eingesetzt. Entsprechend müssen Ersatzverglasungen zunächst in den Innenraum transportiert werden. Dies schränkt die Scheibengröße maßgebend ein und setzt auch die Grenzen bei feststehenden Verglasungen.

### 1.8.2. Aussteifende Verglasungen

Der Ansatz Glaselemente zur Aussteifung zu nutzen ist nicht neu. Bereits die filigranen Orangerien, Markthallen und Bahnhöfe des 19. Jahrhunderts nutzten diesen Effekt, jedoch ohne ihn mit unseren heutigen, genormten Methoden nachzuweisen. Erste spezifische wissenschaftliche Untersuchungen mit dem Ziel bautechnische Nachweismethoden bezüglich der Stabilität von aussteifenden Glasscheiben als primäre Tragwerkselemente zu entwickeln liegen ca. 20 Jahren zurück (vgl. [1],[2],[3],[4]). Etwa gleich alt ist der Ansatz hybride Tragkonstruktionen aus Holz und Glas mit tragender Funktion des Glases zu entwickeln (vgl. [5],[6],[7],[8]). Von 2012 bis 2014 wurde in einem internationalen Forschungsprojekt „Urban Wood“ explizit das Potential von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen für den Bausektor untersucht. Als Output dieses Projekts liegen verschiedenste Veröffentlichungen vor, z.B. [9] und [10]. Als Spin-Off ist hieraus auch das System UNIGlas [11] entstanden.

### 1.8.3. Bestehende Lösungen

In den vergangenen Jahren sind bereits Systemlösungen auf den Markt gekommen. Das System Fasco [12] sowie das System UNIGLAS [11] weisen jedoch nur teilweise Gemeinsamkeiten mit dem Systemgedanken auf, der im geplanten Forschungsprojekt verfolgt wird. Die Gemeinsamkeiten sind:

- Die Verglasung wird von außen mittels Schrauben und Adapterprofilen auf die tragende Holzkonstruktion geschraubt.
- Wie beim System Fasco wird beim Adapterprofil auf eine möglichst gleiche thermische Ausdehnung des Adapterprofils geachtet
- Wie beim System UNIGLAS wird ein verzahntes Adapterprofil genutzt, so dass jede Scheibe unabhängig ausgetauscht werden kann.

Die Unterscheidungsmerkmale sind:

- Steifigkeit der Verklebung:
  - In den bestehenden Systemen werden vergleichsweise weiche 2-K Silikone verwendet, die sonst für SSG Verglasungen eingesetzt werden. (Fasco mit Dow Corning 993; Uni-Glas mit OTTOCOLL S660).
  - Angestrebt wird eine vergleichsweise hochfeste Klebverbindung mit geringer Kriechneigung. Möglich erscheinen hochmodulige Silikone wie Dow Corning TSSL oder steifigkeitseingestellte Epoxidharze. Diese höherfesten Klebstoffe erfordern und nutzen das Potential eines Kunststoffverbinders mit geringer Differenztemperaturdehnung zum Glas.
- Elementierung
  - Die bestehenden Systeme werden bereits bei der Erstmontage auf der Baustelle auf eine gegebene, tragende Holzkonstruktion - im Normalfall eine Pfosten-Riegel-Konstruktion - geschraubt.
  - Angestrebt wird eine konsequente Elementierung des gesamten Systems mit Vorfertigung im Werk. D.h. die fertig verglasten Wandscheibenelemente werden auf der Baustelle mit dem Kran eingehoben.

- Aussteifende Wirkung der tragenden Holzkonstruktion
  - In den bestehenden Systemen leisten die Verbinder der Pfosten-Riegel-Konstruktion keinen Beitrag zur Gesamtsteifigkeit
  - Angestrebt werden filigrane Holz-Holz-Verbindungen, die auch ohne Verglasung eine definierte Aussteifungskraft liefern können. Hierdurch können geringere Horizontalkräfte im Zwischenzustand während eines Scheibenaustausches aufgenommen werden.
- Betrachtung der Elementierbarkeit
  - Der Grundgedanke des Projekts ist die gesamtheitliche Betrachtung des Systems. Hierbei sind insbesondere auch die vertikalen Elementstöße sowie die geschossübergreifenden Elementstöße zu beachten. Diese sind in den bestehenden Pfosten-Riegel-Systemlösungen nicht enthalten.

#### 1.8.4. Neuheitswert des Vorhabens

Die bisherigen Forschungsarbeiten beziehen sich auf Details der Stabilität und Anschlüsse bzw. auf explizite Konstruktionslösungen (Demonstrationsprojekte). Hier setzt das Vorhaben an. Durch eine holistische Herangehensweise mit einem Team aus Architekten, Werkstoffwissenschaftlern und Bauingenieuren sollen die Wissenslücken geschlossen werden, so dass die mittelständische Bauwirtschaft mittelfristig Serienprodukte entwickeln kann.

Wesentliche Forschungslücken sehen wir in folgenden Bereichen:

- ganzheitliche architektonische, bauphysikalische und statisch-konstruktive Planung
- verdeckte und wieder lösbare hochsteife Verbindungen für kleine Laubholzquerschnitte
- witterungsbeständige, hochfeste Verklebungen mit geringer Kriechneigung zwischen einem Kunststoffadapterprofil mit annähernd gleicher Temperaturdehnung wie die Glasscheibe, sowie einer bauaufsichtlich erforderlichen Resttragfähigkeitssicherung für den Fall des Versagens der Verklebung
- Tragfähigkeit der gesamten Wandscheibenelemente unter wechselnden Belastungszuständen: Einbebevorgang mit dem Kran, Vertikallasten, horizontale Windlasten senkrecht zur Fassadenebenen sowie Aussteifungslasten in der Fassadenebene
- horizontale und vertikale Kontaktstöße der elementierten Fassadenelemente mit erforderlicher Maßhaltigkeit

## 1.9. Erfahrungen im Fachgebiet und projektbezogene Vorarbeiten – Projektpartner 1

Die Professur für Fassadensysteme und Gebäudehüllen (Projektpartner 1) ist thematisch positioniert in den Schnittstellen zwischen Bauingenieurwesen, Architektur und energetische Gebäudetechnik. Im Fokus der Forschung stehen Themen aus den Bereichen Funktion & Bauphysik, Konstruktion & Sicherheit, sowie Design & Materialien. Aktuelle Forschungsprojekte fokussieren sich auf die Fassadenplanung und Steuerung für natürliche Lüftungskonzepte, Explosionsfolgeschutz im Fassadenbau sowie auf neue Anschlussmethoden für Holzanwendungen in Gebäudehüllen.

Als Vorarbeiten wurden die wesentlichen Forschungslücken und erste konstruktive Lösungsansätze herausgestellt. In Bild 1.3 sind die statisch-konstruktiven Kernentwicklungspunkte dargestellt. Ausgehend von der heutigen Standardlösung mit weichen Nadelhölzern, beplankten Eckverbindungen und nicht aussteifender Verglasung (oben links) ist eine maximale Transparenz möglich, durch hochfeste Eckverbindungen und gleichzeitiger Glasaussteifung (unten rechts).

	Keine Glasaussteifung	Glasaussteifung
Standard Eckverbindungen		
Hochfeste Eckverbindungen		

Abbildung 1.3: Matrix der Holz-Holz-Verbindungen und der Holz-Glas-Aussteifung

Der Einsatz von Laubhölzern mit geringen, teilweise sichtbaren Querschnitten erfordert neue lösbare Verbindungen. Erste Konstruktionsentwürfe für die Eckverbindung wurden im Vorfeld des Projekts bereits erstellt (Abbildung 1.4). Um die Stirnholzverbindungen in kleinen Querschnitten herzustellen, könnten auch Gewebeverstärkungen eingesetzt werden.

Bild 1.5 zeigt exemplarisch die schubfeste Verklebung der Verglasung mit einem Adapterprofil aus glasfaserverstärktem Kunststoff, das wiederum mit den Holzquerschnitten verbunden wird. Ebenfalls dargestellt ist die Holz-Holz-Montagefuge. Die Idee der Verklebung der Verglasung mit einem Adapterprofil ist nicht neu, jedoch werden bislang Verklebungen aus Silikon mit Holzadaptern eingesetzt. Durch höherfeste Klebstoffe und Adapterprofile aus geeignetem Material können diese Verklebungen wesentlich filigraner ausgeführt werden. Ein Ansatz wird in Adapterprofilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff gesehen mit gleicher Temperaturdehnung wie die Verglasung und einem passend eingestellten Klebstoff aus hochmolekularen Silikonen oder Epoxidharz mit geringer Kriechneigung, das

die Material- und Montagetoleranzen ausgleichen kann, jedoch wesentlich steifer ist als die üblichen SSG-Silikone. Der Kunststoffadapter wird im Werk mit der Verglasung verklebt. Sofern bereits das Einheben der Elemente mit dem Kran eine aussteifende Wirkung der Verglasung erfordert, werden auch Glas und Rahmen bereits im Werk miteinander verschraubt. Austauschverglasungen werden mit werksseitig aufgeklebtem Adapter zum Bauort transportiert.

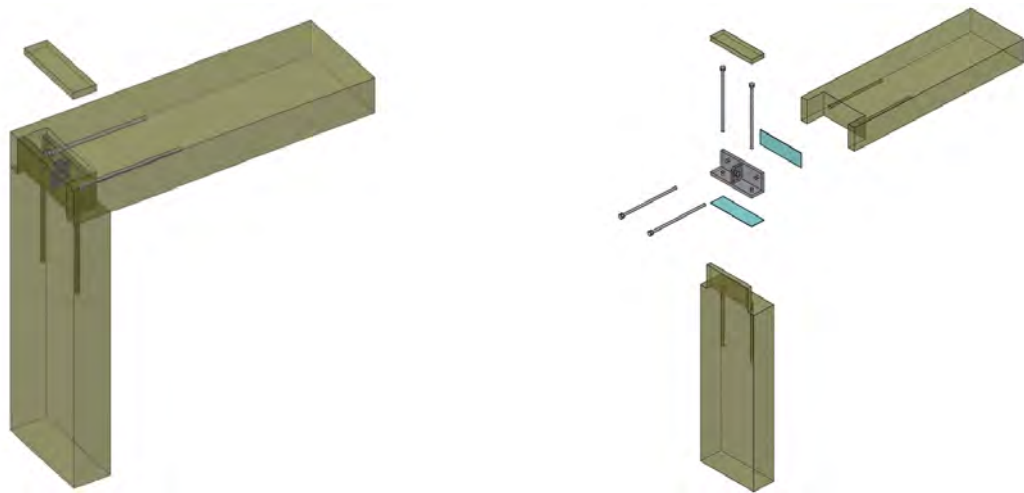


Abbildung 1.4: Hochfeste Holzeckverbindung

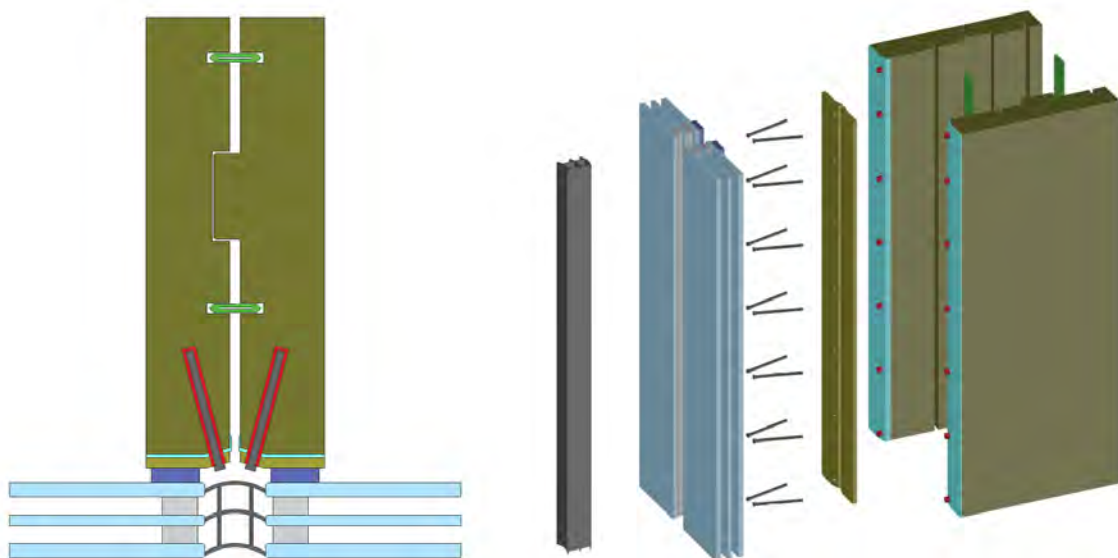


Abbildung 1.5: Holz-Glas-Verbindungen (Horizontalschnitt und Explosionszeichnung)

## 1.10. Beschreibung des Arbeitsplans - Gesamtprojekt

### 1.10.1. Zeitplanung und Arbeitspakete

Die Gesamlaufzeit des Projektes beträgt 3 Jahre. Die Arbeitspakete sind wie folgt gereiht.

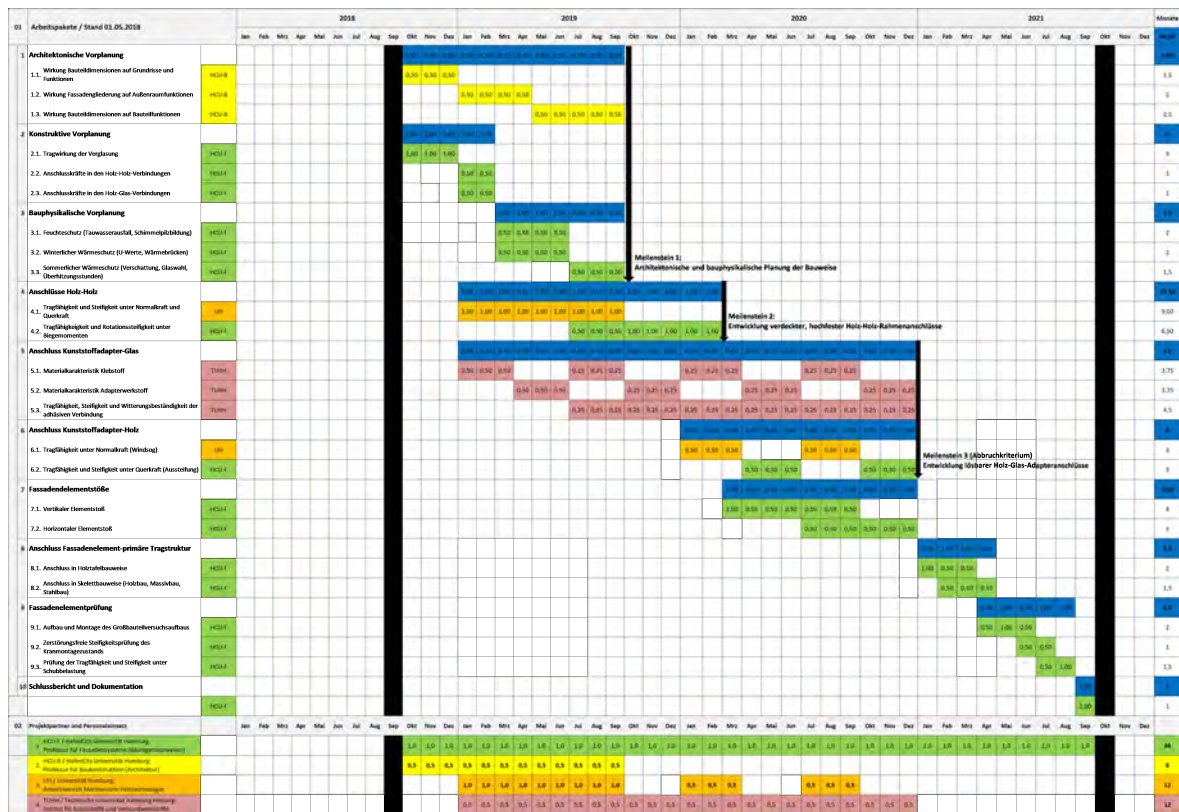


Abbildung 1.6: Arbeitsplan Gesamtprojekt)

### Arbeitspaket 1: Architektonische Vorplanung / Projektpartner 2

#### Arbeitspaket 1.1: Wirkung Bauteildimensionen auf Grundrisse und Funktion

Analyse und Optimierung der Wirkungsparameter von Bauteildimensionen (Fassadenbauteile mit Öffnungen) auf Grundrissdimensionen und Funktionen (Raumhöhen, Raumbreiten, Raumtiefen, Fluchtwege u.a.).

#### Arbeitspaket 1.2: Wirkung Fassadengliederung auf Außenraumfunktionen

Analyse und Optimierung der Wirkungsparameter von Fassadengliederung und -verlauf (vertikal/horizontal glatt oder gestaffelt, raumhoch transparent, mit/ohne Brüstung u.a.) auf Außenraumfunktionen (Balkone, Loggien, Dachterrassen, Absturzhöhen, Anleiterbarkeit, Montage von außen u.a.).

#### Arbeitspaket 1.3: Wirkung Bauteildimensionen auf Bauteilfunktionen

Analyse und Optimierung der Wirkungsparameter von Bauteildimensionen zu Bauteilfunktionen für Innenräume (Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, natürliche/mechanische Be- und Entlüft-

tung, Tageslichtnutzung, Sonnenschutz, Einbruchschutz, Barrierefreiheit bei Durchgang u.a.) sowie Differenzierung aller Parameter in unabdingbare und optionale Bauteilanforderungen an die Bauteilentwicklung.

## **Arbeitspaket 2: Konstruktive Vorplanung / Projektpartner 1**

### *Arbeitspaket 2.1: Tragwirkung der Verglasung*

Bestimmung der Tragfähigkeit aussteifender Verglasungen, die exzentrisch, einseitig, umlaufend mit einem Rahmen verklebt sind. Interaktion zwischen den Aussteifungskräften in der Scheibenebene und Windlasten senkrecht zur Scheibenebene. Numerische Analyse basierend auf vorhandenen Bauteilversuchen und entwickelten Bemessungskonzepten – siehe Kap. 1.8.2.

### *Arbeitspaket 2.2: Anschlusskräfte in den Holz-Holz-Verbindungen*

Bestimmung der Verbindungskräfte in den Holz-Holz Verbindungen anhand der numerischen Modelle aus dem AP 2.1, um realistische Zielgrößen für das AP 4 zu definieren.

### *Arbeitspaket 2.3: Anschlusskräfte in den Kunststoffadapter-Verbindungen*

Bestimmung der Verbindungskräfte in den Holz-Glas-Verbindungen anhand der numerischen Modelle aus dem AP 2.1, um realistische Zielgrößen für die AP 5+6 zu definieren.

## **Arbeitspaket 3: Bauphysikalische Vorplanung / Projektpartner 1**

### *Arbeitspaket 3.1: Tauwasserausfall und Luftdichtigkeit*

Bestimmung der bauarttypischen Konstruktionsmethoden zur Vermeidung von Tauwasserausfall (generell bzw. in der Jahresakkumulation). Fehlerverzeihende Detailplanung mit Rücktrocknungsmöglichkeit von unplanmäßig eindringender Feuchtigkeit bzw. unplanmäßig hoher Baufeuchte. Definition der Ausführungsprinzipien zur Gewährleistung geringer Lüftungswärmeverluste (Zieldefinition der Luftwechselzahl bei 50 Pa Differenzdruck;  $n \leq 0,6$ ).

### *Arbeitspaket 3.2: Winterlicher Wärmeschutz und Vermeidung von Schimmelpilzbildung*

Konstruktive Planung mit angestrebten U-Werten und  $\psi$ -Werten, die zur Erzielung unterschiedlicher Energieeffizienzstandards (EnEV 55, EnEV 40, Passivhaus) erforderlich sind. Erstellung eines Wärmebrückenkatalogs mit unterschiedlichen Dämmstandards für alle Leitdetails. Detailplanung zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung durch hinreichend hohe Oberflächentemperaturen.

### *Arbeitspaket 3.3: Sommerlicher Wärmeschutz*

Detaillierte Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes durch transiente Raumkomfortanalysen zur Bestimmung der Überhitzungstemperaturstunden verschiedener Raum- und Nutzungsrandbedingungen, basierend auf den Arbeitspaketen 1.1. und 1.3.

## **Meilenstein 1: Architektonische, bauphysikalische und konstruktive Vorplanung der Bauweise**

## **Arbeitspaket 4: Anschlüsse Holz-Holz / Projektpartner 1 und 3**

### *Arbeitspaket 4.1: Tragfähigkeit und Steifigkeit unter Normalkraft und Querkraft*

Vorauswahl hochfester Laubhölzer bzw. laubholzbasierter, stabförmiger Holzwerkstoffe als Rahmenmaterial, vorzugsweise Furnierschichtholz, ggf. auch Brettschichtholz aus dünnen Laubholzlamellen; Holzwerkstoffe aus Nadelholz werden nicht den hohen mechanischen Anforderungen gerecht bei

gleichzeitig schlanken Querschnitten. Optionale Entwicklung von Ansätzen zur lokalen Verstärkung der Rahmenwerkstoffe im Bereich der Eckverbindungen bzw. Anschlüsse, z.B. durch Integration von verstärkendem Gewebe. Entwicklung und Erprobung potentiell geeigneter Anschlussmittel, z.B. in das Stirnholz eingeklebter Einschraubanker, Stahllaschen u.ä.. Zu untersuchen ist zudem das Verhalten des Holzes sowie der Anschlüsse unter Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss (Dimensionsänderung durch Quellung und Schwindung), ergänzt durch Entwicklung und Erprobung von Maßnahmen zur Reduktion des hygryischen Verhaltens. Eckverbindungen und Anschlüsse werden mechanischen Prüfungen unter statischen und dynamischen Belastungen in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung im Ausgangszustand sowie nach Alterung unterzogen. Zur beschleunigten Alterung werden die Proben (Rahmenecken) in einer Klimakammer über einen Zeitraum von 2 bis 4 Wochen zyklischen Feuchte- und Temperaturänderungen sowie einer UV-Bestrahlung ausgesetzt. Extreme Beanspruchungen zur Prüfung der Klebverbindung können analog zur Delaminierungsprüfung von Brettschichtholz durchgeführt werden. Hinweise hierzu gibt die DIN EN 14080: 2013-09 „Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen“.

#### *Arbeitspaket 4.2: Tragfähigkeit und Rotationssteifigkeit unter Biegemomenten*

Entwurf geometrisch umsetzbarer Eckverbindungen und Zwischenpfostenverbinder basierend auf den Ergebnissen aus Arbeitspaket 3.1. Bestimmung der Tragfähigkeit und Rotationssteifigkeit dieser Anschlüsse unter quasi-statischer Belastung (weggesteuerte Prüfung mit geringer Geschwindigkeit). Hierauf aufbauend werden die Lastniveaus der weiteren Versuche festgelegt:

- Dauerlasten zur Bestimmung der aussteifenden Wirkung unter permanenter Belastung (z.B. geometrische Imperfektion – Schiefstellung)
- Dynamisch zyklische Belastungen mit verschiedenen Belastungsniveaus zur Bestimmung der aussteifenden Tragwirkung unter Windlasten
- Schockartige Belastungen im Hochgeschwindigkeitsprüfstand bezüglich des Tragverhaltens unter außergewöhnlichen Belastungen wie Ruck und Anstoßen während des Montagevorgangs.

Aus den Bauteilversuchen werden Rotationsfedersteifigkeiten abgeleitet, die in statisch-konstruktiven Ersatzmodellen implementiert werden können.

#### ***Meilenstein 2: Entwicklung verdeckter, hochfester Holz-Holz-Rahmenanschlüsse***

#### **Arbeitspaket 5: Anschluss Kunststoffadapter-Glas / Projektpartner 4**

##### *Arbeitspaket 5.1: Materialcharakteristik Klebstoffe*

Der in AP5.2 zu entwickelnde Adapterwerkstoff soll mit dem Glas verklebt werden. Prinzipiell eignen sich Kleber auf Silikon-, Polyurethan-, Acryl- und Epoxidharzbasis wobei zusätzliche Modifizierungen (z.B. Zähigkeit, Härter, Farbstoffe etc.) die Vielfalt noch erhöhen. Eine Oberflächenbehandlung und das Auftragen von Haftvermittlern (z.B. Silan) kann die Klebeverbindung verbessern, bedeuten aber auch zusätzliche Prozessschritte. In diesem Arbeitspaket soll anhand der Anforderungen ein optimaler Kleber gefunden werden, der sich qualitätssicher anwenden lässt (z.B. vorkonfektionierte Klebefilme) und dauerhafte Festigkeit sicherstellt (AP 5.3).

##### *Arbeitspaket 5.2: Materialcharakteristik Adapterwerkstoff*

Als Adapterwerkstoff ist ein Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoff wegen seiner geringen Wärmeleitung und hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit vorgesehen. Faserart (Glas, Kohlenstoff), Laminataufbau, Laminatdicke und Schraubenverbindung zum Holz sind hinsichtlich der Anforderungen auszulegen und zu bestimmen. Die Wärmeausdehnung ist der des Glases anzupassen. Als Kunststoff werden hier duromere Harze oder Thermoplaste eingesetzt, die die Auswahl des Klebstoffs (AP5.1) beeinflussen. Der umlaufende Adapterwerkstoff trägt zur Steifigkeit und Festigkeit der Gesamtkonstruktion bei.

*Arbeitspaket 5.3: Tragfähigkeit, Steifigkeit und Witterungsbeständigkeit der adhäsiven Verbindung*

Nach Auswahl der Werkstoffe für Klebstoff und Adapterwerkstoff wird Probenmaterial durch geeignete kostengünstige Verarbeitungsverfahren und Verklebungen hergestellt. Die auf Schub zu beanspruchten Proben werden mittels des „Double Lap Shear“ Versuchs (ASTM D3528 – Strength Properties Testing of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading) getestet. Die mechanischen Eigenschaften werden den Anforderungen gegenübergestellt und optimiert. Die mechanischen Tests werden ebenfalls bei tiefen und hohen Temperaturen, nach Alterung durch UV-Licht, Feuchte, Reinigungsmittel und bei zyklischer Belastung (Lebensdauer) als auch Langzeitbelastung (Kriechen) durchgeführt.

**Arbeitspaket 6: Anschluss Kunststoffadapter-Holz / Projektpartner 1 und 3**

*Arbeitspaket 6.1: Tragfähigkeit unter Normalkraft (Windsog)*

Unter dem Aspekt Demontagefähigkeit entfällt die Verklebung der Adapterstreifen mit dem Holzrahmen; als Lösung kommt ein ebener oder T- bzw. L-förmig ausgebildeter Adapter aus AP 5 in Frage, der einerseits mit dem Glas verklebt, andererseits mit der Rahmenkonstruktion verschraubt wird. Die Schraubverbindung ist wieder lösbar. Zusätzliche Aussteifung kann dadurch erlangt werden, dass der Adapter mit T- bzw. L-förmigem Querschnitt in eine umlaufende Nut im Holzrahmen gehalten wird. Orientierende Versuche hierzu sind geplant. Die gesamte Konstruktion Glas-Adapter-Rahmen ist im Labormaßstab nachzubilden – Fläche ca. 1...2 m<sup>2</sup> und als ganze Einheit mechanisch zu prüfen – statische und dynamische Prüfung (sofern möglich). Die Größe der Klimakammer zur Durchführung der beschleunigten Alterung bestimmt die zu prüfende Elementgröße. Ergänzende Einzelprüfungen des Schraubenhaltevermögens und der Adapterfestigkeit sind mittels einer geeigneten Vorrichtung durchzuführen. Die Prüfungen werden sowohl an neuen als auch an gealterten Elementen vorgenommen

*Arbeitspaket 6.2: Tragfähigkeit und Steifigkeit unter Querkraft (Aussteifung)* Basierend auf der Auswahl in AP 6.1 werden Bauteilversuche in Analogie zum AP 4.2 durchgeführt, um das Tragverhalten unter verschiedensten Aussteifungslastfällen zu analysieren.

**Meilenstein 3: Entwicklung lösbarer Holz-Glas-Adapteranschlüsse**

Abbruchkriterium: Sofern kein hinreichend tragfähiger Holz-Glas-Adapteranschluss entwickelt werden kann, wird das Projekt hier abgebrochen.

**Arbeitspaket 7: Fassadenelementstöße / Projektpartner 1**

*Arbeitspaket 7.1: Vertikaler Elementstoß*

Entwicklung und Prüfung von vertikalen Elementstößen mit permanenter Eigengewichtskoppelung ohne Anbindung an eine Geschossdecke. Dieser Stoß ist notwendig bei großen Raumhöhen, die nicht

in einem Stück mit dem LKW transportiert werden können (z.B. für ein zweigeschossiges Atrium) Diese Elementstöße müssen passgenau sein, um eine schnelle Montage zu gewährleisten und gleichzeitig die Verbindungslasten permanent übertragen können. Numerische Planung sowie quasi-statische und dynamischen Prüfungen der entwickelten Stoßvarianten.

*Arbeitspaket 7.2: Horizontaler Elementstoß*

Entwicklung und Prüfung von horizontalen Elementstößen. Diese sollen in Scheibenebene die vorgefertigten Wandscheiben entkoppeln, müssen jedoch Plattenlasten übertragen können um orthogonale Innenwandaussteifungen nicht am Ende jedes Wandscheibenelementes anordnen zu müssen. Numerische Planung sowie quasi-statische und dynamische Prüfungen der entwickelten Stoßvarianten.

**Arbeitspaket 8: Anschluss Fassadenelement- primäre Tragstruktur / Projektpartner 1**

*Arbeitspaket 8.1: Anschluss in Holztafelbauweise*

Für Bauvarianten mit überwiegend tragenden Bauelementen aus Holz (z.B. Wandscheiben wie hier entwickelt verbunden mit Geschossdecken aus Holz) sind die linienförmigen Anschlüsse auf die Verbindungskräfte zwischen diesen Primärtragwerkelementen auszulegen und zu konstruieren sowie numerisch nachzuweisen. In dieser Konstruktionsart übernehmen die Fassadenelemente die vertikalen und die horizontalen Lasten.

*Arbeitspaket 8.2: Anschluss in Skelettbauweise*

Die Wandscheiben wie hier entwickelt können Skelettbaukonstruktion aus verschiedensten Baustoffen horizontal aussteifen. Da das Eigengewicht der Fassadenelemente über das Skelett abgetragen wird, sind die Anschlüsse entsprechend so zu planen und numerisch nachzuweisen, dass keine ungewollten Vertikalkräfte angezogen werden.

**Arbeitspaket 9: Fassadenelementprüfung / Projektpartner 1**

*Arbeitspaket 9.1: Aufbau und Montage des Großbauteilversuchsaufbaus*

Verbindung der Holzelemente, Verkleben der Adapterprofile mit dem Glas, Verschraubung der Adapterprofile mit dem Holzrahmen, Vorbereitung der Bauteilversuche (Widerlagerkonstruktionen und Messinstrumentierung) für die AP 9.2. und AP 9.3.

*Arbeitspaket 9.2: Zerstörungsfreie Steifigkeitsprüfung des Kranmontagezustands*

Prüfung der Steifigkeit unter realem Montagezustand durch Messung der Gesamtverformung (Durchbiegung in Elementmitte, sowie den lokalen Verformungen in den internen Verbindungen des Fassadenelementes (Anschlüsse Holz-Holz – siehe AP 4; Anschluss Kunststoffadapter-Glas – siehe AP5, Anschluss Kunststoffadapter-Holz – siehe AP 6)

*Arbeitspaket 9.3: Prüfung der Tragfähigkeit und Steifigkeit unter Schubbelastung*

Prüfung der horizontalen Steifigkeit des Fassadenelementes. Servohydraulische Prüfung unter quasi-statischer sowie dynamisch-zyklischer Belastung mit verschiedenen Lastniveaus.

**Arbeitspaket 10: Schlussberichte und Dokumentation**

Erstellen des Schlussberichts und Dokumentation

### 1.11. Resümee der wesentlichen Ergebnisse - Projektpartner 1

- Prinzipiell sind die Konstruktionsmethoden aus dem Aluminiumbau in den Holzbau übertragbar, jedoch sind materialbedingte Anpassungen erforderlich.
- Vertikalstöße der Elemente können wie im Aluminiumbau von Pfosten zu Pfosten umgesetzt werden. Diese Stöße führen zu einem Endbiegemoment im Pfosten um dessen starke Profillachse, infolge der exzentrischen Querkraft. Dieses Biegemoment kann durch ein Kräftepaar mit Schrauben aufgenommen werden. Als sehr tragfähig erwiesen sich hierfür modifizierte Arbeitsplattenverbinder mit geringer Spreizwirkung. Bei ausreichenden End- und Randabständen können in einem Pfosten von 25 mm x 160 mm Auszugkräfte von ca. 20 kN erzielt werden. Dies ist für gängige Fassadenelementdimensionen und Windlasten im zielführenden Bereich, auch unter Abschätzung erforderlicher Sicherheitsfaktoren.
- Der Anschluss der Fassadenpfosten an die Geschossdecken kann über zwei modifizierte Arbeitsplattenverbinder oder über 4 Bolzen erfolgen.
- Bei den Fassadenelementen, die nicht Aussteifungskräfte in der Verglasungsebene aufnehmen, sorgt die kraftschlüssige Verbindung zur Verglasung dafür, dass die schlanken Pfostenprofile (25 mm breit) nicht biegedrillknicken.
- Bei den Fassadenelementen, die planmäßig Aussteifungskräfte in der Verglasungsebene aufnehmen, verhielten sich Verklebung zwischen Glas und GFK-Adapterprofil sowie die Verschraubung der Adapterprofile mit den Holzprofilen wie erwartet. Wichtig ist bei der Dimensionierung dieser Verbindungen die Berücksichtigung der Kräfte senkrecht zu den Profillachsen. Als kritisch erwiesen sich die Lastkonzentrationen an den unteren Auflagerpunkten. Hier treffen Pfosten und Riegel zusammen und hohe Kräfte (vertikal wie horizontal) sind von den Fassadenelementen in die Geschossdecken einzuleiten. Diese hohen Anschlusskräfte erfordern ein größeres Schraubenbild, welches sekundär eine Einspannung in diese Eckverbindungen von Pfosten und Riegel bedingt. So kommt es in diesen biegesteifen Ecken, mit entsprechend lastanziehender Wirkung, zu potentiellen Versagenszuständen. Das ursprünglich gewünschte statische System, bestehend aus in der Ebene gelenkig verbundenen Holzprofilen und ein aussteifendes Glasschubfeld, ließ sich konstruktiv nicht umsetzen. Weiterführende Forschung ist erforderlich, um diese Versagenszustände zu beherrschen.

## 2. Fugenplanung

Der konstruktive Entwurf von Fugen elementierter Fassadensysteme stellt eine besondere Herausforderung dar, da zusätzlich zu der Ebene der Verglasung auch die Fugen in der Ebene der Profile geplant werden müssen. Bestimmende Grundsätze sind dabei ein hoher Vorfertigungsgrad und die einfache Montage der Elemente auf der Baustelle.

Um die Montage der Elemente aus dem Gebäudeinneren zu ermöglichen und ein kosten- und zeitintensives Einrüsten des Gebäudes zu umgehen, werden Steckdichtungen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer-Kautschuk) angeordnet. Diese können vor der Endmontage der Fassade angebracht werden und halten sich in vorgesehenen Nuten der entsprechenden Holz- oder Aluminiumprofile. Ihre Profilierung stellt eine Dichtigkeit auch bei Verformungen und Maßabweichungen sicher.

Die thermische Vorplanung einer Fassade ist wichtig, um den Raumkomfort eines Gebäudes positiv beeinflussen zu können. Im Folgenden werden die horizontale und vertikale Fuge mit der Software Therm 7.7 thermisch simuliert.

	Temperatur[°C]	Wärmeübergangskoeffizient [ $W/m^2K$ ]
Innen	20	7,69
Außen	-10	25

Tabelle 2.1: Randbedingungen für die thermischen Simulationen.

Ergänzend ist auch zu beachten, dass die Glasscheibe bzw. das GFK-Profil sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Fuge in gewissen Abständen mit dem Holzrahmen verschraubt sind. Infolgedessen müssen die thermischen Einflüsse der Verschraubung und der Glashalterungen lokal betrachtet werden. Um auf der sicheren Seite zu bleiben, werden die thermische Einflüsse der Verschraubung und Glashalterung in der 2D Berechnung mit abgebildet.

## 2.1. Horizontale Fuge

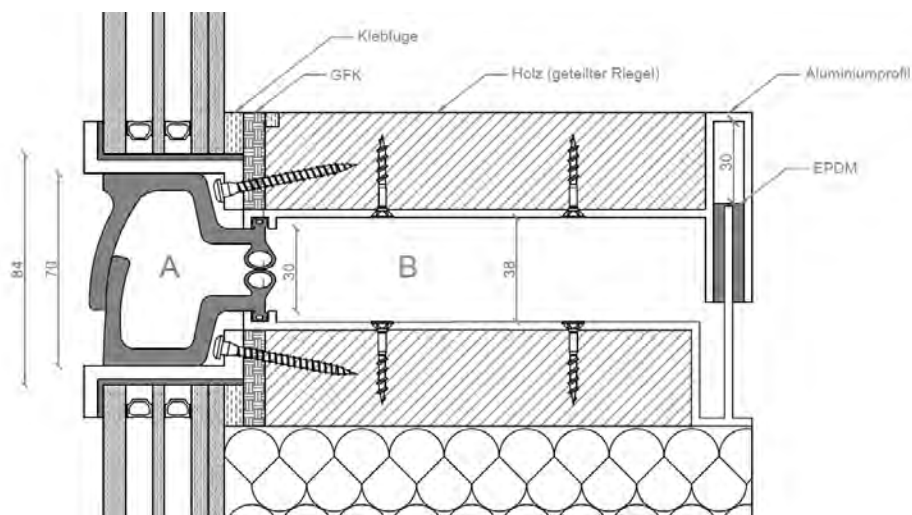


Abbildung 2.1: Horizontale Fuge

Wie in der Abb. 2.1 dargestellt, besteht die horizontale Fuge aus drei Dichtungsebenen. Die erste Dichtungsebene kann durch die Windströmung geöffnet werden, so dass ein Druckausgleich des Hohlraums "A" mit dem Außenluftdruck möglich ist. Die zweite bzw. die blasenförmige Dichtungsebene (kissing gasket) unterstützt die Fuge gegen ein Eindringen von Regenwasser und zusätzlich dient sie als thermische Trennung zwischen dem Hohlraum "B" und der Umgebung bzw. der Hohlraum "A". Die Fugenbreite beträgt in diesem Beispiel  $30 \pm 30\text{mm}$ . Das in der Fuge verschraubte Aluminiumprofil dient einerseits zum Toleranzausgleich ( $\pm 30\text{mm}$ ) in der Fuge und andererseits wurde es als Dichtungshalter ausgelegt. Derweil verhindert das Alu-Profil den direkten Kontakt zwischen dem Holz und dem ggf. entstehenden Tauwasser in der Fuge.

### 2.1.1. Thermische Simulation der horizontalen Fuge

Die thermische Simulation der horizontalen Fuge weist einen Tauwasserausfall auf der Oberfläche des oberen Riegels auf, der durch gute und ausreichende Belüftung des Raums beseitigt werden kann (s. die schwarze Linie in der Abb. 2.2 und Abb.2.3 )

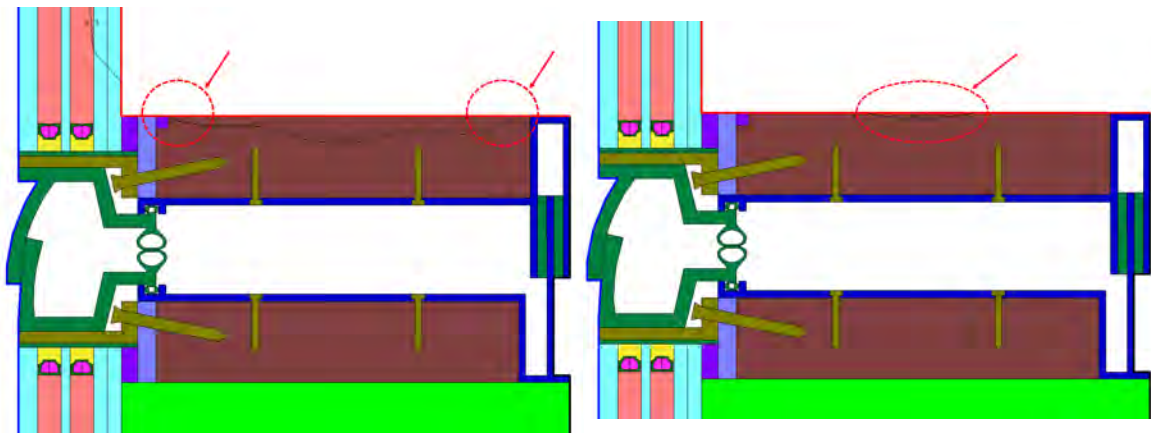


Abbildung 2.2: Tauwasser  
-ausfall bei 9,3 °C

Abbildung 2.3: Schimmelpilz  
-bildung bei 12,6 °C

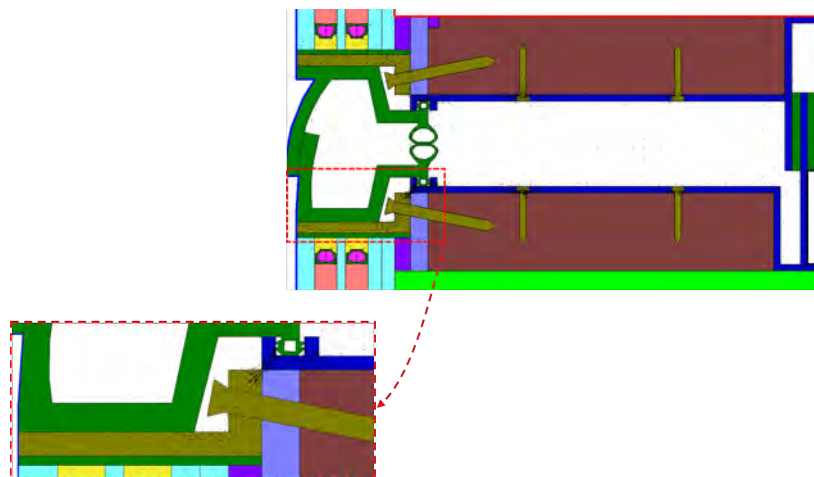


Abbildung 2.4: Wärmefluss

### 2.1.2. Thermischer Einfluss der Glaslagerung

Da die Glaslagerung und die Verschraubung ganz lokal betrachtet werden müssen und da sie eine Wärmebrücke darstellen (s. Abb. 2.4), wird ihr Einfluss auf die Tauwasser- und Schimmelpilzbildung betrachtet.

#### Tauwasserausfall

Die thermische Simulation der horizontalen Fuge ohne Glaslagerung weist sowohl Tauwasserausfall als auch potentielle Schimmelpilzbildung auf der Oberfläche des oberen Riegels auf, dass durch gute und ausreichende Belüftung des Raums beseitigt werden kann (s. die schwarze Linie in der Abb.

2.5). Der Unterschied zwischen den beiden Modellen liegt in der Lokalität des Tauwasserausfalls. Beim ersten Modell fällt Tauwasser nicht nur in der Nähe von der vertikalen Fuge zwischen dem Holz und dem GFK-Profil aus, sondern auch auf der Holzoberfläche. Beim zweiten Modell fällt Tauwasser sowohl auf der Klebschicht zwischen dem Glas und dem GFK-Profil als auch in der Nähe der vertikalen Fuge zwischen dem oberen Riegel und dem Aluminiumprofil aus.

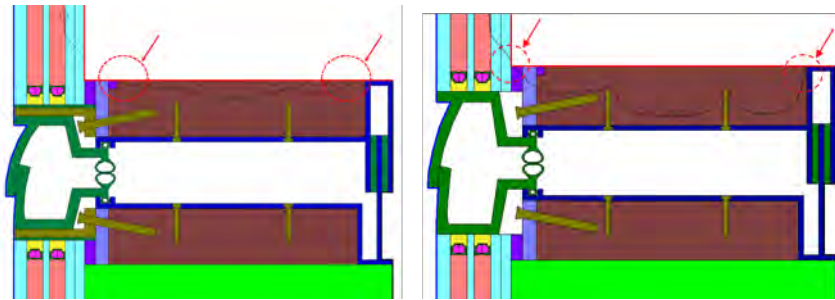


Abbildung 2.5: Tauwasserausfall mit Glaslagerung (links) & ohne Glaslagerung(recht)

### Schimmelpilzbildung

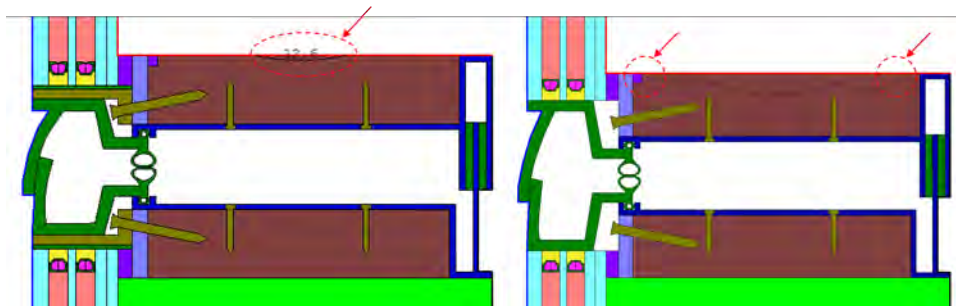


Abbildung 2.6: Schimmelpilzbildung mit Glaslagerung (links) & ohne Glaslagerung (recht)

Wie in der Abb. 2.6 dargestellt, kann Schimmelpilz in beiden Fällen auf der Oberfläche des oberen Riegels auftreten. Der Unterschied zwischen den untersuchten Fällen liegt in der Lage der Schimmelpilzbildung. Im ersten Fall etwa in der Mitte des oberen Riegels und im zweiten Fall sowohl in der Nähe der vertikalen Fuge zwischen Holz und Aluminiumprofil als auch in der vertikalen Fuge zwischen Holz und GFK-Profil.

### 2.1.3. Thermischer Einfluss der GFK-Holz-Verschraubung

#### Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung

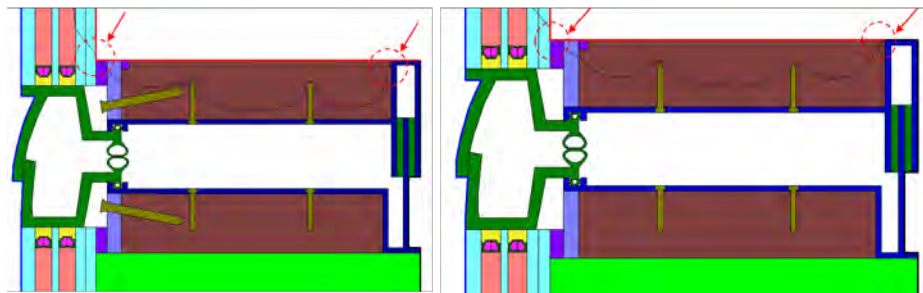


Abbildung 2.7: Tauwasserbildung mit (links) & ohne (recht) GFK-Holz-Verschraubung

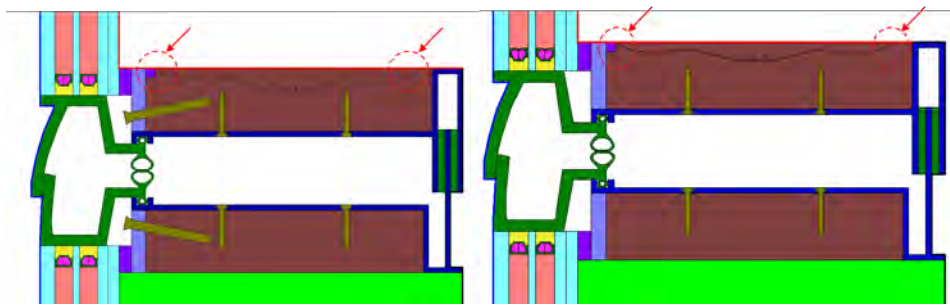


Abbildung 2.8: Schimmelpilzbildung mit (links) & ohne (recht) GFK-Holz-Verschraubung

Wie in den Abb. 2.7 und 2.8 zu sehen, hat die GFK-Holz-Verschraubung weder Einflüsse auf den Tauwasserausfall noch auf die Schimmelpilzbildung.

## 2.2. Vertikale Fuge

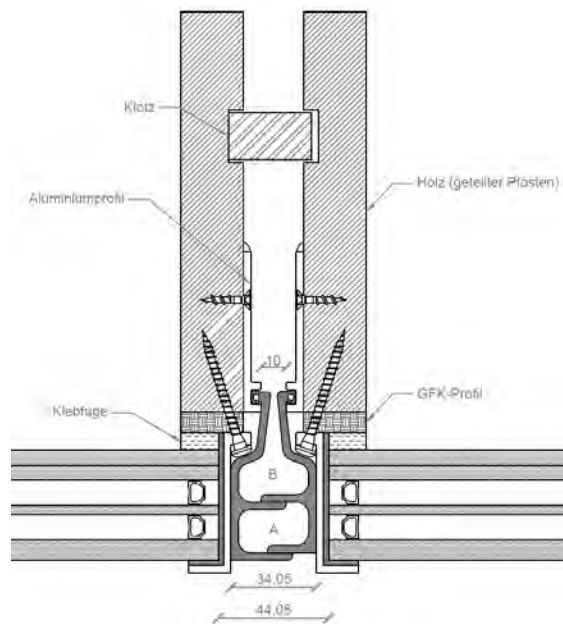


Abbildung 2.9: Vertikale Fuge

Die vertikale Fuge, deren Breite  $10 \pm 3$  mm beträgt, besteht aus zwei Dichtungsebenen. Die erste Dichtungsebene (Schlagregendichtung) kann durch den Winddruck geöffnet werden, dass es zum Druckausgleich des Hohlraums "A" mit dem Außenluftdruck kommt. Die zweite Dichtungsebene sichert gegen ein Eindringen von Schlagregen in die Fuge und dient zusätzlich als thermische Trennung zwischen dem Hohlraum "B" und der Umgebung bzw. dem Hohlraum "A". Anstatt einer Nut im Holz als Dichtungshalter wird ein Aluminiumprofil benutzt. Außerdem würde eine Nut im Holz eine lokale Schwächung darstellen und mit der GFK-Holz-Verschraubung in Konflikt geraten. Die sichtbare Fugenbreite ist mit/ohne den Glashalterungen ca. 34 - 44 mm (der Abstand zwischen den Glaskanten beträgt 44 mm).

### 2.2.1. Thermische Simulation der vertikalen Fuge

Die thermische Simulation der vertikalen Fuge zeigt die potentiellen Positionen für Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung auf der Holz- und GFK-Oberfläche (s. Abb. 2.10).

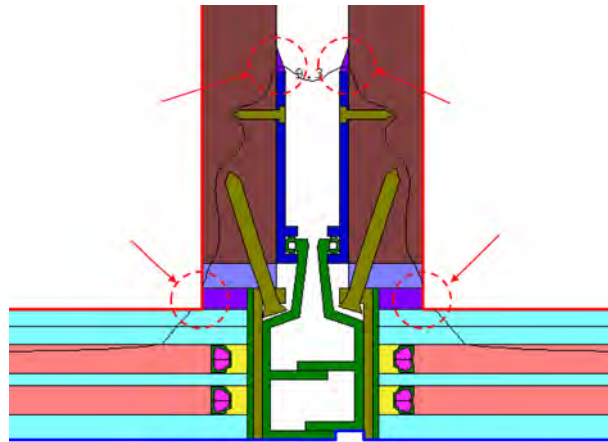


Abbildung 2.10: Tauwasserausfall bei 9,3 °C

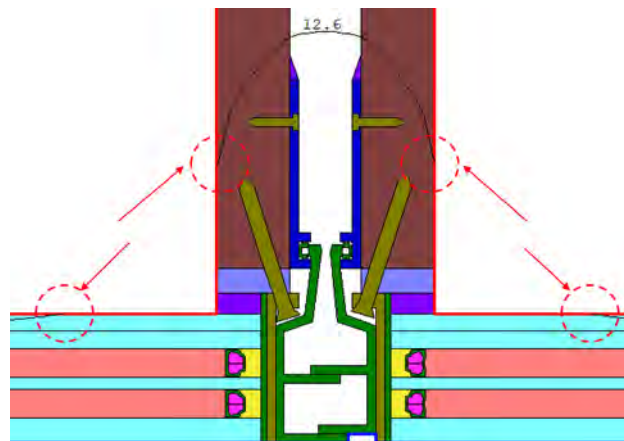


Abbildung 2.11: Schimmelpilzbildung bei 12,6 °C

Wie schon bei der horizontalen Fugenplanung für die Glaslagerung diskutiert, hat auch die Glashalterung in der vertikalen Fuge einen Einfluss auf die Zonen mit kritisch geringen Oberflächentemperaturen. Folgend wird der Einfluss der Glashalterung und die GFK-Holz-Verschraubung auf den Tauwasserausfall und die Schimmelpilzbildung untersucht.

## 2.2.2. Thermischer Einfluss der Glashalterung

### Tauwasserausfall

Die thermischen Simulationen der vertikalen Fuge weisen einen Tauwasserausfall an unterschiedlichen Stellen auf(s. die schwarze Linie in der Abb. 2.12 links).

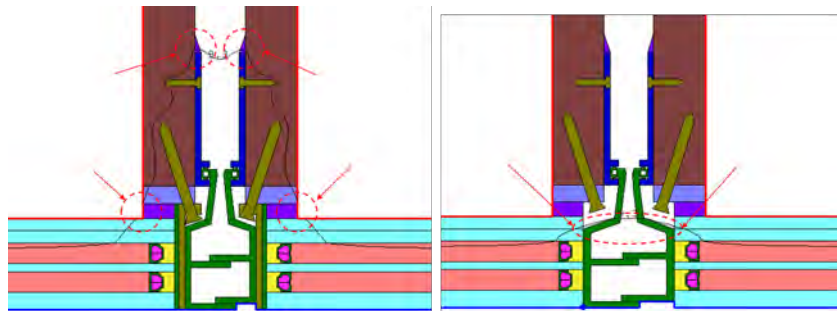


Abbildung 2.12: Tauwasserausfall mit (links) und ohne (rechts) Glashalterung bei 9,3 °C

### Schimmelpilzbildung

Wie in der Abb. 2.13 dargestellt, entsteht eine Schimmelpilzbildung ermöglichende, kritische Oberflächentemperatur ebenfalls in beiden Fällen, im Schnitt ohne Glashalterung jedoch nicht auf der Holzoberfläche. Bei lediglich lokaler Anordnung der Glashalterungen sind daher Fugen ohne Schimmelpilzgefährdung im Detail planbar.

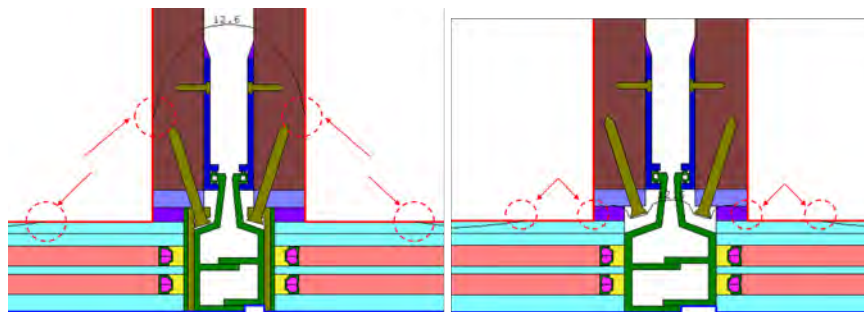


Abbildung 2.13: Schimmelpilzbildung mit (links) und ohne (rechts) Glashalterung bei 12,6 °C

## 2.2.3. Thermischer Einfluss der GFK-Holz-Verschraubung

### Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung

Die thermischen Simulationen der vertikalen Fuge zeigen, dass die GFK-Holz-Verschraubung keinen

signifikanten Einfluss auf den Tauwasserausfall hat. In beiden Fällen fällt das Tauwasser im Hohlraum zwischen den Verglasungen aus, wo sich die erste Dichtungsebene bzw. die Schlagregendichtung befindet (s. Abb. 2.14).

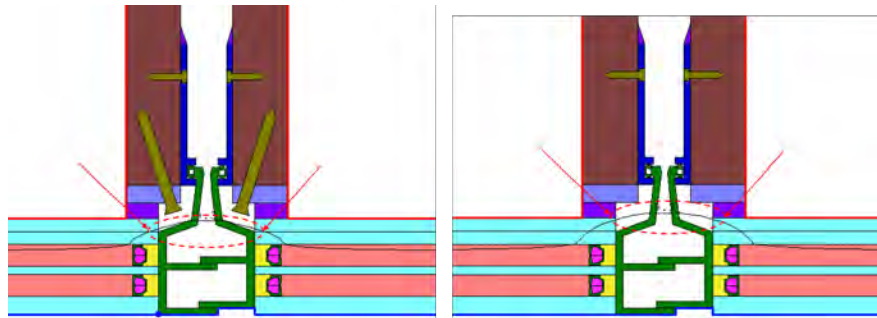


Abbildung 2.14: Tauwasserausfall mit (links) und ohne (rechts) GFRP-Holz-Verschraubung bei 9,3 °C

Die thermischen Simulationen zeigen ebenfalls, dass es eine Schimmelpilzbildung weder im Schnitt mit GFRP-Holz-Verschraubung noch im Schnitt mit GFRP-Holz-Verschraubung auf der Holzoberfläche gibt. Der Unterschied zwischen den beiden Schnitten liegt darin, dass die kritische Oberflächentemperatur im Schnitt mit GFRP-Holz-Verschraubung durch die Wärmeleitfähigkeit der Verschraubung zu dieser „angezogen“ wurde und im Schnitt ohne GFRP-Holz-Verschraubung auf der GFRP-Oberfläche nachgewiesen wird (s. Abb.2.15 ).

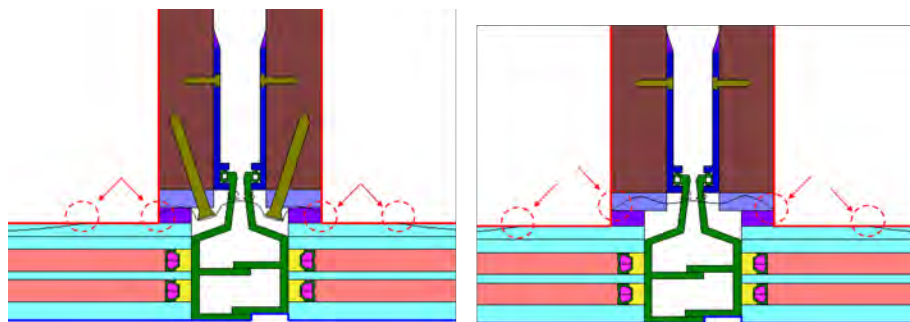


Abbildung 2.15: Schimmelpilzbildung mit (links) und ohne (rechts) GFRP-Holz-Verschraubung bei 12,6 °C

#### 2.2.4. Stand der Technik

Die Abb. 2.16 zeigt den Elementstoß eines aktuellen Systems [13]. Dieser Elementstoß und die in den Abschnitten 2.1 und 2.2 vorgestellten Elementstöße stimmen dahingehend überein, dass die Glasscheibe nicht direkt mit Holz in Kontakt kommt. Die Konstruktionsplanung nach [13] zeigt, dass die Verbindung zwischen der Glasscheibe und dem Holz über ein Aluminiumprofil erfolgt, welches sich über die Fugenseite des Holzprofils erstreckt, um dortige Tauwasserschäden zu vermeiden.

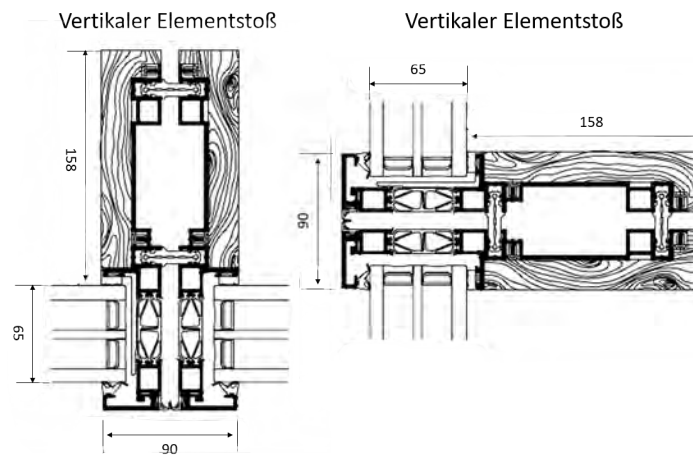


Abbildung 2.16: vertikaler Elementstoß nach [13]

### 3. Charakteristische Eigenschaften der verwendeten Materialien

#### 3.1. Verwendete Holzarten

##### 3.1.1. Eiche Brettschichtholz



Abbildung 3.1: Eiche Brettschichtholz

Das Holz der in Deutschland vorkommenden Stieleichen (*Quercus robur*) und Traubeneichen (*Quercus petraea*) zeichnet sich durch seine besondere ästhetische Qualität aus und wird daher besonders für den Möbel- und Treppenbau verwendet. Das Splintholz erscheint gelblich bis weiß, während das Kernholz eher gelbbraune bis graubraune Töne annimmt. Für die Fassadenelemente wird es in einer weiterverarbeiteten Form als Brettschichtholz verwendet, welches entsprechend der Definition aus mindestens zwei Schnittholzlamellen besteht, die entlang der größeren Seite flächig und faserparallel miteinander verklebt werden. Diese weisen einen Querschnitt von maximal  $70 \times 23$  mm auf. Kombiniertes Brettschichtholz umfasst dabei Lamellen unterschiedlicher Festigkeit. Da die Hölzer der Fassade jedoch besonders in den Verbindungspunkten über den gesamten Querschnitt hohe Belastungen erfahren, wird die Verwendung von homogenem Brettschichtholz empfohlen. Die Wahl fällt auf das Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz der Firma Holz Schiller GmbH, das durch die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-821 erfasst ist. Die Sortierkriterien für das Eichenvollholz umfassen demnach eine visuelle Kontrolle nach DIN 4074-5 mit einer Einstufung in die Sortierklasse LS 13. Darüber hinaus dürfen die sichtbaren Astdurchmesser  $7\text{mm}$  nicht überschreiten. Die Rohdichte des Holzes muss zwischen  $600\text{kg}/\text{m}^3$  und  $750\text{kg}/\text{m}^3$  liegen und die Lamellen müssen mindestens 19 mm dick sein. Sie weisen Keilzinkenverbindungen in Längsrichtung nach DIN 14080 in einem Abstand von mindestens  $300\text{mm}$  auf. Die charakteristische Flachkant-Biegezugfestigkeit der Lamellen beträgt mindestens  $80\text{N}/\text{mm}^2$ , während die der Keilzinkenverbindungen bei mindestens  $60\text{N}/\text{mm}^2$  liegt.

Der wesentliche Vorteil des Brettschichtholzes gegenüber dem Vollholz ist in der Homogenisierung begründet, die einen Vergütungseffekt nach sich zieht. So wird eine höhere Festigkeit und eine bessere Formstabilität erzeugt. Auch die Rissbildung kann durch den Laminierungseffekt vermindert werden. Gemäß der abZ können verschiedene Klebstoffe zum Einsatz kommen. Denkbar sind beispielsweise Aminoplast- und Phenoplast-Klebstoffe, Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Harze, einkomponentige Klebstoffe auf Polyurethanbasis oder Emulsions-Polymer-Isocyanat-Klebstoffe. Die Fugen der resorcinhaltigen Klebstoffe sind dunkel, während alle anderen eher hell oder transparent erscheinen. Der Anteil des Klebstoffes an dem Volumen des Holzproduktes liegt üblicherweise unter 2%.

Bezüglich der Maßhaltigkeit wird auf die in der DIN 14080 (2013-09) in der Tabelle 8 formulierten Toleranzen verwiesen. Demnach muss für die Breite der Querschnitte mit Abweichungen von  $\pm 2\text{mm}$  gerechnet werden, während die Höhe um  $+4$  bis  $-2\text{mm}$  von dem Zielmaß abweichen kann. Im Hinblick auf die Trägerlänge ist mit Toleranzen von  $\pm 0,1\%$  zu rechnen, jedoch bedarf diese Abweichung vor dem Hintergrund des genauen Zuschnittes während der Herstellung der Elemente keiner Beachtung. Das Standard-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz der Firma Holz Schiller GmbH ist in Längen von bis zu  $12\text{m}$  erhältlich. Mit Hinblick auf die serielle Fertigung einer Vielzahl baugleicher Elemente sollte jedoch gegebenenfalls ein individuelles Liefermaß festgelegt werden. Der Holzlieferant bietet darüber hinaus ein Premium-Produkt an, das sich dadurch auszeichnet, keine Keilzinkverbindungen für die äußeren Lamellen zuzulassen. Daher wird auf der einen Seite die Biegefestigkeit des Brettschichtholzes von  $31,5\text{ N/mm}^2$  auf  $59,0\text{ N/mm}^2$  erhöht, auf der anderen Seite sind diese Träger nur mit einer maximalen Länge von  $4\text{m}$  erhältlich. Für die Fassadenpfosten ist diese Länge jedoch grundsätzlich ausreichend, sodass auf Kundenwunsch auch das Premium-Produkt verbaut werden kann.

Alternativ zu dem Eichenholz ist auch Brettschichtholz aus Buche und Kastanie mit etwas geringerer Tragfähigkeit erhältlich. Auch diese Produkte sind bereits durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen erfasst. Weiterhin darf auch die Markteinführung von Birken-Brettschichtholz erwartet werden.

Die Materialkennwerte des im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten Produktes wird nachfolgend mit den weiteren bereits durch Zulassungen erfassten Brettschichtholzprodukten aus Laubholz verglichen.

		Eiche-Pfosten-Riegel-BSH	Brettschichtholz aus Kastanie	Brettschichtholz aus Buche
Zulassung		abZ Z-9.1-821	ETA-13/0646	abZ Z-9.1-679
Sortierungsklasse		LS13	LS13	LS10,LS13
Aufbau		homogen	homogen	homogen
Abmessungen	Breite [ mm]	50 -70	70-220	≤ 160
	Höhe [ mm]	76-280	80-400	≤ 600
	Länge [ mm]	≤ 12 m	≤ 13.50 m	-
Biegung [ $N/mm^2$ ]	$f_{m,k}$	31.5	30	28-48
Zug [ $N/mm^2$ ]	parallel $f_{t,0,k}$	28.5	20	21
	senkrecht $f_{t,90,k}$	0.6	0.7	0.5
Druck [ $N/mm^2$ ]	$f_{c,0,k}$	48	45	25
	$f_{c,90,k}$	9	5.5	8.4
Schub [ $N/mm^2$ ]	$f_{v,k}$	5.5	4.2	3.4
Steifigkeit [ $N/mm^2$ ]	$E_{0,mean}$	14000	13000	13500-15100
	$G_{mean}$	650	520	650
Rohdichte [ $kg/m^3$ ]	$\rho$	680	730	650
Nutzungs-kategorie		1,2	1,2	1

Tabelle 3.1: Materialkennwerte BSH Eiche, Kastanie, Buche

Bei dem konstruktiven Entwurf metallischer Holzverbindungen unter der Verwendung von Laubhölzern ist die, durch die akzessorischen Holzbestandteile hervorgerufene, Korrosionsproblematik besonders zu beachten. Gerade Eichenholz ist aufgrund des niedrigen pH-Wertes von 3,9 und den enthaltenen korrosiven Bestandteilen sehr betroffen. So besteht das Holz europäischer Eichen zu durchschnittlich 6,8 % aus flüchtiger Essigsäure und zu 3-13 % aus hydrolysierten Gerbstoffen. Bei einwirkender Feuchtigkeit reagieren die gelösten Eisenionen mit den im Holz enthaltenen Säuren. Dieser Prozess bewirkt eine Verringerung der Zugfestigkeit, die auf die Veränderung der Holocellulose zurückzuführen ist. Weiterhin bewirkt die Kontaminierung mit Eisen und die resultierende Reaktion mit den gelösten Gerbstoffen eine graublau bis schwarze Verfärbung des Holzes und somit eine starke optische Beeinträchtigung der Fassade. Die Reaktion kann durch die Verwendung verzinkter Metallbauteile verhindert werden. Da jedoch eine Verzinkung den über die Lebensdauer der Fassade einwirkenden dynamischen Belastungen nicht standhalten wird, sind entsprechend belastete Bauteile und Schrauben aus nichtrostendem Stahl wie V2A und V4A auszuführen.

### 3.1.2. Buche Furnierschichtholz

Furnierschichtholz aus Buchen wird bisher ausschließlich in Deutschland hergestellt und für die Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet. Dazu wird die Rotbuche (*Fagus sylvatica*), der hierzulande am häufigsten vorkommende Laubbaum, verwendet. Die Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG hat für

ihr Produkt den Namen „BauBuche“ eingeführt.[14]



Abbildung 3.2: Pollmeier BauBuche

Die BauBuche ist ein Verbund aus drei Millimeter starken Buchenschäl furnieren, die von 1,80 m langen Rundhölzern abgeschält werden und nach dem Trocknen lagenweise miteinander verleimt werden. Dabei werden die versetzt angeordneten Stöße als Schäftungen ausgeführt. Zum Verkleben kommen sowohl Phenol-Formaldehyd-Harze als auch Resorcin-Formaldehyd-Harze zum Einsatz. Diese Kleber lassen die Fugen dunkel erscheinen, jedoch sind auch Träger mit hellen Schäftungsfugen erhältlich. Der Klebstoffanteil am fertigen Produkt beträgt circa 6%.

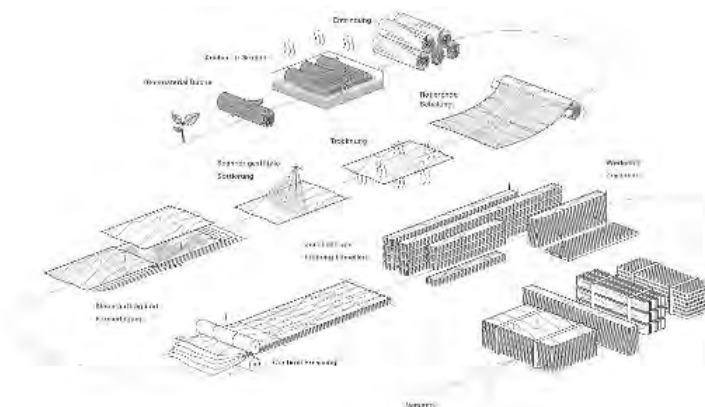


Abbildung 3.3: BauBuche Herstellung

Die entstehenden Platten bestehen entweder aus ausschließlich faserparallel angeordneten Furnieren in der Ausführung „S“, oder aus einer Kombination, die als Ausführung „Q“ bezeichnet wird und einzelne, um 90° gedrehte Furnieren enthält, die einen Anteil von 15% - 30% am Gesamtquerschnitt haben. Diese Platten können bereits als Endprodukt verwendet werden und sind durch die Zulassung abZ Z-9.1-838 bauaufsichtlich eingeführt. Außerdem können aus ihnen Träger hergestellt werden, indem der Trägerhöhe entsprechend breite Streifen aus den Platten ausgeschnitten werden. Im Rahmen

des Forschungsprojektes werden 160 mm hohe Träger der Ausführung „S“ verwendet. Diese Träger zeichnen sich durch eine sehr hohe Tragfähigkeit aus, sind jedoch nicht sehr ästhetisch. Besonders die Schäftungsfugen der äußeren Lamellen stellen eine signifikante Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes dar. Neben diesem stehenden Furnier werden die Platten zu Brettschichtholz, das auch als liegendes Furnier bezeichnet wird, weiterverarbeitet. Dazu werden 40 mm starke Lamellen lagenweise übereinander geklebt. Obwohl keine Keilzinkungen ausgeführt werden, wird die Festigkeitsklasse GL75 erreicht. Dieses Brettschichtholz ist durch die europäische Zulassung ETA-14/0354 erfasst und kommt innerhalb des Forschungsprojektes nicht nur wegen der hohen Festigkeit, sondern auch aufgrund der guten Oberflächenqualität, die durch ein modernes Linienmuster bestimmt ist, zur Verwendung. Durch die gleichmäßige Holzoptik ist dieses Produkt für Konstruktionen im Sichtbereich prädestiniert. Die Brettschichtholzträger sind aktuell in Breiten von 50 mm bis 300 mm und Höhen von 80 mm bis 600 mm verfügbar, sodass die schmalen Querschnitte der Fassadenpfosten und -riegel eine Sonderanfertigung darstellen. Die maximal herstellbare Trägerlänge beträgt 18 m. [?]

Die entstehenden Platten bestehen entweder aus ausschließlich faserparallel angeordneten Furnieren in der Ausführung „S“, oder aus einer Kombination, die als Ausführung „Q“ bezeichnet wird und einzelne, um 90° gedrehte Furnieren enthält, die einen Anteil von 15% - 30% am Gesamtquerschnitt haben. Diese Platten können bereits als Endprodukt verwendet werden und sind durch die Zulassung abZ Z-9.1-838 bauaufsichtlich eingefügt. Außerdem können aus ihnen Träger hergestellt werden, indem der Trägerhöhe entsprechend breite Streifen aus den Platten ausgeschnitten werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden 160 mm hohe Träger der Ausführung „S“ verwendet. Diese Träger zeichnen sich durch eine sehr hohe Tragfähigkeit aus, sind jedoch nicht sehr ästhetisch. Besonders die Schäftungsfugen der äußeren Lamellen stellen eine signifikante Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes dar. Neben diesem stehenden Furnier werden die Platten zu Brettschichtholz, das auch als liegendes Furnier bezeichnet wird, weiterverarbeitet. Dazu werden 40 mm starke Lamellen lagenweise übereinander geklebt. Obwohl keine Keilzinkungen ausgeführt werden, wird die Festigkeitsklasse GL75 erreicht. Dieses Brettschichtholz ist durch die europäische Zulassung ETA-14/0354 erfasst und kommt innerhalb des Forschungsprojektes nicht nur wegen der hohen Festigkeit, sondern auch aufgrund der guten Oberflächenqualität, die durch ein modernes Linienmuster bestimmt ist, zur Verwendung. Durch die gleichmäßige Holzoptik ist dieses Produkt für Konstruktionen im Sichtbereich prädestiniert. Die Brettschichtholzträger sind aktuell in Breiten von 50 mm bis 300 mm und Höhen von 80 mm bis 600 mm verfügbar, sodass die schmalen Querschnitte der Fassadenpfosten und -riegel eine Sonderanfertigung darstellen. Die maximal herstellbare Trägerlänge beträgt 18 m. Zusammen mit der Vielzahl an Lamellen resultiert der Laminierungseffekt in einer hohen Homogenisierung des Produktes, sodass sehr gute Tragfähigkeitseigenschaften erzielt werden können. Verglichen mit den Festigkeiten des Eichen-Brettschichtholzes fällt auf, dass die Biegefestigkeit und die Zugfestigkeit der BauBuche doppelt so hoch sind.

Für den konstruktiven Entwurf ist die Maßhaltigkeit der Holzprodukte zu beachten. Die zu erwartenden Toleranzen der Träger betragen laut Herstellerangaben  $\pm 15\text{mm}$  in Längsrichtung,  $\pm 12\text{mm}$  in der Breite und  $\pm 1\text{mm}$  in der Stärke. Für die Planung ist jedoch das erhöhte Quellverhalten noch wesentlicher. Der Feuchtigkeitsgehalt der Holzwerkstoffe zu Zeitpunkt der Herstellung beträgt nur 8% und liegt damit deutlich unterhalb der zu erwartenden Ausgleichsfeuchtigkeit während der Nutzungsdauer, sodass ein planmäßiges Quellen der Holzbauteile berücksichtigt werden sollte.

		BSH aus Furnierschichtholz	Buchen aus Furnierschichtholz Träger SS"	Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz
Zulassung		ETA-14/0354	abZ Z-9.1-838	abz Z-9.1-821
Nutzungsklasse		1,2	1,2	1,2
Aufbau		homogen	homogen	homogen
Abmessungen	Breite [ mm]	50 -300	21-66	50-70
	Höhe [ mm]	80-600	≤ 1820	76-280
	Länge [ m]	≤ 18	≤ 35	≤ 12
Biegung [ $N/mm^2$ ]	$f_{m,k}$	70	75	31.5
Zug [ $N/mm^2$ ]	parallel $f_{t,0,k}$	55	60	28.5
	senkrecht $f_{t,90,k}$	1.2	1.5	0.6
Druck [ $N/mm^2$ ]	$f_{c,0,k}$	49.5	57.5	48
	$f_{c,90,k}$	8.3	14	9
Schub [ $N/mm^2$ ]	$f_{v,k}$	4	8	5.5
Steifigkeit [ $N/mm^2$ ]	$E_{0,mean}$	16700	16800	14000
	$G_{mean}$	850	760	800
Rohdichte [ $kg/m^3$ ]	$\rho$	680	730	650

Tabelle 3.2: Materialkennwerte Furnierschichtholz

Neben den bereits aufgeführten Baumarten sind weitere heimische Laubhölzer grundsätzlich für die Fassadenelemente verwendbar. Es können Ahorn, Birke, Esche und Pappel genannt werden. Ihr Holz ist jedoch nur eingeschränkt als Schnittholz und Brettschichtholz verfügbar und bedarf für die Verwendung einer Zulassung im Einzelfall.

Grundsätzlich darf über zahlreiche Neuentwicklungen und Verbesserungen der Laubholzprodukte hinaus auch eine allgemeine normative Grundlage erwartet werden. Zusätzlich zu diesem eher anwendungsorientierten Forschungsprojekt konzentrieren sich weitere wissenschaftliche Untersuchungen auf die Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Laubholzes durch nachhaltige und umweltfreundliche Produkte und Verfahren, wie die thermische Modifikation, die die Anwendung von Laubholz in der Nutzungsklasse 3 ermöglichen sollen. Insbesondere für das Brettschichtholz aus BauBuche ist eine Erweiterung der ETA bezüglich der maximalen Abmessungen in Arbeit. So soll die maximale Breite 450 mm, die maximale Höhe 2.500 mm und die maximale Länge der Träger 38 m betragen.

## 4. vertikaler Elementstoß

### 4.1. Einleitung

Ein hoher Vorfertigungsgrad sowie eine einfache Montage auf der Baustelle sind grundlegende Prinzipien für den konstruktiven Entwurf des vertikalen Elementstoßes. Da sich diese Verbindung jedoch bei Fassadenelementen mit einer Brüstung nicht innerhalb des Bereiches der Geschossdecken verstecken lässt, wird gleichzeitig ein hoher architektonischer Anspruch an die Konstruktion gestellt. Weiterhin wird eine Verbindung zwischen den Elementpfosten und den Riegeln entwickelt, die, den Zielen des Forschungsprojektes entsprechend, trotz der geringen Holzquerschnitte eine hohe Rotationssteifigkeit gewährleistet. Der entstehende geometrische Konflikt zwischen dem Elementstoß und der Eckverbindung wird analog zu den bestehenden Lösungen des Aluminiumfassadenbaus durch eine Steckverbindung gelöst, die mit Winkelblechen kombiniert wird. Auf diese Weise wird trotz der räumlichen Beeinträchtigung eine möglichst steife Verbindung zwischen Pfosten und Riegeln realisiert.

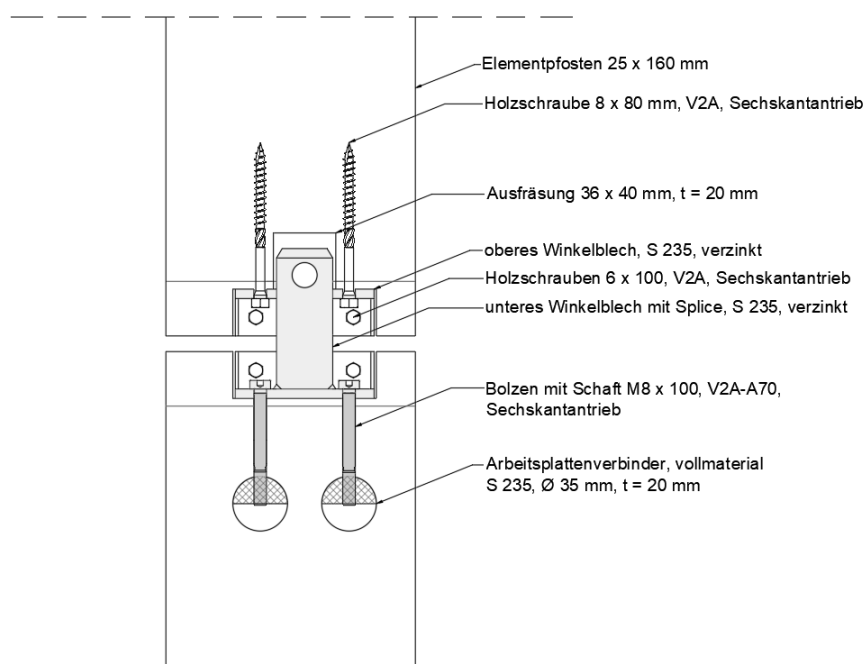


Abbildung 4.1: Vertikaler Elementstoß.

Der vertikale Elementstoß muss als Momenten- und Normalkraftgelenk betrachtet werden. Es werden nur Querkräfte übertragen, die in erster Linie aufgrund von Windbelastungen und Holmlasten infolge der Absturzicherung entstehen und von dem unteren Element zu der Primärstruktur des Gebäudes weitergeleitet werden. Zu diesem Zweck ist an das untere Winkelblech ein Dorn, auch Splice genannt, angebracht, der durch eine Aussparung in das obere Winkelblech geführt wird. In der Kon-

taktfläche werden horizontale Kräfte übertragen, die ein Versatzmoment im Splice erzeugen. Dieses ist abhängig von der Richtung der Windbelastung linksdrehend oder rechtsdrehend und wird durch ein Kräftepaar in den Pfosten übertragen. Dabei entsteht zum einen eine Druckkraft im Holz und zum anderen eine Zugkraft, die über Arbeitsplattenverbinder in den Pfosten eingeleitet wird.

Der Splice wird mit einem Querschnitt von  $14 \times 36$  mm und einer Gesamthöhe von 90 mm ausgebildet. Für die Materialwahl wird verzinkter Stahl S235 empfohlen, es können jedoch auch andere rostfreie Materialien verwendet werden, solange die Gerbstoff-Eisen-Reaktion unterbunden bleibt. Um das Montieren der Fassadenelemente zu erleichtern, verlaufen die oberen 6 mm des Dornes konisch. Aufgrund des so entstehenden selbstzentrierenden Anschlusses können die Elemente auch bei leichtem Wind von möglichst wenig Personal eingehängt werden. Darüber hinaus dient der Splice aufgrund der 16 mm starken Bohrung auch als Anschlagpunkt, um die Elemente einfach mit einem Kran und einer Traverse transportieren zu können. Um jedoch den Kraftfluss während der Nutzungsdauer nicht durch den Anschlagpunkt zu beeinträchtigen, wird die Bohrung oberhalb der Kontaktfläche ausgeführt. Die verschiebbare Verbindung zwischen dem Dorn und dem oberen Winkelblech erlaubt ungleichmäßige vertikale Verformungen der einzelnen Elemente, die beispielsweise infolge von Temperaturdehnungen oder dem Kriechen und Schwinden der Geschossdecken auftreten. Es werden ungewollte Zwangsbeanspruchungen vermieden und vertikale Lasten addieren sich nicht, sondern werden geschossweise an die Primärstruktur übergeben. Die Ausfräsung im oberen Bereich ist etwas großzügiger gestaltet, um den direkten Kontakt zwischen dem Dorn und dem Holz zu vermeiden. Eine konzentrierte Lasteinleitung in diesem Bereich hätte eine Spaltung des Holzes zur Folge. Oberhalb des Dornes werden 10 mm Platz vorgesehen, sodass eine Stauchung übereinander positionierter Elemente um den Betrag der planmäßigen Fugenstärke den Anschluss nicht beeinträchtigt. Außerdem können sich die Elemente in vertikaler Richtung um 26 mm voneinander entfernen, bevor die Lagesicherheit des Anschlusses nicht mehr garantiert werden kann.

Der Splice ist entlang der Vorderseite durch eine HY-Schweißnaht mit dem unteren Winkelblech verbunden. Nicht nur aufgrund dieser Schweißnaht, sondern auch zur Kraftübertragung ist das Winkelblech mit einer 6 mm starken Unterseite ausgebildet. Diese ist, entsprechend der Pfostenstärke, 25 mm breit, sodass eine maximal große Kontaktfläche entsteht, um die Druckkräfte in das Holz einzuleiten. Weiterhin werden zwischen dem Holz und den Winkeln 1,5 mm Abstand gehalten, um eine seitliche Krafteinleitung zu vermeiden, sodass sich die Breite der Bleche zu 89 mm ergibt. So entstehen seitliche Holzblenden, die aufgrund der durchlaufenden Schattenfuge in Form der Dichtung die Ästhetik der Fassade bewahren. Die Höhe der Winkel beläuft sich auf 30 mm, um den Anschluss durch die 35 mm starken Riegel zu verdecken. Die Unterseite und die Rückseite der Winkel werden durch Seitenbauteile verbunden, sodass die Rotationssteifigkeit der Verbindung erhöht wird und bei einer entsprechenden Tragfähigkeit der Schraubenverbindungen eine biegesteife Eckverbindung entsteht.

Die Einleitung der Zug- und Querkräfte in den Pfosten werden über Bolzen aus V2A realisiert, da sich eine Verzinkung aufgrund der zyklisch wiederkehrenden Beanspruchung durch Windlasten auf Dauer lösen würde. Der Schaftdurchmesser der Schrauben beträgt 8 mm. Entsprechend stark wird die Bohrung in dem Winkelblech und dem Holz ausgeführt, sodass ein kraftschlüssiger Kontakt entsteht, der das Übertragen der Querkräfte ermöglicht. Die Zugkräfte werden entweder durch die halbkreisförmige Klemmplatten von Arbeitsplattenverbindern (Hettich AVB  $5 \times 65$ , für die eine Bohrung mit einer Tiefe von 20 mm und einem Durchmesser von 35 mm vorgesehen werden muss.) oder durch die an der HafenCity Universität aus dem Stahl S235 hergestellte Arbeitsplattenverbinder mit dem M8-Gewinde in das Holz eingeleitet (s. Abb. 4.1).

Während die Bolzen im unteren Elementes die Querkräfte des oberen Elementes sowie die Querkraft des angrenzenden Riegels des unteren Elementes übertragen, werden die Holzschrauben des oberen Elementes ausschließlich durch die Querkraft des Pfostens belastet und erhalten keine Normalkraft.

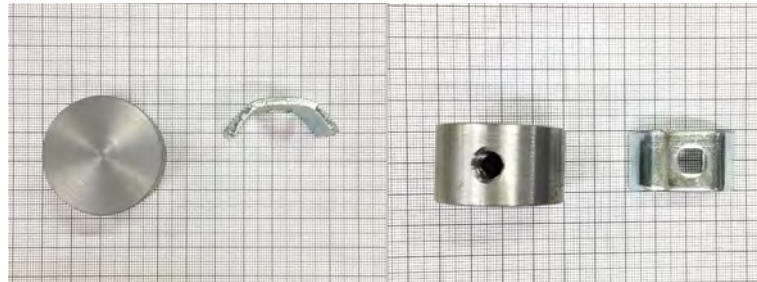


Abbildung 4.2: (links; Variante 2) Die an der HafenCity Universität vorbereitete und die marktübliche Klemmplatte (recht; Variante 1).

Der Anschluss zwischen dem Riegel und dem Winkelblech ist in erster Linie durch Querkräfte infolge von Windeinwirkungen belastet. Der Anschluss wird durch Holzschrauben  $6 \times 100$  aus V2A realisiert. Es wird nur eine geringe Zugfestigkeit erwartet, jedoch fallen auch die Belastungen in axialer Richtung sehr gering aus. Um ein Spalten des Holzes zu vermeiden, sollten die Schraubenlöcher mit zwei verschiedenen Stärken vorgebohrt werden.

Die für diesen Anschluss vorgesehenen Verbindungen sind in Gänze CNC-gesteuert herstellbar und ermöglichen eine werksseitige Fertigstellung. Weiterhin werden die Herstellungskosten durch die Verwendung serienmäßig erhältlicher Schrauben begrenzt.

#### 4.1.1. Empirische Untersuchungen

Die empirische Untersuchungen des vertikalen Elementstoßes läßt sich in zwei Hauptgruppen teilen. In erster Linie wird der Einfluss des horizontalen Abstandes (R) zwischen der Schraubenachse und der Holzkante auf die Holzbeständigkeit unter einer parallel zur Holzfaserrichtung aufgebrachte Kraft untersucht. Danach ist der Einfluss der Einschraubtiefe bzw. Einbindetiefe (T) zu untersuchen (s. Abb. 4.3).

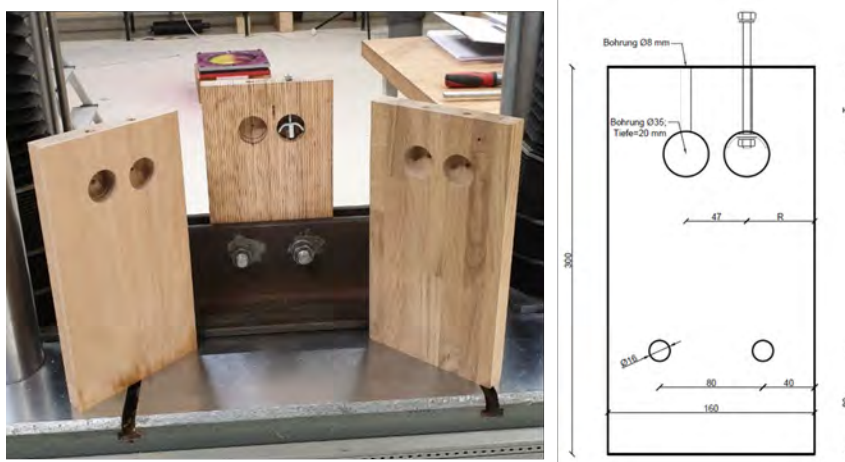


Abbildung 4.3: Versuchskörper aus unterschiedlichen Holzarten

#### 4.1.2. Einfluss des Randabstandes vom Arbeitsplattenverbinder

##### Versuchsaufbau

Die Abbildung 4.1 zeigt die wesentlichen Informationen des Versuchsaufbaus. Ein ausführlicher Plan des gesamten Versuchsaufbaus ist im Anhang enthalten. Zur Befestigung der Probekörper in der Prüfmaschine werden zwei ungleichschenklige Winkelprofile  $L\ 120 \times 80 \times 12$  mit einer Länge von 500 mm verwendet. Sie werden durch zwei Bauschrauben  $M\ 12 \times 40, 4.8$  auf dem Prüftisch befestigt, die im Abstand von 390 mm durch Bohrungen mit einem Durchmesser von 14 mm geführt werden und mit Hilfe von rechteckigen Muttern in den Schraubenkanälen der Prüfmaschine befestigt. Während der Durchführung der Versuche werden diese Schrauben wiederholt handfest angezogen. Die zweiseitige Verbindung zwischen den Winkelprofilen und den Probekörpern wird durch Schrauben  $M\ 16 \times 80$  der Festigkeitsklasse 10.9 hergestellt. Dazu werden in den langen Schenkeln der Winkelprofile spiegelsymmetrische Bohrungen mit einem Durchmesser von 17 mm hergestellt. Für die entsprechenden vorgefertigten Löcher in den Probestücken ist kein Lochspiel vorgesehen, sodass der Probekörper unverschieblich gehalten wird. Um jedoch zu garantieren, dass es unter der Belastung während der Versuchsdurchführung nicht zu einer Verformung im Bereich der Befestigung an die Winkelprofile kommt, wird auf die Schrauben mit Hilfe eines Drehmomentschlüssels eine Vorspannung von 120 Nm aufgebracht.

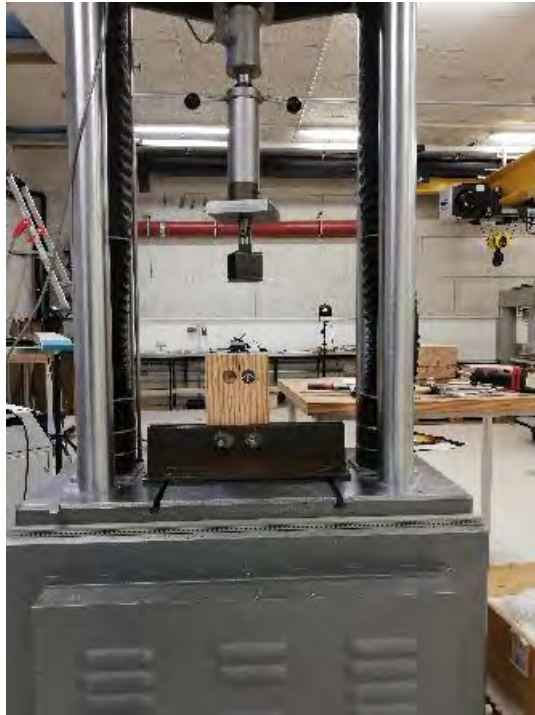


Abbildung 4.4: Versuchsaufbau;vertikaler Elementstoß.

Diese Kraftmessdose des Herstellers Hottinger Baldwin Messtechnik ist direkt unterhalb des Überbaus der Prüfmaschine eingebaut. Das gemessene Signal wird über ein Kabel in den Controller eingespeist, wo es für die EDV übersetzt wird. Für die verwendete Kraftmessdose gilt eine Lastobergrenze von  $20\text{ kN}$ . Eine starre Verlängerung schließt an die Kraftmessdose an. Darunter befindet sich eine  $30\text{ mm}$  starke Platte, die durch eine Gewindebohrung wiederum ein Gelenk aufnimmt, das die Belastung der zu prüfenden Verbindung in ihrer Achse sicherstellt. Die Aufnahme für die Schraube  $M6 \times 100$  ist an dem Gelenk mit einer Sechskantschraube  $M22$  befestigt, die wiederum mit einer weiteren Mutter zwischen dem Adapter und dem Gelenk gekontert ist (s. Abb. 4.5).

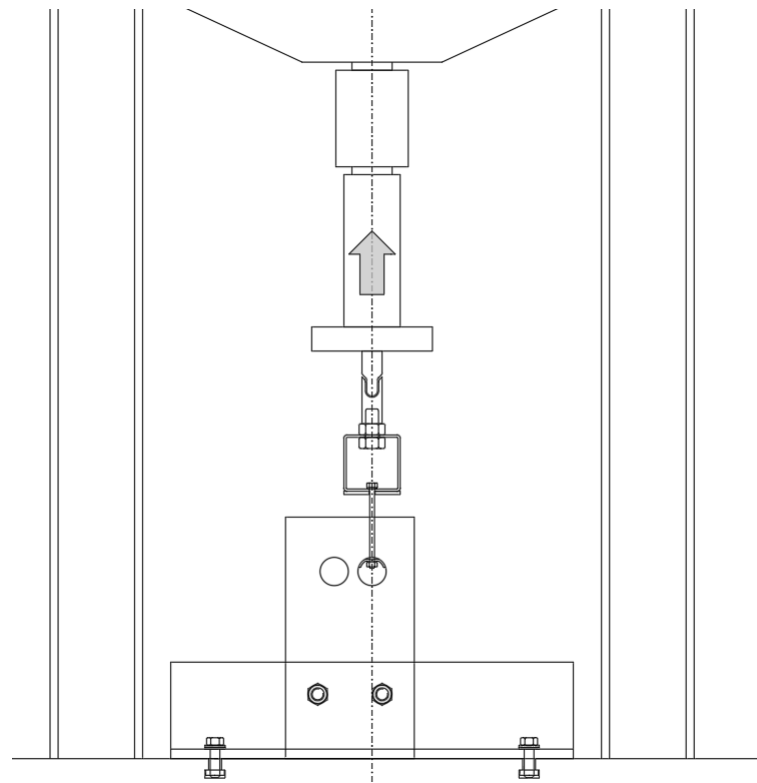


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau;vertikaler Elementstoß; ausziehen der M6-Schrauben.

Die Aufnahme ist aus einem 100 mm langem Quadratrohr QRO 70 × 3,2 gefertigt, das an der Unterseite mit einem 6,5 mm breitem Schlitz von der offenen Seite bis zum Mittelpunkt versehen ist, um das Einführen der Schrauben zu ermöglichen. Um die Verformung des Adapters möglichst gering zu halten, ist die Unterseite mit einem Blech der Stärke  $t=4$  mm verstärkt. Die eigene Messtechnik der Prüfmaschine ermittelt die Verformungen anhand des von dem Überbau zurückgelegten Weges, sodass später nicht eindeutig zwischen der Verformung des zu prüfenden Anschlusses und der Verformung der Prüfvorrichtung unterschieden werden kann. Daher wird auf einem möglichst verformungsarmen Versuchsaufbau Wert gelegt, wenngleich keine großen elastischen Verformungen des Holzes zu erwarten sind, bevor das Tragfähigkeitsversagen eintritt. Abschließend ist vor der Prüfmaschine die Messvorrichtung Aramis 3D installiert. Dazu wird der Aufbau mit zwei Objektiven und der Leuchte an einem Stativ befestigt und in einem Abstand von circa 700 mm auf das Probestück gerichtet. Zusätzlich zu den Aufnahmen, die Aramis 3D liefert, wird der Versuchsablauf durchgehend fotografisch mit einer Spiegelreflexkamera festgehalten, für die ebenfalls ein Stativ vorgesehen ist.

#### Versuchsdurchführung

Vor dem Beginn eines jeden Versuches wird der ausschließlich durch sein Eigengewicht belastete Versuchsaufbau für die Kraftmessung als Referenz eingestellt, sodass während des Versuches nur die Kraft erfasst wird, die tatsächlich auf die Verbindung einwirkt. Anschließend kann ein Probekörper entsprechend dem Versuchsaufbau eingebaut werden bevor die Schraube  $M6 \times 100$  in den Adapter eingeführt wird. Da die Mutter zu diesem Zeitpunkt nicht am Arbeitsplattenverbinder anliegt und

dementsprechend kein kraftschlüssiger Kontakt besteht, muss verhindert werden, dass zu Beginn des Versuches eine Verformungsänderung gemessen wird, ohne dass die aufgebrachte Kraft zunimmt. Es wird ein Fahrbefehl an den Elektromotor der Maschine gegeben, der den Oberbau mit einer Geschwindigkeit von maximal  $10 \text{ mm/min}$  anhebt, bis sich eine konstante Belastung von  $10 \text{ N}$  einstellt. Anschließend wird die aktuelle Position des Überbaus als Referenz für die Verformungsmessung gewählt. Nun wird eine Referenzmessung durch Aramis 3D durchgeführt und der Versuchsdurchlauf ist endgültig initiiert. Nachdem die Versuchsdurchführung begonnen hat, wird der Überbau mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von  $1 \text{ mm/min}$  nach oben gefahren, während fortlaufend das entsprechende Kraft-Verformungs-Diagramm auf der Benutzeroberfläche der Software Test & Motion visualisiert wird. In regelmäßigen Abständen wird der Versuchsdurchlauf mit der Spiegelreflexkamera fotografisch dokumentiert, wobei signifikante Rissbildungen, die sich besonders akustisch bemerkbar machen, festgehalten werden. Die vollständige Zerstörung der Verbindung, die durch einen spontanen Abfall der aufgebrachten Last um mindestens  $50 \%$  ankündigt, gibt den Anlass zur manuellen Beendigung des Versuchsdurchlaufes. Abschließend wird durch die Software Test & Motion automatisch eine xls-Datei erstellt, die die zuvor gewählten Messgrößen der aufgebrachten Kraft und der zugehörigen Verformung enthält.

#### Ergebnisse und Auswertung

Um den Einfluss des horizontalen Randabstandes (R) auf die Holztragfähigkeit zu finden, wird die erste Prüfreihe mit dem halbkreisförmigen APV. und M6-Bolzen mit und mit der Aramis-Software durchgeführt. Die untersuchte Einbindetiefe (T) und Randabstände (R) betragen  $T = 40 \text{ mm}$  und  $R = 25 \text{ \& } 35 \text{ mm}$ . Die erste Versuchsreihe weist auf, dass die verwendeten APV. plastische Verformungen erfahren. Ein direkter Vergleich zwischen den Proben zeigt, dass der horizontale Randabstand (s. Abb. 4.3) keinen großen Einfluss auf den Holzwiderstand hat. Außerdem wird der horizontale Randabstand (R) unter einer parallel zur Holzfaserrichtung aufgebrachten Kraft (unabhängig von der Holzart) sehr gering belastet (s. die Tabelle 4.1).

Die resultierende Ergebnisse aus Aramis zeigen, dass das Eichenholz den größten Lastausbreitungskegel aufweist, jedoch ist der Randbereich der Probe nur leicht von den Verformungen betroffen. Noch geringer ist die Lastausbreitung in dem plattenförmigen Furnierschichtholz. In dem Randbereich der Probe aus Buchenpaneelen ist keine Verformung zu erkennen (s. Abb. 4.6).

Holzart	Versuchsnummer-T-R	$F_{\text{Erststuss}} [kN]$	$F_{\text{max}} [kN]$
Eiche-BSH	111a-40-25	-	14,95
	111b-40-25	-	13,6
	111c-40-25	11,4	12,28
	111d-40-35	-	14,63
	111e-40-35	-	16,89
	111f-40-25	12,4	15,51
B.Buche Platte	121a-40-25	10,7	15,32
	121b-40-25	8,92	15,33
	121c-40-25	8,25	15,13
	121d-40-35	9,91	15,6
	121e-40-35	8,6	16,26
	121f-40-35	9,75	15,43
B.Buche Paneel	131a-40-25	7,41	10,46
	131b-40-25	10,23	13,77
	131c-40-25	8,50	13,43
	131d-40-35	8,84	13,60
	131e-40-35	8,30	13,02
	131f-40-35	8,75	14,79

Tabelle 4.1: Die Tragfähigkeit vom Holz mit unterschiedlichen Randabstände und Einbindetiefen

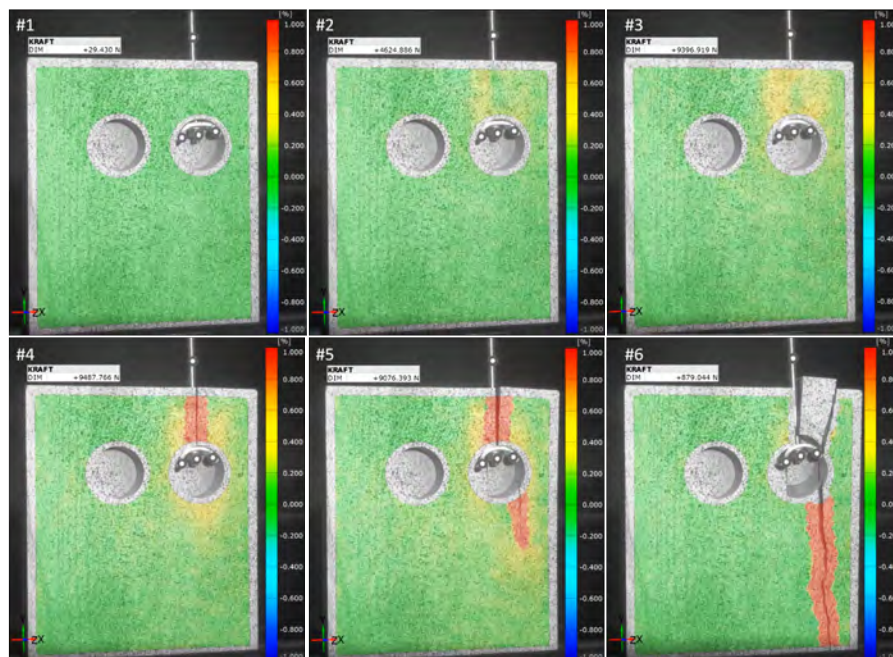


Abbildung 4.6: Die 1% der Hauptverformung; Eiche-BSH ;Versuchsreihe: 111c-40-25; APV: 1. Variante (s. die Abb. 4.2)

Um den Einfluss der plastischen Verformung von der ersten Variante der APV. (s. Abb. 4.7) aus den

Ergebnissen raus zu nehmen und um eine kräftige Aussage über die Belastung des Randabstandes treffen zu können, wurde die zweite Iteration dieser Versuchsreihe mit dem kreisförmigen Arbeitsplattenverbinder (2. Variante) und M8-Bolzen (s. Abb. 4.3) durchgeführt.

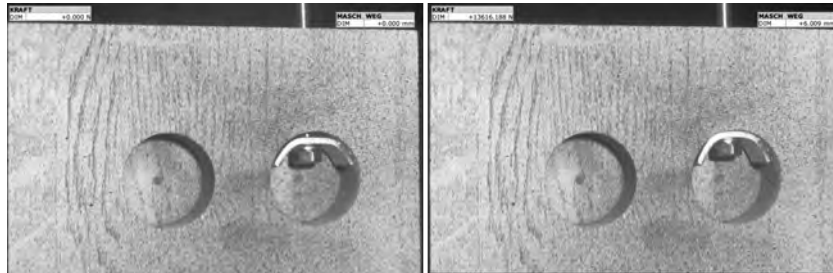


Abbildung 4.7: Die plastische Verformung des halbkreisförmigen Arbeitsplattenverbinders (1. Variante); von der Versuchsreihe 111b-40-25)

Die resultierenden Ergebnisse weisen nach, dass der horizontale Randabstand (R) (s. die Abb. 4.8) weder mit dem halbkreisförmigen APV, noch mit dem kreisförmigen APV, große Belastung erfährt (s. die Abb. 4.8).

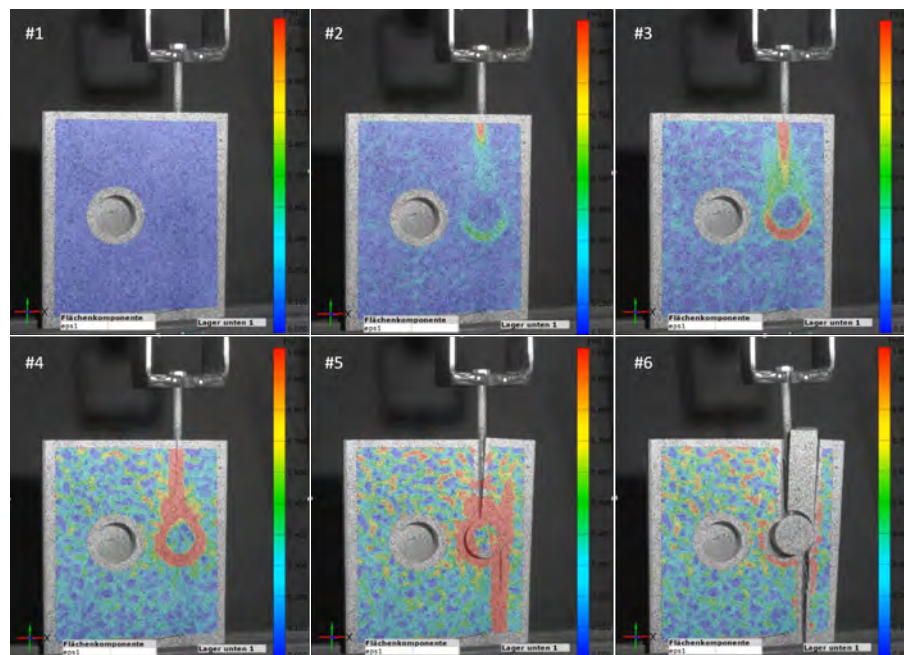


Abbildung 4.8: Die 1% der Hauptverformung; Eiche-BSH ; APV: 2. Variante (s. die Abb. 4.2)

Da die Vergrößerung des horizontalen Randabstandes keinen signifikanten Einfluss auf die Holztragfähigkeit hat und da die Zunahme des horizontalen Randabstandes die Querschnittsverringerung des Dornes zur Folge hat, wird der horizontale Randabstand (R) 25 mm für die nächsten Versuchsreihen

verwendet.

#### 4.1.3. Einfluss der Einbindetiefe vom Arbeitsplattenverbinder

Diese Versuchsreihe bezieht sich auf den Anschluss des Winkelbleches mit dem Splice an den Pfosten eines Fassadenelementes, der im Kapitel 4 gezeigt wurde. Die Windbelastung, die auf das obere Element wirkt, erzeugt ein Versatzmoment im Splice. Dieses wird, entsprechend der folgenden Skizze, durch ein Kräftepaar in den Pfosten aufgenommen.

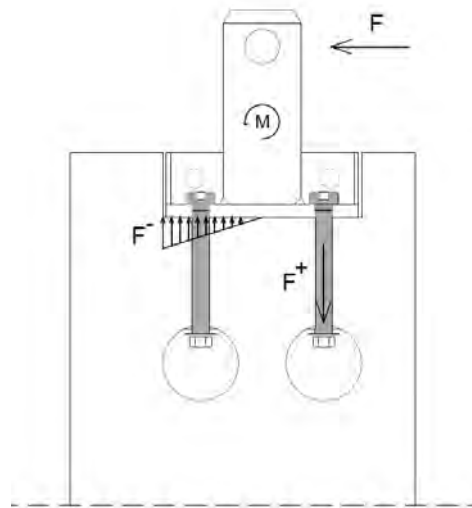


Abbildung 4.9: Die Kräftepaar im Dorn

Um eine erste quantitative Aussage über das zulässige Versatzmoment treffen zu können, wird im Rahmen dieser Versuchsreihe die Zugkraft in Abhängigkeit der Einbindetiefe ermittelt, die von dem Winkelblech über den Arbeitsplattenverbinder in den Pfosten übertragen werden kann. Weiterhin wird untersucht, ob ein sinnvoller Durchmesser der Schrauben gewählt wurde und ob der Anschluss in dieser Weise grundsätzlich weiterverfolgt werden sollte.

Die empirische Untersuchungen dieser Versuchsreihe lassen sich in zwei Gruppen bzw. in zwei Iterationen teilen. Bei der ersten Iteration wird die Holztragfähigkeit mit den Einbindetiefen 30, 40, 50 und 60 [mm] der marktüblichen Arbeitsplattenverbinder (s. die Abb. 4.10) und M8 Bolzen 8.8 untersucht.



Abbildung 4.10: Die marktübliche Klemmplatte mit M8 Bolzen



Abbildung 4.11: Der Prüfkörper (131g) aus dem Baubuche Paneel vor und nach dem Versuch

### Ergebnisse

Grundsätzlich liegt eine recht große Streuung der Testresultate vor, die zum einen auf die begrenzte Anzahl baugleicher Probekörper zurückzuführen ist, zum anderen aber auch durch die Inhomogenität des Baustoffes Holz begründet ist. Auch werden verschiedene Versagensverhalten dokumentiert. Es kommt beispielsweise zum Tragfähigkeitsversagen der metallischen Verbindungselemente, indem das Gewinde der Mutter abschert oder die einwirkende Last die Streckgrenze der Schraube überschreitet und diese in den plastischen Verformungszustand übergeht. Häufiger jedoch wird ein Versagen des Holzes beobachtet. Dabei kommt es zu einem abrupten Versagen, das sich durch ein Spalten des Holzbauteils in Verbindung mit einem Abtrennen ganzer Holzkeile oberhalb der Verbindung zeigt. In der Regel kündigt sich das Versagen der Verbindung im Holz jedoch durch einen ersten signifikanten Riss an. Dieser verläuft von der Bohrung für den Arbeitsplattenverbinder in Richtung der Oberkante des

Probekörpers und wird in dem Kraft-Verformungs-Diagramm entsprechend der folgenden Zeichnung visualisiert. Nach-folgend sind die Testresultate jeweils mit einer Anmerkung zu dem Versagensverhalten tabelliert.

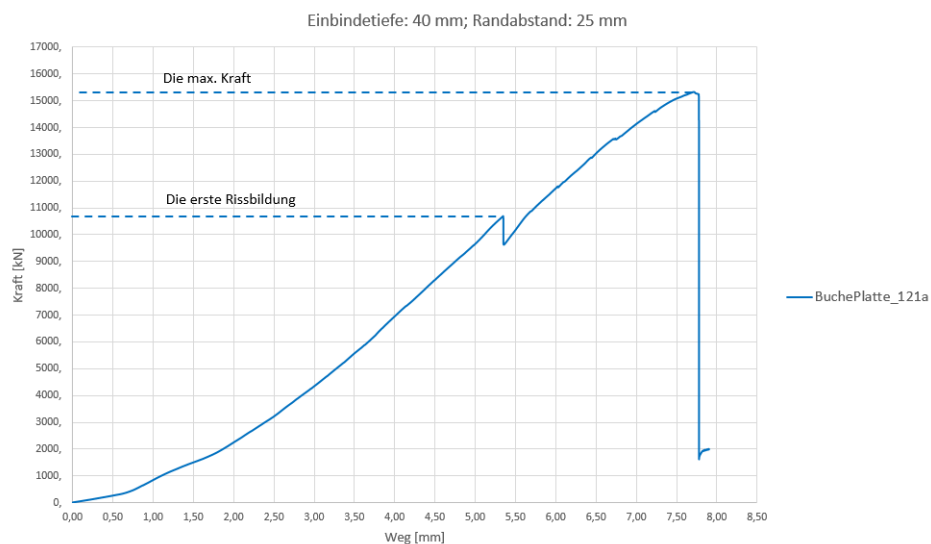


Abbildung 4.12: Die Tragfähigkeit vom Holz unter parallel wirkender Kraft mit  $t = 40 \text{ mm}$  &  $R = 25 \text{ mm}$

Alle Versuche sind darin geeint, dass noch vor einer Rissbildung des Holzes eine plastische Verformung der Klemmplatten festzustellen ist. Diese Verformung der Klemmplatte führt im Holz zu einer Spreizkraft senkrecht zur Faserrichtung, was eine Rissbildung parallel zur Faserrichtung begünstigt. Folglich ist das Verformungsverhalten des Arbeitsplattenverbinders sehr ungünstig.

Eine Gemeinsamkeit aller drei Versagensmechanismen besteht darin, dass der Primär-Riss meistens in der Achse der Schraube auftritt, da der Querschnitt in diesem Bereich besonders geschwächt ist. Wie in der Abb. 4.13 veranschaulicht wurde, ist eine tendenzielle Zunahme der Tragfähigkeit des Verbinders mit der steigender Einbindetiefe der Klemmplatte von 40 mm zum 50 mm zu erkennen.

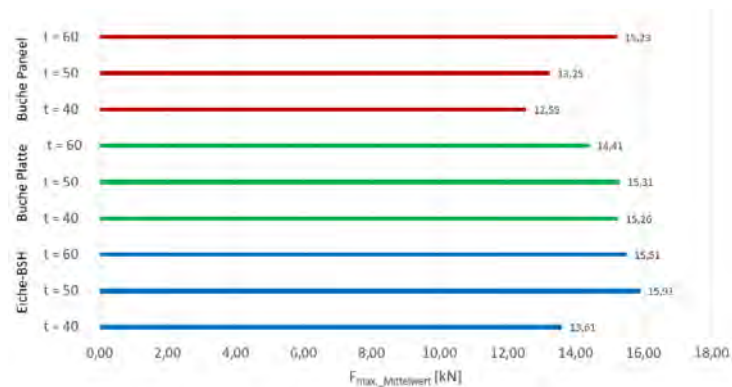


Abbildung 4.13: Der Einfluss der Einbindetiefe der Klemmplatte auf die Tragfähigkeit des Verbinders

Auffallend ist, dass die Tragfähigkeit des Verbinders mit der steigenden Einbindetiefe (vertikaler Randabstand) der Klemmplatte vom 50 mm auf 60 mm beim Eiche-BSH & Baubuche Platte aufgrund des Tragfähigkeitsversagens der metallischen Verbindungselemente, wie z. B. das Abscheren der Mutter oder die Überschreitung der Streckgrenze von Schraube und anschließend der plastische Verformungszustand der Schraube, leicht abnimmt.

Um größere Einbindetiefe der Klemmplatte zu untersuchen, werden die Versuche der zweiten Iteration mit dem kreisförmigen Arbeitsplattenverbinder (s. die Abb. 4.2) und M8-Bolzen 8.8 durchgeführt.

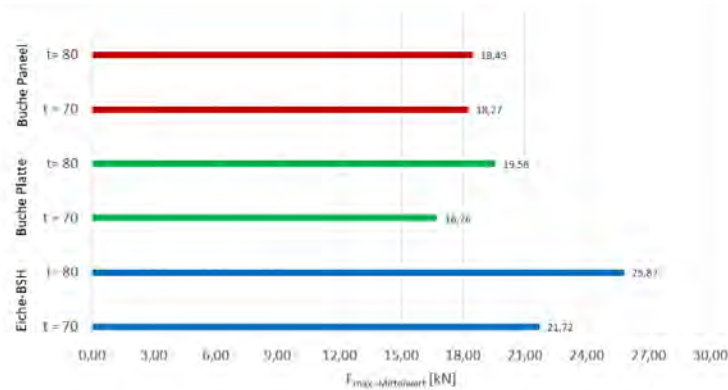


Abbildung 4.14: Einfluss der Einbindetiefe der kreisförmigen Klemmplatte auf die Tragfähigkeit des Verbinders

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine steigende Tragfähigkeit des Anschlusses mit zunehmender Einbindetiefe tendenziell erkennbar ist. Aber eine größere Einbindetiefe ist nicht mehr möglich, da

- eine sehr tiefe Bohrung im Holz zur erhöhten lokalen Temperatur während des Bohrens im Loch führt (s. Abb. 4.15 links)
- die Bohrspitze ganz leicht wegen der Holzfaserrichtungen oder beim eindringen in einer Fuge vom vertikalen Richtung abweichen kann. Je größer die Einbindetiefe ist, desto größer ist die Abweichungsrisiko der Bohrspitze (s. Abb. 4.15 recht)



Abbildung 4.15: Abweichung der Bohrung & Erhöhung der lokalen Temperatur beim Bohren



Abbildung 4.16: Vorbereitung der Prüfkörper an der HCU.

#### 4.1.4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorherigen Untersuchungen zur Folge, nimmt die Tragfähigkeit des Anschlusses mit dem steigenden vertikalen Randabstand der kreisförmigen Arbeitsplattenverbindern zu. Infolgedessen wird der vertikale Randabstand 80 mm und der horizontale Randabstand 25 mm für die weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt.

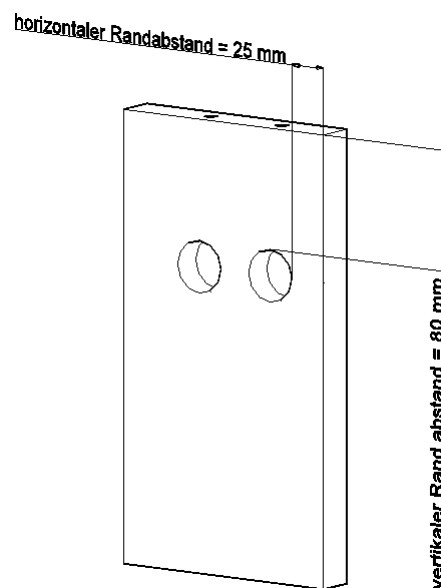


Abbildung 4.17: Finale Randabstände der Arbeitsplattenverbinder

## 5. Pfosten-Zwischenriegel-Verbindung

Die Versuche dieses Abschnittes beziehen sich auf die Verbindung zwischen den Pfosten und dem Zwischenriegel. Dieser Anschluss wird in erster Linie durch senkrecht zu der Fassadenebene wirkende Windlasten beansprucht, die Querkräfte in dem Riegel erzeugen. Darüber hinaus wirken vertikal in der Ebene der Fassade Kräfte infolge des Eigengewichtes von Fassadenbauteilen wie der Verglasung, dem Raffstore und der Verkleidung des opaken Bereiches. Die resultierenden Kräfte werden durch den Anschluss vom Riegel in die Pfosten weitergeleitet und schließlich an die Primärstruktur des Gebäudes übergeben.

In diesem Abschnitt sind zwei Anschlüsse für diese Verbindung vorgesehen. Der erste Anschluss ist der Einschubverbinder Knapp Ricon ® K267/B 66/16 in der Ausfertigung aus Edelstahl, dass laut der entsprechenden europäischen technischen Zulassung ETA-10/0189 (10/2019) dieser in der Einschubrichtung eine charakteristische Tragfähigkeit von  $F_{Rk} = 6,4 \text{ kN}$  aufweist (s. Abb. 5.1).



Abbildung 5.1: Der Knapp-Ricon-Verbinder mit den Sicherungsbügeln

Der zweite Möglichkeit für die Verbindung zwischen den Pfosten und dem Zwischenriegel ist die Schrauben-Holzdübeln-Verbindung. Diese Verbindung besteht aus zwei Tellerkopfschrauben  $6 \times 100$  mm und 16 Holzdübeln  $6 \times 40$  mm aus Eiche, die in einem dreieckigen Raster von  $18 \times 17$  (horizontal  $\times$  vertikal) von einander sind (s. Abb. 5.4).

## 5.1. Prüfkörper

Die Probekörper bestehen aus 3 C-förmig angeordneten Holzbauteilen für die oben genannten Anschlussarten. In die Riegel sind stirnseitig die zu untersuchenden Anschlüsse eingelassen. Die beiden äußeren spiegeln dabei exemplarisch die Elementpfosten mit einem Querschnitt von  $25 \times 160$  mm wieder. Abweichend von den Anwendungsmaßen weisen sie eine Länge von 300 mm auf. Die beiden Pfosten werden durch 300 mm lange exemplarische Riegel verbunden. Da ein reiner Querkraftversuch durchgeführt wird, hat die Länge der Probekörper keinen signifikanten Einfluss auf die Testresultate. Die für die Versuche vorgesehenen Riegel weisen einen Querschnitt von  $35 \times 160$  mm auf.



Abbildung 5.2: C-förmigen Prüfkörper

### 5.1.1. Prüfkörper mit dem Knapp-Ricon-Verbindern

Um den C-förmigen Prüfkörper herzustellen, wird eine nicht ganz durchgehende Nut mit der Breite von 16 mm und der Tiefe von 10 mm gefräst. Sie umfasst je Seite zwei baugleich ausgeführte Anschlüsse bestehend aus jeweils zwei ineinandergreifenden Knapp Ricon K267/B-Verbindern. An den Riegeln werden diese Einschubverbinder mit den vorgesehenen Holzschrauben Knapp  $5 \times 50$  mit verstärktem Schaft verschraubt. An den Pfosten werden die Einschubverbinder entsprechend der Entwurfsbeschreibung durch Senkkopfschrauben  $M5 \times 16$  der Festigkeitsklasse 8.8 angeschlossen. Diese Schrauben binden in 18 mm lange Innengewindehülsen ein, die wiederum durch Schrauben  $M5 \times 8$  und Scheiben  $\varnothing 15/5,3$  mm gekontert sind. Der Außendurchmesser der Innengewindehülsen beträgt 8 mm. Darüber hinaus sind die Schraubenköpfe und die Scheiben auf der Außenseite der Pfosten

kreisförmig mit einem Durchmesser von 16 mm eingelassen.



Abbildung 5.3: Der Knapp-Ricon-Anschluss

#### 5.1.2. Prüfkörper mit den Tellerkopfschrauben & Holzdübeln

Um den C-förmigen Prüfkörper dieser Versuchsreihe herzustellen, müssen die Pfosten ca.  $\varnothing 16 \times 4$  mm wegen der Schraubenkopf,  $\varnothing 6 \times 21$  mm wegen des Schraubenschaftes und  $\varnothing 6 \times 18$  mm aufgrund der Holzdübeln vorgebohrt werden. Ergänzend dazu ist der Zwischenriegel  $\varnothing 4 \times 100$  mm infolge des Holzschraubenschaftes  $\varnothing 6 \times 22$  mm und wegen der rest bleibenden Dübellänge vorzubohren. Außerdem werden die Holzdübel einseitig im Zwischenriegel geklebt.

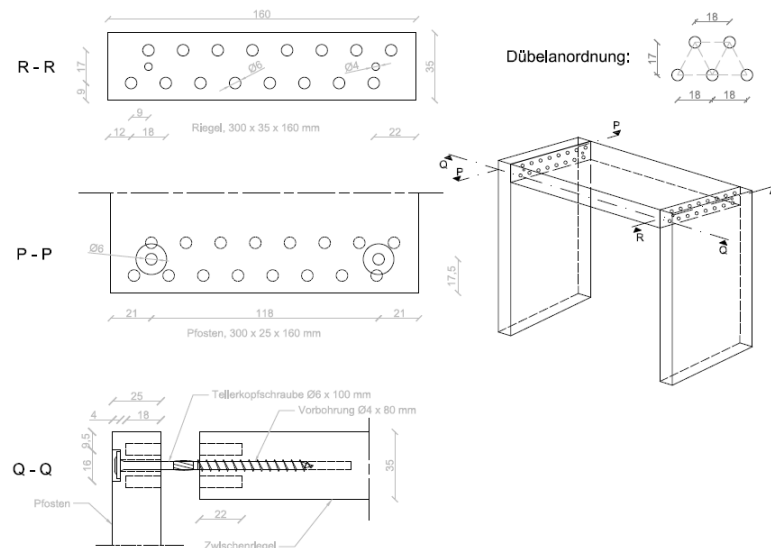


Abbildung 5.4: Der Anschluss mit den Holzschrauben & Holzdübeln

### Versuchsaufbau

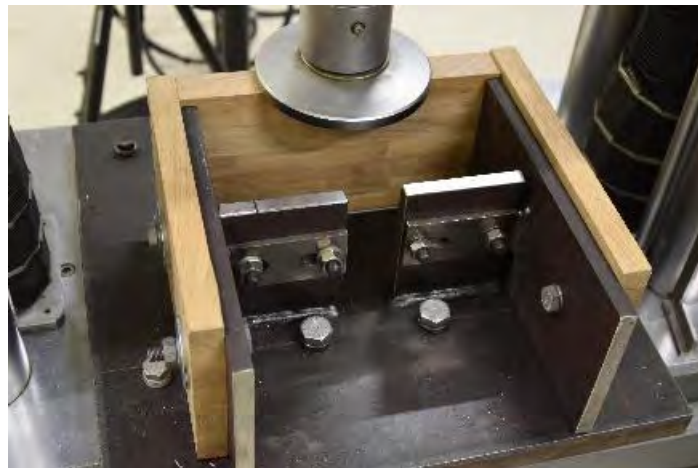


Abbildung 5.5: Versuchsaufbau-Push out-Zwischenriegel

Der Versuchsaufbau muss das Einspannen des Probestückes ermöglichen, sodass der exemplarische Riegel an seiner flachen Seite von oben vertikal durch eine Druckkraft belastet werden kann, während ein Ausweichen des Riegels nach unten ermöglicht wird und einzig der zu prüfende Anschluss einen Widerstand dagegen bietet. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der Versuchsvorbereitung eine Konstruktion aus Stahlblechen erstellt, in die der Probekörper befestigt wird. Die Vorrichtung umfasst unter anderem eine 30 mm starke, rechteckige Adapterplatte mit Kantenlängen von 300 mm und 500 mm. Diese ist sowohl direkt mit der Prüfmaschine durch Schrauben M 12×70, die in die Schraubenkanäle einbinden, als auch mit der Grundplatte durch Schrauben M 16×50 verbun-

den. Auf dieser Platte sind zwei 14 mm starke Bleche lotrecht aufgeschweißt, die jeweils mit zwei Bohrungen des Durchmessers 14 mm versehen sind, um die weiteren T-förmigen Bauteile aufzunehmen. Diese bestehen aus Blechen mit den Abmessungen 150 mm × 300 mm und einer Stärke von 14 mm, die wiederum seitlich aufgeschweißte Fahnenbleche aufweisen. Die Verbindung zwischen den T-förmigen Bauteilen und der Adapterplatte erfolgt über die aufgeschweißten Bleche. Zu diesem Zweck sind die Fahnenbleche mit jeweils zwei 14 mm starken Langlöchern versehen, durch die Bauschrauben M 12×50 geführt werden. Auf diese Weise kann das Außenmaß zwischen den beiden spiegelsymmetrischen T-Stücken entsprechend der Länge der exemplarischen Riegel auf 300 mm justiert werden. An den beiden Blechen dieser T-Stücke, deren Vorderseite auch den Anschlagpunkt der Riegel bildet, werden die exemplarischen Pfosten des Probestückes fixiert. Es werden jeweils 2 Schrauben M12×70, die mit Unterlegscheiben für metallische und hölzerne Verbindungen versehen sind, durch die entsprechenden Bohrungen der Pfosten und der Bleche geführt. Bei der Schraubenverbindung handelt es sich jedoch eher um eine Lagesicherung, da die Pfosten fast vollflächig auf der Adapterplatte stehen. Das Versatzmoment, das ein Abheben des hinteren Bereiches der Pfosten infolge der auf den Riegel aufgebrachten Druckkraft bewirken würde und dementsprechend eine Schubbeanspruchung der Schrauben nach sich ziehen würde, ist verschwindend gering, da ein kleiner Hebelarm der eingeleiteten Kraft von gerade einmal 19,5 mm einem vergleichsweise großen Hebelarm der Schrauben von 83 mm beziehungsweise 213 mm gegenübersteht. Nichts desto trotz werden für die Bohrungen für die insgesamt vier Schrauben mit einem Durchmesser von 12 mm hergestellt, um die Verformungen und die Lochleibungskräfte der Pfosten so gering wie möglich zu halten.

Direkt unterhalb des Überbaus der Prüfmaschine ist eine Kraftmessdose des Herstellers Hottinger Baldwin Messtechnik eingebaut. Je nach dem aktuellen Belastungszyklus handelt es sich dabei um einen Kraftmesser, der mit maximal 20 kN (Belastungszyklus I) oder 200 kN (Belastungszyklus II) belastet werden darf. Unterhalb dieser ist eine kreisförmige Lastverteilungsplatte mit einem Durchmesser von 168 mm angebracht, die durch ein Kugelgelenk gelagert ist. Diese wird zentrisch auf die Oberseite des exemplarischen Riegels geführt. Für den zweiten Belastungszyklus mit deutlich größeren Einwirkungen, wird zusätzlich ein Lastverteilungsbalken aus Stahl zwischen der Lastverteilungsplatte und dem exemplarischen Riegel positioniert. Dieser weist einen Querschnitt von 80×40 mm und eine Länge von 270 mm auf. Er wird zentrisch auf dem Riegel positioniert, sodass eine Schädigung des Holzes oberhalb des Einschubverbinders nur innerhalb eines Randabstandes von 15 mm ermöglicht wird. Das Eigengewicht dieses Balkens ist bei der Auswertung der Einwirkungen zu berücksichtigen.

### 5.1.3. Ergebnisse

Wie im Abschnitt (Versuchsaufbau) 5.1.2 diskutiert, wird der Riegel während des Versuchsdurchlaufes zentrisch belastet und in Gänze vertikal verschoben wird. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Anschlüsse an beiden Seiten recht genau die jeweils gleiche Belastung erfahren. Um die Verschiebungen der Fugen vergleichen zu können, wurde in Aramis zwei Facettenpunkte auf der Oberfläche erstellt, die die Verschiebungen der Fuge repräsentieren (S. Abb. 5.9).

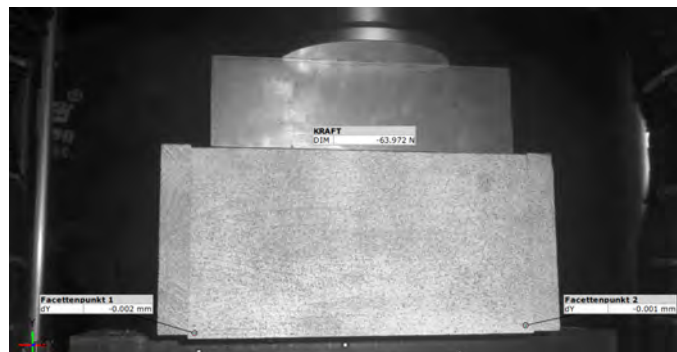


Abbildung 5.6: Der Prüfkörper mit zwei Facettenpunkten

### Knapp-Ricon-Verbinder

Die durchgeführte Versuche dieser Versuchsreihe lassen sich in zwei Gruppen je nach Belastungsrichtung bzw. je nach Windlasten in der Einschubrichtung (Winddruck) und entgegen der Einschubrichtung (Windsog) teilen. Der einzige Unterschied zwischen den Prüfkörpern der ersten und zweiten Versuchsreihe liegt darin, dass die zweite Prüfkörpern über vier Sicherungsbügeln verfügen, um die Verschiebungen gegen der Einschubrichtung zu hindern (s. die Abb. 5.7)

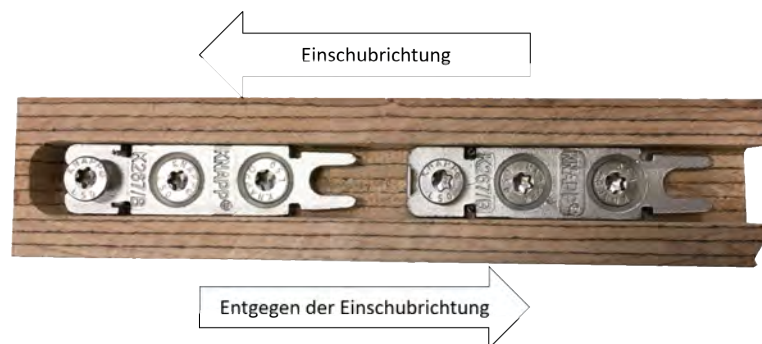


Abbildung 5.7: Zwischenriegel mit Knapp-Ricon-Verbindern

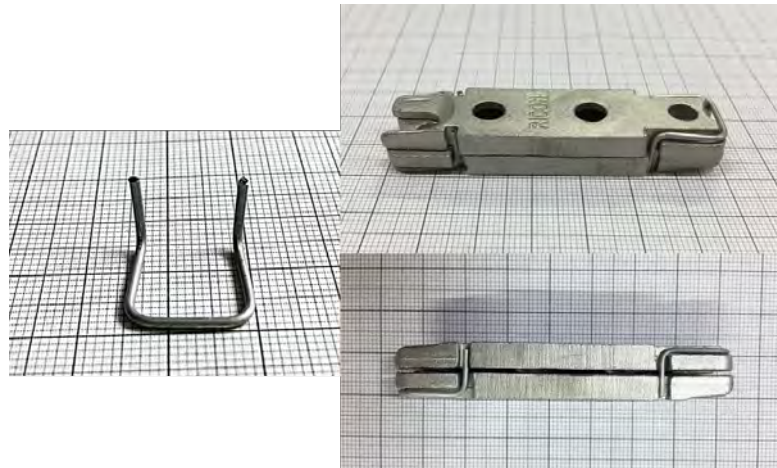


Abbildung 5.8: Sicherungsbügel für den Knapp-Ricon-Verbindern

Pfosten-Zwischenriegel-Verbindung mit Knapp-Ricon-Verbinder;  
Kraftrichtung: In Einschubrichtung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Winddrucks auf die Zwischenriegel-Pfosten-Verbindung untersucht. Die Messergebnisse des Systems Aramis haben gezeigt, dass die Verformungen der rechten Fuge (Verschiebung vom Facettenpunkt 2 in Abb.5.9) in den meisten Fällen größer als die Verformungen der linken Fuge (Verschiebung vom Facettenpunkt 1 in Abb.5.9)ist, obwohl die Proben ganz zentrisch in der Prüfmaschine gelagert und anschließend belastet wurden (s. Abb. 5.9).

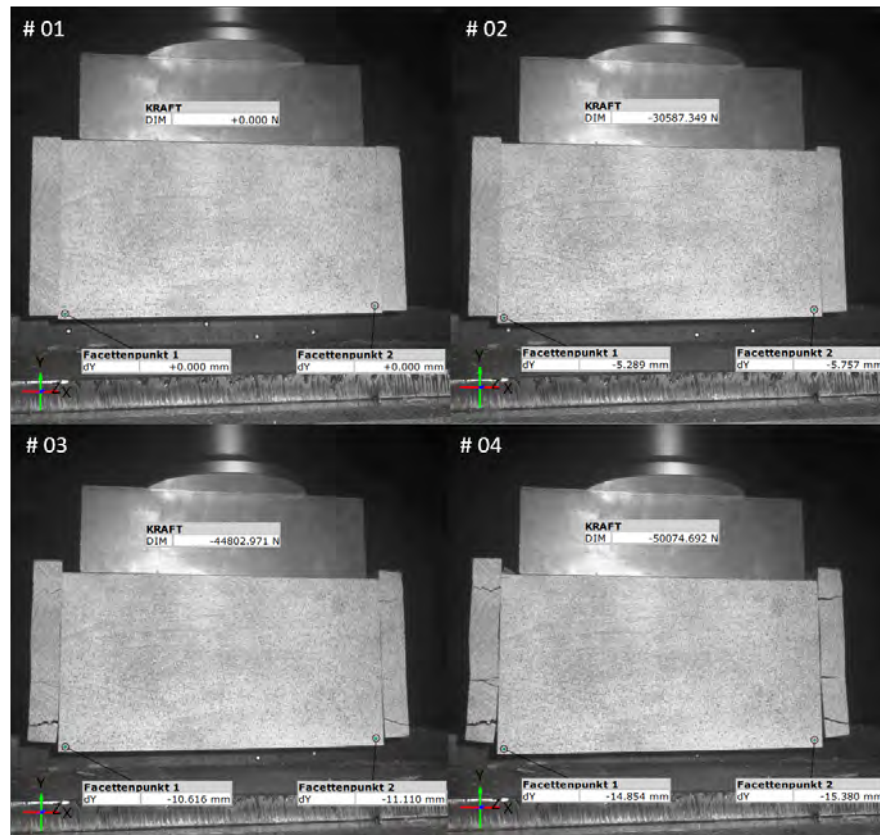


Abbildung 5.9: Verformung der Fugen; Eiche-312a

Beispielweise hat das resultierende Ergebnis von dem ersten Versuchskörper aus Eiche (312a) gezeigt, dass der Verschiebungsgradient zwischen der rechten und der linken Fuge zuerst nach ca. 2,79 mm Verschiebung (bzgl. des Facettenpunktes 2) abnimmt, dann aber ist die Ab- oder Zunahme des Verschiebungsgradientes wechselhaft (s. Abb. 5.10). Dies kann durch die Verschraubung der Verbindungen im Holz verursacht werden.

Die Ergebnisse der weiteren Versuche zeigen auch eine Verschiebungsdifferenz zwischen der rechten und der linken Fuge mit dem unterschiedlichen Verhältnis.

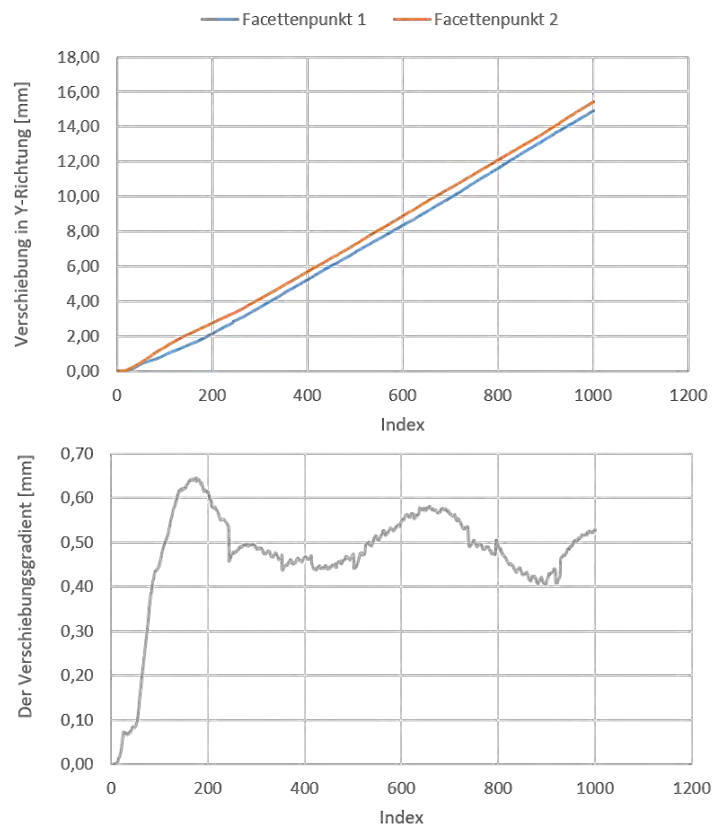


Abbildung 5.10: Knapp-Rincon-Verbinder in Einschubrichtung; Differenzverformungen link - rechts; Eiche-312a

Der Mittelwert von max. Verschiebungsdifferenzen der Fugen [ mm]		
Eiche-BSH	Baubuche Platte	Baubuche Paneel
0,78	0,88	1,91

Tabelle 5.1: Der Mittelwert von max. Verschiebungsdifferenzen der Fugen [ mm]

Da die Differenzen der Verformungen ziemlich klein sind, kann die auf einen Anschluss einwirkende Querkraft ermittelt werden, indem die einwirkende Belastung halbiert wird.

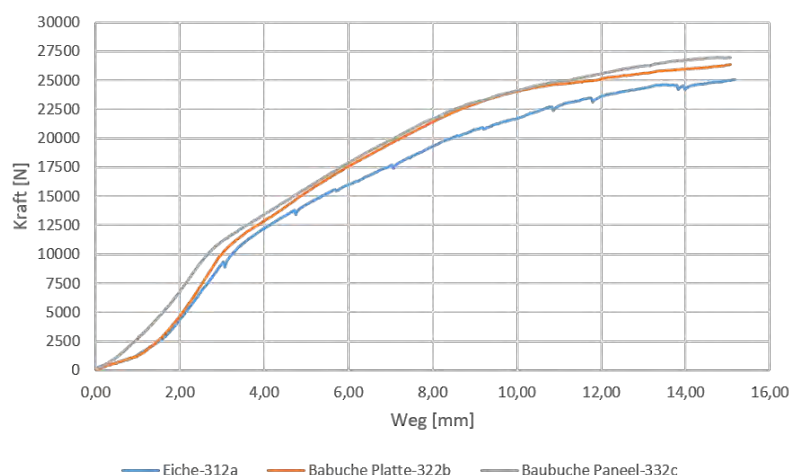


Abbildung 5.11: Knapp-Rincon Verbinder; Kraft-Verformungsdiagramm in Einschubrichtung

Der direkte Vergleich dreier exemplarischer Kraft-Verformungs-Diagramme (s. Abb. 5.11) lässt infolge der ersten Belastungszyklus keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei getesteten Holzprodukten erkennen. Lediglich der Betrag der anfänglich starken Verformung unterhalb einer Belastung von 2.000 N ist unabhängig von dem jeweiligen Holzwerkstoff Schwankungen von 1,5 mm bis 3 mm unterlegen. Somit ist die These unterstützt, dass es sich dabei um die Überwindung des Lochspieles der Schrauben handelt. Diese schwankenden Messwerte zu Beginn des Versuches sind also nicht vom Holz abhängig. Sie können durch Abweichungen bezüglich der Einschraubtiefe insbesondere der Senkkopfschrauben M 5×20, die händisch zu justieren sind, erklärt werden und müssen für die weitere Interpretation der Testresultate differenziert betrachtet werden.

Sobald der kraftschlüssige Kontakt zwischen den Schrauben und dem Einschubverbinder hergestellt ist, verläuft der lineare Anstieg der Kurve unabhängig von der Holzart mit der selben Steigung bis zu der maximalen Belastung von 10 kN. Die sehr ähnlichen plastischen Verformungen, die nach der Entlastung der Probekörper gemessen wurden, unterstützen die Folgerung, dass die Gesamtsteifigkeit des Anschlusses anfänglich in erster Linie von den metallischen Verbindungselementen abhängig ist. Die Diagramme zeigen recht ähnliche Steigungen, bis die Verformung der Schrauben so weit fortgesetzt ist, dass die Seiltragwirkung der stiftförmigen Verbindungsmittel einsetzt und die Belastungen eher durch Normalkraft als durch Biegung beantwortet werden. Folglich kommt es zu einer Versteifung der geschraubten Verbindung, die eine Schädigung des Holzes initiiert. Folglich ist auch die maximal aufgebrachte Kraft mit 23 kN für das Eichenholz gegenüber dem Buchenholz durchschnittlich um 3 kN geringer. Die plastischen Verformungen infolge des zweiten Belastungszyklus sind für die Versuche mit Eichenbrettschichtholz weiterhin um 1 mm geringer, sodass auf eine höhere Duktilität gegenüber dem Furnierschichtholz geschlossen werden kann. Darüber hinaus sind die Knicke, die die schlagartigen Verformungen des verkeilten Riegels dokumentieren, charakteristisch für das Eichenholz. Sie deuten auf höhere Reibkräfte zwischen den hölzernen Bauteilen und auf stärkere Ungleichmäßigkeiten bezüglich der vertikalen Verschiebung des Riegels.

Grundsätzlich ermöglichen die Kraft-Verformungs-Diagramme eine fundierte qualitative Einschätzung des Verformungs- und Versagensverhaltens des Anschlusses mit Einschubverbindern, der sich auf die Verbindung zwischen den Elementpfosten und den Zwischenriegel bezieht. Dennoch sind

die im Rahmen der dritten Versuchsreihe ermittelten Testresultate nur bedingt aussagekräftig, da die C-förmige Geometrie der Probekörper nicht optimal ist. Es wurde festgestellt, dass das Tragfähigkeitsversagen sowohl von einer starken Verformung der metallischen Verbindungsmittel, als auch von einer Schädigung der exemplarischen Pfosten abhängt. In der praktischen Anwendung ist für die Einschubverbinder, die an den Pfosten angebracht werden, ein Randabstand von 57,5 cm in Abhängigkeit von der Konstruktionshöhe der Geschossdecke vorgesehen. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde der Anschluss jedoch in unmittelbarer Nähe zum Rand des exemplarischen Pfostens eingebaut, sodass die Rissbildung, die an der Stirnseite der Hölzer beobachtet werden kann, in signifikantem Maße begünstigt wird. Um realistischere Steifigkeitswerte zu messen, wäre eine H-förmige Anordnung der Probekörper durchaus sinnvoll. Es sollte jedoch angemerkt werden, dass innerhalb des Lastbereiches, der seitens des Herstellers der Einschubverbinder als Tragfähigkeit angegeben wird, keine Schädigung des Holzes erkennbar ist, sodass die entstehenden Kraft-Verformungs-Diagramme innerhalb der Grenzen der Herstellerangaben repräsentativ sind.

Die Steifigkeit des Lastverteilungsbalkens in Versuch übersteigt die Steifigkeit der Konstruktion aus GFK-Schienen und einer Verglasung erheblich und führt daher zu einer künstlichen Verringerung der Biegung, durch die der exemplarische Riegel beansprucht wird. Weiterhin wird eine Schädigung des Holzes nur in dem kleinen Bereich zwischen dem Lastverteilungsbalken und dem Anschnitt zum Pfosten zugelassen. Jedoch wird diesen Tatsachen nur ein unbedeutender Einfluss auf die gemessene Steifigkeit des Anschlusses anerkannt.

#### Pfosten-Zwischenriegel-Verbindung mit dem Knapp-Ricon-Verbinder; Kraftrichtung: Entgegen der Einschubrichtung

Diese Versuchsreihe bezieht sich, wie die letzte Versuchsreihe, auf die Verbindung der Zwischenriegel mit den Pfosten mit dem Knapp-Ricon-Verbindern (mit Sicherungsbügeln) (s. Abb. 5.8). Die Tragfähigkeit dieses Anschlusses ist in einem entscheidenden Maße von der jeweiligen Richtung der Belastung abhängig. Nachdem im Rahmen der vorangegangenen Versuchsreihe eine Einwirkung simuliert wurde, dessen Wirkungsrichtung der Einschubrichtung entspricht, wird nun die entgegengesetzte Belastungsrichtung untersucht. Seitens des Herstellers ist für diese Belastungsrichtung keine Tragfähigkeit angegeben. Daher wurde eine experimentelle Untersuchung angeordnet, um neben der absoluten Tragfähigkeit auch die Verformungen in Abhängigkeit der einwirkenden Belastung zu erfassen, sodass die Anschlusssteifigkeit repräsentativ beurteilt werden kann. Zur Untersuchung des hybriden Tragverhaltens der Fassadenelemente, ist eine fundierte Berücksichtigung der von den Holz-Holz-Verbindungen ausgehenden Federsteifigkeiten unerlässlich. Jedoch wird eine geringe Tragfähigkeit sowie eine sehr geringe Anschlusssteifigkeit der Einschubverbinder unter einer Belastung entgegen ihrer Einschubrichtung erwartet.

Die für diese Versuchsreihe vorgesehenen Probekörper bestehen ebenfalls aus jeweils drei C-förmig angeordneten Holzbauteilen. Bis auf die zusätzlich verbauten Sicherungsbügel entsprechen die Probekörper in Gänze den bereits in der Abb. 5.8 dargestellt. Alle Abmessungen und Bohrungen sind identisch. Bei den Bügeln handelt es sich um speziell gebogene Drähte, die in eine entsprechende Nut eines Einschubverbinders eingesetzt werden. Die beiden hervorstehenden Enden greifen im Einbauzustand in entsprechende Nuten des entgegengesetzten Einschubverbinders. Je Einschubverbinder wird ein Sicherungsbügel angeordnet, sodass 4 dieser Bügel für einen Anschluss vorgesehen sind und das Lösen der Verbindung unter Belastungen verhindern sollen.

Aufgrund der Feststellung, dass die Steifigkeit des zu prüfenden Anschlusses durch die metallischen

Bauteile bestimmt wird und das Tragfähigkeitsversagen der Verbindung vor einer Schädigung des Holzes eintritt, werden nur 3 Versuchsdurchläufe mit Probekörpern aus Eichenholz durchgeführt. Da das jeweilige Holzprodukt einen verschwindend geringen Einfluss auf die Testresultate zu haben scheinen, sollten nicht unnötig viele Probestücke verbraucht werden. Dabei sind drei Versuchsdurchläufe ausreichend um eine aussagekräftige Auswertung der Versuchsergebnisse durchzuführen. Während jedem der drei Versuche findet eine kontaktlose Verformungsmessung durch das System GOM Aramis statt, sodass die Probekörper auf der Vorderseite der Riegel und der angrenzenden Stirnseite der Pfosten mit dem dafür erforderlichen stochastischen Muster versehen werden.

Um die Verschiebung der Fugen erfassen zu können, werden in dieser Versuchsreihe wieder zwei Facettenpunkte auf der Oberfläche des Riegels erstellt (s. Abb. 5.6). Die resultierende Ergebnisse haben schon gezeigt, dass die Verschiebung der Fugen im Gegensatz zur letzten Versuchsreihe je nach Versuchskörper unterschiedlich ist.

Beispielweise hat die linke Fuge (Facettenpunkt 1; Abb. 5.12) vom Versuchskörper Eiche-412a eine große Verschiebung erfahren, obwohl die Verschiebung der linken Fuge vom Versuchskörper Eiche-412c kleiner als die Verschiebung der rechten Fuge ist (Vgl. Abb. 5.12 und Abb. 5.13).



Abbildung 5.12: Push-Out-Zwischenriegel entgegen zur Einschubrichtung; Eiche-412a



Abbildung 5.13: Push-Out-Zwischenriegel entgegen zur Einschubrichtung; Eiche-412c

Nach einer anfänglichen gleichmäßigen vertikalen Verschiebung folgt eine Konzentration der Verformungen auf eine Seite. Folglich führt die Rotation des Riegels zu einer Verkantung zwischen den beiden Pfosten, die nach außen ausweichen. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Widerstand des Probekörpers gegen eine weitere Verformung dadurch erhöht wird.

Unter einer Verformung von circa 10 mm greifen die Einschubverbinder nicht mehr über die Schrauben des jeweils entgegengesetzten. Eine darüber hinaus gehende Verformung wird erschwert, da der hervorstehende Schraubenkopf des oberen Verbinders eines Anschlusses ab einer Verformung von 12 mm auf den unteren Einschubverbinder stößt.

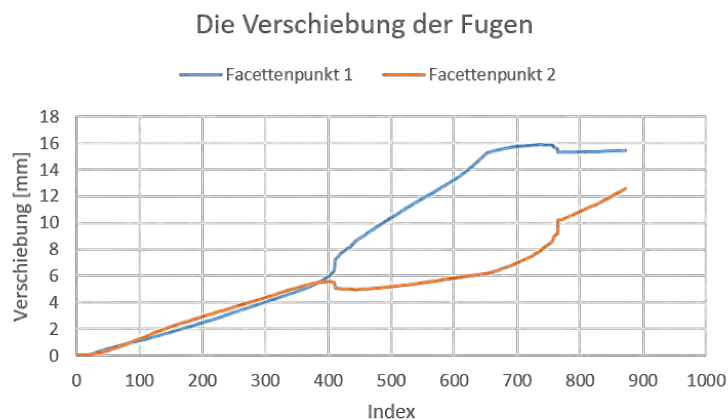


Abbildung 5.14: Die Differenz der Verschiebungen von der linken & rechten Fuge; Eiche-412a

Folglich erhöht sich der Widerstand auf der anfänglich stärker verformten Seite und die Verschiebung des Riegels auf der anderen Seite setzt ein. Abgesehen von der Reibung zwischen den Holzbauteilen, bieten besonders die Sicherungsbügel einen Widerstand gegen die Verformung des exemplarischen Riegels. Durch die aufgebrachte Verformung werden zwei verschiedene Versagensmechanismen der Sicherungsbügel hervorgerufen. Zum einen werden sie durch die Bewegung des entgegengesetzten Einschubverbinders aufgespreizt, sodass sie sich zerstörungsfrei aus der Nut lösen. Zum anderen wird auch eine plastische Verformung der Sicherungsbügel infolge der Biegebelastung beobachtet. Das seitliche Ausweichen der Pfosten ermöglicht dann ein Lösen der Verbindung. Während der gesamten Versuchsdurchführung ist keine Schädigung eines Holzbauteils zu erkennen. Daher kann auch davon ausgegangen werden, dass der Lastverteilungsbalken die Testresultate nicht beeinflusst, indem eine Rissbildung an der Oberseite der Riegel unterbunden wird.



Abbildung 5.15: Zwischenriegel-Pfosten-Verbindung mit Knapp-Ricon und Sicherungsbügel nach dem Versuch

Die zugehörige Querkraft wird bestimmt, indem die einwirkende Kraft mit der Gewichtskraft des Lastverteilungsbalkens addiert wird und die Summe halbiert wird. Die Graphen der Versuche 412a und 412b weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf.

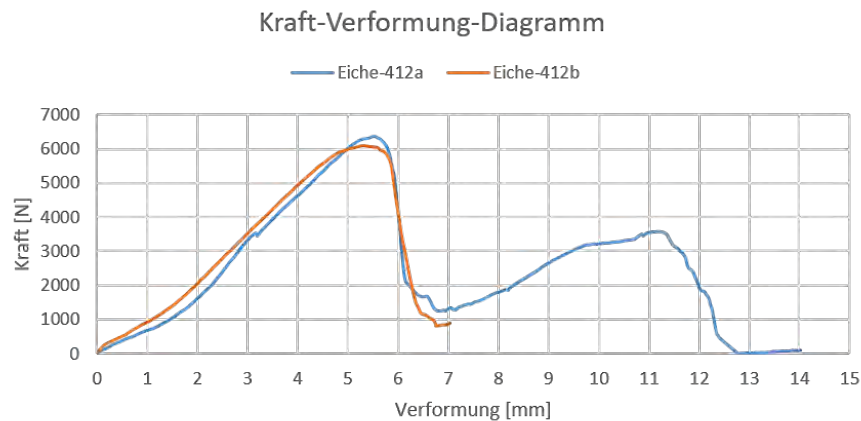


Abbildung 5.16: Kraft-Verformung-Diagramm; Eiche-412a & Eiche-412b

Anfänglich ist ein linearer Verlauf des Graphen bis zu einer Querkraft von 6.000 N zu erkennen. Dabei tritt eine Verformung von circa 4,5 mm auf. Es folgt ein deutlicher Wendepunkt der Diagramme, sodass die Belastung bei einer Verformung von 8,5 mm auf eine Querkraft im Bereich von 1.000 N zurückfällt. Der Graph des Versuchsdurchgangs 412a steigt daraufhin wieder leicht an. Diese erneute Erhöhung der Anschlusssteifigkeit ist jedoch keinesfalls durch die Tragfähigkeit der Verbindungen zu erklären. Vermutlich führt eine zunehmende Verdrehung des Riegels zu einem größeren Widerstand, da er sich noch stärker zwischen den Pfosten verkantet. Eine weitere Erklärung ist der Kontakt zwischen der hervorstehenden Schraube des oberen Einschubverbinders mit dem unteren. Da jedoch die Tragfähigkeit des zu testenden Anschlusses bei einer Verformung von 4,5 mm offensichtlich überschritten ist, wird nach dem ersten signifikanten Steifigkeitsrückgang der zweite Versuch beendet. Da die beiden Graphen eine kritische Belastung von circa 6.000 N erkennen lassen, kann für eine Beurteilung der Anschlusssteifigkeit der anfängliche lineare Bereich des Graphen zu Grunde gelegt werden. Folglich berechnet sich die ungefähre von der Verbindung ausgehende Wegfedersteifigkeit auf der Basis der ersten beiden Testresultate wie folgt.

$$k = m = d(F)/d(V) = 6000N/4,5mm = 1.333N/mm$$

Mit einer Steifigkeit von 1.333 N/mm wäre die Hälfte der Steifigkeit unter einer Belastung in entgegengesetzter Richtung erreicht, sodass der Anschluss unter Berücksichtigung der elastischen Linienlagerung entsprechend weniger Querkräfte übertragen würde. Gerät jedoch das Testresultat des Versuches 412c in den Fokus der Betrachtung, dramatisiert sich der Eindruck.



Abbildung 5.17: Kraft-Verformung-Diagramm; Eiche-412c

Trotz der ebenfalls auftretenden Verkeilung des Riegels, wird eine deutlich geringere Steifigkeit gemessen. Es wird ein ungleichmäßiger Verlauf des Graphen verzeichnet, der seinen ersten deutlichen Wendepunkt unter einer Belastung von 1.500 N bei einer Verformung 5,5 mm aufweist. Anschließend ist ein leichter Rückgang der einwirkenden Last auf 1.000 N zu erkennen. Der erste deutlichere Anstieg ist erst bei einer Verformung von über 11 mm zu verzeichnen und wahrscheinlich darin begründet, dass der obere Einschubverbinder auf den unteren trifft. Unter Umständen kann davon ausgegangen werden, dass sich der Versagensmechanismus der Bügel fast zufällig entscheidet und ein Aufspreizen der Sicherungsbügel eine deutlich geringere Tragfähigkeit des Anschlusses zur Folge hat. Es kann jedoch der größere charakteristische Widerstand der beiden vorausgegangenen Versuche nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden.

Der direkte Vergleich zwischen den drei Testresultaten zeigt, dass der erste signifikante Wendepunkt aller Graphen bei einer Verformung von 5 bis 5,6 mm auftritt. Es kann angenommen werden, dass diese Werte einen kritischen Verformungsbereich markieren, die das Tragfähigkeitsversagen der Sicherungsbügel initiieren.

### Pfosten-Zwischenriegel-Verbindung mit Holzdübeln und Tellerkopfschrauben

Die zweite Möglichkeit für die Verbindung zwischen dem Pfosten und Zwischenriegel ist eine Verbindung mit den Holzdübeln aus Eiche und Tellerkopfschrauben (s. Abb. 5.4). Um die Verschiebung der Fugen besser darzustellen, wurde in dieser Versuchsreihe vier Facettenpunkt auf der Oberfläche des Zwischenriegels generiert (s. Abb. 5.18)

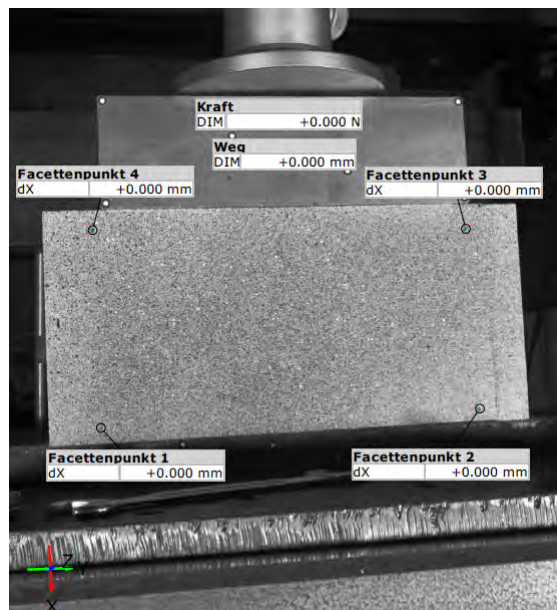


Abbildung 5.18: die generierten Facettenpunkte auf der Oberflächen des Riegels; Baubuche Platte-822a

Den Ergebnissen dieser Versuchsreihe zur Folge ist der Verschiebungsgradient zwischen den Fugen ziemlich klein. Beispielsweise zeigt das Aramis-Ergebnis von der Versuchsreihe Baubuche Platte-822a, dass die Kraft nach  $26,83 \text{ kN}$  die Lochleibungsfestigkeit des Bohrloches im Holz überschreitet. Anschließend bildet sich der erste Riss im rechten Pfosten mit ca.  $6,17 \text{ mm}$ . Darüber hinaus veranschaulicht das Stufen-Verschiebung-Diagramm aus der Aramis-Messung, dass die Differenz zwischen der Verschiebungen von der rechten Fuge (Facettenpunkte 2 & 3) und der linken Fuge (Facettenpunkte 1 & 4) bis ca.  $7 \text{ mm}$  sehr klein ist. Dies entspricht der Messungszeit  $640 \text{ s}$  und ca.  $10,67 \text{ mm}$  Maschinenweg aus dem Aramis system. Ab diesem Zeitpunkt entwickeln sich die abgebildete Risse im Holz (Pfosten) stark weiter (s. Abb. 5.20).

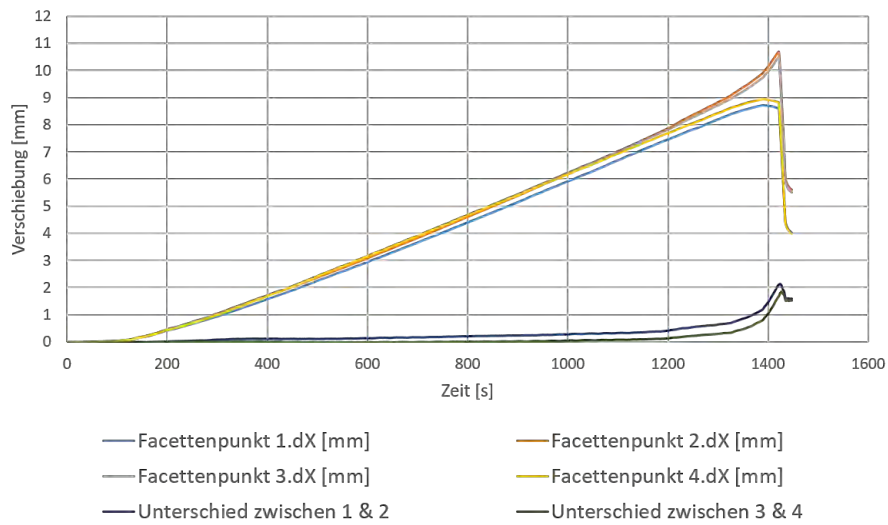


Abbildung 5.19: Das Zeit-Verschiebung-Diagramm; Baubuche Platte-822a

Da die Differenz zwischen den Fugen-Verschiebungen ziemlich klein ist, wird die einwirkende Kraft halbiert, um das Kraft-Verschiebung-Diagramm für eine Fuge darzustellen.



Abbildung 5.20: Baubuche Platte-822a

Der direkte Vergleich zwischen den Prüfkörpern aus Eiche-BSH zeigt eine ähnliche Steigung der Kurven bis zur  $F = 5 \text{ kN}$ . Ab dieser Stelle zeigt der Prüfkörper 812a größeren Widerstand. Der Hintergrund dafür ist, dass die Fugen dieses Prüfkörpers bei der Vorbereitungsphase unbeabsichtigt mit dem Holzklebstoff geklebt wurden. Infolgedessen wird das Ergebnis dieses Prüfkörpers aus den weiteren Bewertungen dieser Versuchsreihe heraus genommen, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Laut der Ergebnisse aus dem Aramis system findet die erste Rissbildung im Prüfkörper Eiche-812b bei  $30 \text{ kN}$  sowohl im unteren Bereich des rechten Pfostens als auch im mittleren Bereich des linken Pfostens statt. Auffallend ist hier die Rissbildung im mittleren Riegel, da sich in diesem Bereich keine metallischen stiftförmigen Verbindungsmittel befinden, dessen Schubfestigkeit die Lochleibungsfestigkeit des Holzes überschreiten könnte. Dies kann durch die lokale Vorbeschädigungen im Holz verursacht worden sein. Des Weiteren zeigt das Ergebnis der dritten Iteration (812c) dieser Versuchsreihe, dass die erste Rissbildung im unteren Bereich des rechten Pfosten bei  $38 \text{ kN}$  stattfindet.

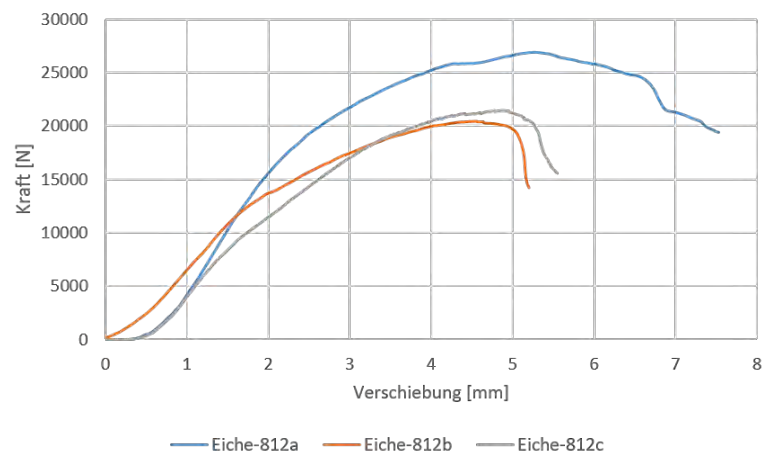


Abbildung 5.21: Kraft-Verschiebung-Diagramm von einer Fuge; Eiche-BSH; Verbinder: Holzdübeln und Tellerkopfschrauben

Bevor die Ergebnisse der nächsten Prüfkörper dargestellt und diskutiert werden, ist es zu klären, dass die Verschiebungen der Prüfkörper 822c, 832a und 832c wegen des entstehenden Abstandes zwischen dem Lastverteilungsbalken und der kreisförmigen Lastverteilungsplatte vor dem Versuchsbeginn 1 mm runtergesetzt wurde (s. die Abb. 5.22)

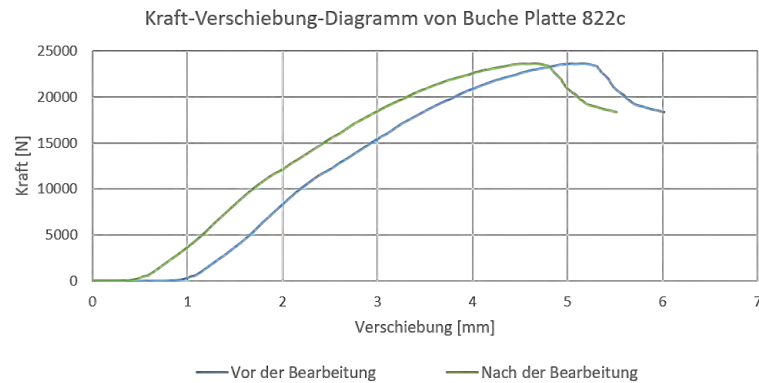


Abbildung 5.22: Kraft-Verschiebung-Diagramm von einer Fuge; Buche Platte 822c; Verbinder: Holzdübel und Tellerkopfschrauben

Das Kraft-Verschiebung-Diagramm der nächsten Iteration aus der Baubuche Platte zeigt, dass der dritte Prüfkörper (822c) eine größere Tragfähigkeit ( $F_{\max.} = 23,6 \text{ kN}$ ) mit kleinerer Verschiebung (ca. 5,5 mm) hat. Darüber hinaus gibt es kaum Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Prüfkörpern (822a und 822b). In den beiden Fällen gibt es ca. 6 mm Verschiebung mit der  $F_{\max., \text{Mittelwert}} = 23 \text{ kN}$ . Die Tabelle 5.2 stellt die einwirkenden Kraft und die Position der ersten Rissbildung im Holz dar.

Prüfkörper	Kraft [kN]	Position der ersten Rissbildung
822a	26,2	Im unteren Bereich des rechten Pfostens
822b	39	Im unteren Bereich des rechten & linken Pfostens
822bc	41	Im unteren Bereich des linken Pfostens

Tabelle 5.2: einwirkende Kraft und die Position der ersten Rissbildung im Holz; Baubuche Platte

Die letzte Iteration dieser Versuchsreihe sind die Prüfkörper aus Baubuche Paneel. Die Ergebnisse dieser Reihe zeigen Unterschiede bzgl. der anfänglichen Steigung der Kurven im Vergleich zur vorherigen Versuchsreihe aus Baubuche Platte. Der direkte Vergleich zwischen den Versuchskörpern aus Baubuche Paneel zeigt, dass die max. tragende Kraft bei  $F_{\max.} = 24,4 \text{ [kN]}$  (832c) liegt. Die erfahrene Verschiebungen liegen vom 6 bis 7,6 mm.

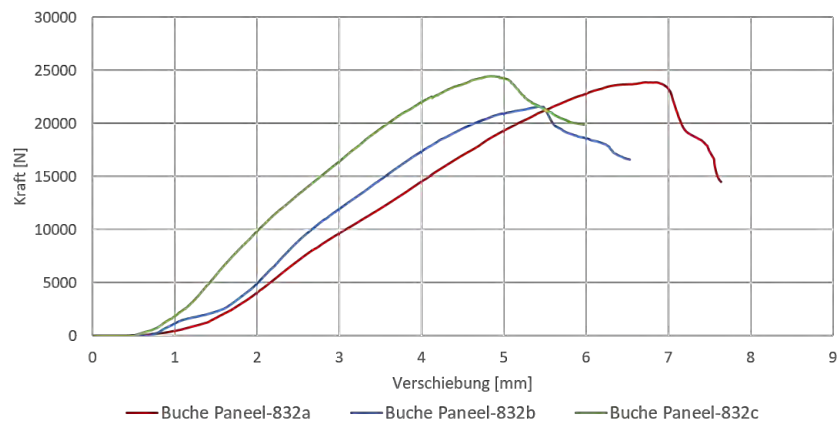


Abbildung 5.23: Kraft-Verschiebung-Diagramm von einer Fuge; Buche Paneel

Die Tabelle 5.3 stellt die einwirkenden Kraft und die Position der ersten Rissbildung im Holz dar.

Prüfkörper	Kraft [kN]	Position der ersten Rissbildung
832a	30	Im unteren Bereich des linken Pfostens
832b	38	Im oberen & unteren Bereich des rechten Pfostens
832c	29	Im unteren Bereich des linken Pfostens

Tabelle 5.3: Die einwirkende Kraft und die Position der ersten Rissbildung im Holz; Baubuche Paneel

Der direkte Vergleich zwischen allen Versuchen dieser Versuchsreihe zeigt, dass der Mittelwert von der max. tragenden Kraft in einer Fuge von den Prüfkörpern aus Eiche-BSH ca. 20,94 kN, von den Prüfkörpern aus Baubuche Platte ca. 22,98 kN und von den Prüfkörpern aus Baubuche Paneel ca. 23,32 kN beträgt.

Um den Einfluss der Holzdübel auf die Tragfähigkeit dieses Anschlusses untersuchen zu können, werden drei Prüfkörper aus Eiche-BSH mit identischen Abmessungen und Holzschrauben (Tellerkopfschrauben 6×100 [mm]) sowie mit demselben Versuchsablauf durchgeführt (vgl. Abb. 5.24).



Abbildung 5.24: Prüfkörper mit Holzschrauben und ohne/mit Holzdübeln; Eiche-BSH

Die resultierende Ergebnisse zur Folge liegt der Mittelwert von der max. tragenden Kraft  $F_{\max}$ -Mittelwert auf einer Fuge von diesem Anschluss bei 9 [kN], obwohl dieser Wert von den Prüfkörpern aus demselben Material (Eiche-BSH) mit dem Anschluss aus Holzdübeln und Holzschrauben 20,94 [kN] beträgt.

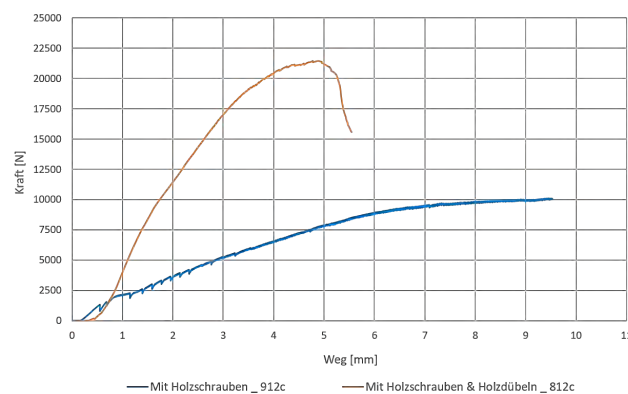


Abbildung 5.25: Einfluss der Holzdübeln auf die Tragfähigkeit des Anschlusses; Eiche-BSH

Ein direkter Vergleich zwischen den Steigungen der Kraft-Weg-Diagrammen beider Versuchsreihen (Anschlüsse mit und ohne Holzdübeln) zeigt, dass die Prüfkörper, die nur über zwei Holzschrauben als Verbindungsmitteln verfügen, einen deutlich kleineren Widerstand gegen die Verschiebung im Anschluss leisten.

## 6. Fassadenelement-Primärkonstruktion-Anschluss

### 6.1. Holz-Primärkonstruktion-Anschluss für geschosshohe Fassadenelemente

Der Entwurf eines Anschlusses der Fassade an die Primärstruktur des jeweiligen Gebäudes ist geprägt durch das Prinzip einer einfachen Montage der Elemente. Vorgefertigte Fassadenelemente werden von außen mit einem Kran eingehoben. Es braucht kein Gerüst, da die Monteure auf der Geschossdecke stehen. An den zu entwerfenden Anschluss wird nur ein geringer ästhetischer Anspruch gestellt, da er im opaken Bereich der Fassade vor den Geschossdecken verschwindet.

Die zu erwartenden Belastungen umfassen das Eigengewicht der Fassadenelemente, das geschossweise an die Primärstruktur übergeben wird. Dabei ist für die Fassade in erster Linie eine hängende Konstruktion vorgesehen, sodass ein Knicken der Pfosten ausgeschlossen wird. Zusätzlich zum Eigengewicht wird der Anschluss durch senkrecht zur Fassadenebene wirkende Lasten infolge Wind oder Holmlasten belastet. Da ein Mitwirken der schubsteifen Fassadenelemente bezüglich der Gebäudeaussteifung nicht vorgesehen ist, sind keine horizontalen Kräfte in der Ebene der Fassade zu erwarten.

Um das Ziel eines hohen Vorfertigungsgrades konsequent zu verfolgen, besteht der Anschluss grundsätzlich aus zwei Bauteilen. Eines wird an der Geschossdecke angebracht, während das entsprechende Gegenstück an der Fassade befestigt wird. Für das Verbindungsbauteil seitens der Geschossdecke sind verschiedene Systeme bekannt.



Abbildung 6.1: Ankerplatte

Häufig wird eine C-Förmige Ankerschiene in die Geschossdecke einbetoniert. Dabei stellen zwei Kopfbolzendübel den kraftschlüssigen Verbund zwischen der Schiene und dem Stahlbetonkörper her. Zusätzlich kann eine horizontale Rückhaltebewehrung angeordnet werden, die mit der Unterseite der Schiene verschweißt wird und die obere Ortbeton-Bewehrungslage der Geschossdecke übergreift, um Windsoglasten optimal einzuleiten. Das Eindringen von Frischbeton während der Betonage wird durch eine temporäre Füllung der Schiene verhindert. Durch die Verwendung einer Ankerschiene wird der Ausgleich von Bautoleranzen in horizontaler Richtung parallel zu der Fassade ermöglicht. Sollten zusätzlich Kräfte in dieser Richtung übertragen werden, empfiehlt sich die Anordnung einer Zahnschiene anstelle einer glatten Ankerschiene.

Zwei zugehörige Hammerkopfschrauben, z.B. HS 50/30 M16×50 verbinden die Ankerschiene mit der stählernen Ankerplatte. Sie werden durch Langlöcher geführt, sodass auch der Ausgleich von Toleranzen senkrecht zu der Ebene der Fassade ermöglicht wird. Um eine optimale Lastübertragung zu gewährleisten, ist die Ankerplatte im Bereich der Langlöcher, genau wie die rechteckigen Unterlegscheiben, gezahnt ausgeführt. Somit wird der Widerstand des Anschlusses unter Windbelastungen

deutlich erhöht.

Der vordere Bereich der Ankerplatte krägt ca. 40 mm über die Geschossdecke aus. In diesem Bereich werden zwei T-förmige Ausschnitte angeordnet, in die jeweils ein passendes Gegenstück, das an dem Fassadenelement angeschlossen ist, eingeführt wird. Unterhalb der auskragenden Ankerplatte befindet sich ein Auflagerbalken mit den Maßen 26x26x160 mm, der als vertikales Auflager der Elemente dient. Dieser ist seitlich durch Bauschrauben M12 × 100 der Festigkeitsklasse 8.8 an der Ankerplatte aufgehängt. Die Schrauben werden von unten durch die Platte gesteckt, sodass die exakte Höhe des Auflagers durch das Justieren der Mutter eingestellt werden kann. Dabei ist der Anschluss von oben deutlich leichter zugänglich als bei umgekehrter Orientierung der Mutter von unten. Die Schraubverbindung wird durch eine zusätzliche Kontermutter gesichert.

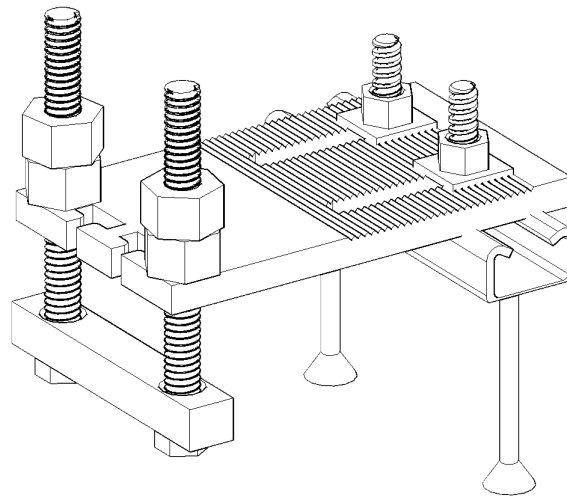


Abbildung 6.2: Ankerplatte

Die Verbindung mit der Ankerplatte verfügt über ein T-förmiges Bauteil. Diese wird durch ein Fahnenblech mit der Gesamthöhe von 220 mm und der Gesamtbreite von 130 mm hergestellt. Das winkelförmige Fahnenblech ist über die gesamte Höhe an die schmale Seite des Pfostens angelegt. Im oberen Bereich ist das T-Stück durch eine DHV-Naht angeschlossen. Seitlich ist das Blech mit 4 Bohrungen des Durchmessers 11 mm versehen. Durch diese werden Schlossschrauben M10×40 geführt. Ihr flacher Kopf ohne eine Antriebsaufnahme wurde ursprünglich für den Einbruchschutz von Holztoren entwickelt. Ansonsten ähneln sie herkömmlichen Bauschrauben. Der Schraubenkopf wird mit einer Tiefe von 6 mm und einem Durchmesser von 26 mm eingelassen, sodass die Fugestärke vollkommen erhalten bleibt. Es wird mit dem Durchmesser des Bruttoquerschnitts von 10 mm vorgebohrt. Der Vierkant unterhalb des Schraubenkopfes wird bei dem Anziehen der Verbindung in das Holz gezogen, sodass ein einseitiges verschrauben der Verbindung möglich ist.

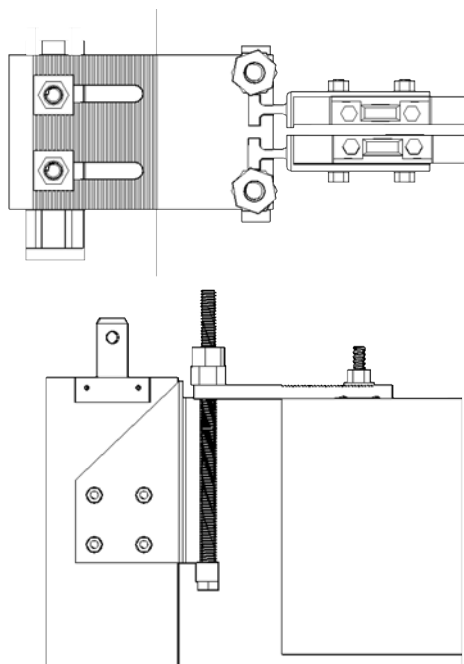


Abbildung 6.3: Verbindung mit Schlossschrauben

Die vier Schrauben werden in einem quadratischen Raster von  $60 \times 52$  mm angeordnet. Sie erfahren in erster Linie Schubbelastungen durch Windlasten und Holmlasten, sowie durch das Fassadeneigengewicht. Zusätzliche Lasten aufgrund der Exzentrizitäten werden durch die L-förmige Ausbildung des Fahnenbleches vernachlässigbar geringgehalten.

Für diesen Entwurf ist neben der gänzlichen Vorfertigung aller Bauteile auch eine wirtschaftliche Herstellbarkeit des Anschlusses grundlegend. Bei den Schlossschrauben handelt es sich um gängige Serienprodukte. Das Fahnenblech kann aus einem einzigen Blech ausgeschnitten werden. Anschließend muss es nur einmal gekantet werden und mit den Bohrungen und dem T-Stück versehen werden. Der Vorgang wiederholt sich für ein einziges Gebäude in baugleicher Ausführung so oft, dass der Stückpreis entsprechend gering ist. Für eine Fassade in der Ausführung mit einer Brüstung ist auch eine Verbindung ohne Versatz mit Schrauben auf der Höhe des T-Stückes denkbar. Grundsätzlich handelt es sich bei beiden Entwürfen um Prinzipdetails, die individuell an den jeweiligen Deckenaufbau des Gebäudes angepasst werden müssen. Aufgrund der Geometrie der Elemente besitzen die Pfosten bezüglich Windeinwirkungen eine größere Lasteinzugsfläche als die Riegel. Daher ist es sinnvoll, die Pfosten mit der Geschossdecke zu verbinden. Auf diese Weise überträgt die Verbindung zwischen den Riegeln und den Pfosten eine geringere Querkraft senkrecht zu der Fassadenebene. In Hinblick auf die Wohnraumelemente kehrt sich dieses Verhältnis um, sodass gegebenenfalls ein Anschlag der Riegel vorzuziehen ist.

Um die Rauchgasdichtigkeit unterhalb der Geschossdecke herzustellen, wird ein Winkelblech unterhalb der Decke befestigt und mit dem Zwischenriegel verschraubt. Eine entsprechende Abdichtung durch eine Verklebung ist zusätzlich zu den Schrauben erforderlich. Die abgehängte Decke kann zwar auch brandschutztechnisch wirkungsvoll sein, jedoch muss die geschossweise Rauchgasdichtigkeit auch bei einem Brand in der Zwischendecke gewährleistet sein.

### 6.1.1. Experimentelle Untersuchungen

Die Versuche dieser Versuchsreihe beziehen sich auf den Anschluss der vorgehängten Fassadenelemente an die Primärstruktur mittels Schlossschrauben. Es wird die Windsogbelastung und die horizontale Holmlast simuliert, die eine Scherung in der Verbindung verursachen.

#### Prüfkörper

Wie beschrieben geht es in dieser Versuchsreihe um die Bestimmung der Tragfähigkeit vom Holz unter verschiedener Krafrichtungen. Da das Holz für den im Abschnitt 4 beschriebenen Fassadenelement zum Fassadenelement-Anschluss vorgebohrt und gefräst werden muss und da diese Holzbearbeitung als die Schwachstellen im Holz zu berücksichtigen sind, werden alle Prüfkörper dieser Versuchsreihe bei der Firma Brüninghoff GmbH & Co. KG entsprechend der Abbildung 6.4 vorbereitet.

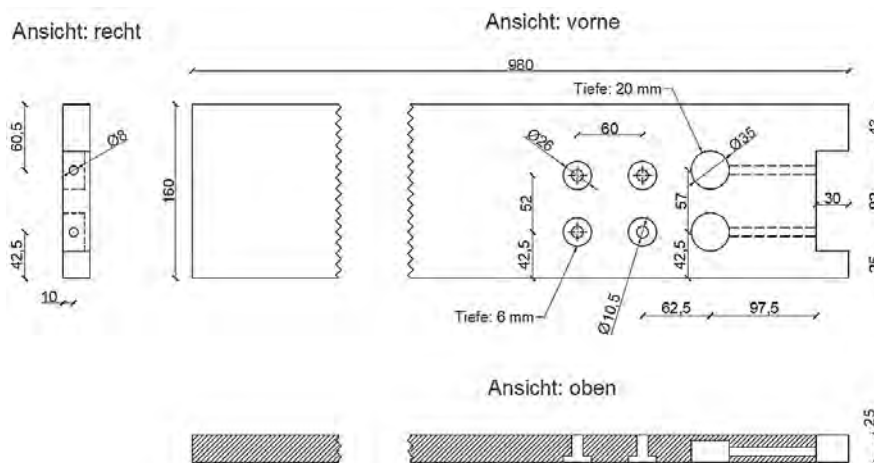


Abbildung 6.4: Verbindung mit Schlossschrauben

Die Tragfähigkeit des konstruierten Anschlusses wird je nach Krafrichtung in drei Schritten untersucht. Im ersten Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer parallel zur Holzfaserrichtung einwirkenden Kraft (Eigengewicht) untersucht. Im zweiten Schritt lässt sich die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer senkrecht zur Holzfaserrichtung aufgebracht Kraft (Windeinwirkung) bestimmen und im letzten Schritt wird der Einfluss einer diagonal zur Holzfaserrichtung wirkenden Kraft (Kombinationskraft) auf die Tragfähigkeit des Anschlusses beleuchtet.

#### Versuchsdurchführung

Für alle drei Schritte bzw. für alle Prüfkörper entspricht die Versuchsdurchführung nach dem Einbau des Probekörpers im Prinzip der Durchführung von Versuchen der ersten Reihe. So wird der unbelastete Zustand der Presse als Kraftreferenz eingestellt, damit nur die während des Versuches

tatsächlich aufgebrachte Last erfasst wird. Nach dem Einführen der Schraube  $M6 \times 100, 8.8$  wird der Fahrbefehl bis zu einer Kraft von  $10\text{ N}$  erteilt, damit keine Verformung gemessen wird, solange die Klemmplatte keinen kraftschlüssigen Kontakt mit dem Holz hat. Ist eine konstante Kraft von  $10\text{ N}$  erreicht, wird die aktuelle Position des Überbaus als Verformungsreferenz eingestellt. Anschließend wird die Referenzmessung durch Aramis eingeleitet und die Messung gestartet. Sobald die optische Verformungsmessung nachweislich stattfindet, wird der Versuch gestartet, sodass der Überbau der Prüfmaschine mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $1\text{ mm/min}$  nach oben gefahren wird, während fortlaufend das entsprechende Kraft-Verformungs-Diagramm auf der Benutzeroberfläche der Software Test & Motion visualisiert wird. Der Versuchsdurlauf wird durchgehend fotografisch mit der Spiegelreflexkamera in regelmäßigen Abständen dokumentiert, wobei Rissbildungen, die sich auch besonders akustisch bemerkbar machen, festgehalten werden.

Die vollständige Zerstörung der Verbindung, die sich sowohl durch den schlagartigen Abfall der Kurve im Kraft-Verformungs-Diagramm als auch durch das abgeschlossene Spalten eines Probestückes bemerkbar machen kann, gibt den Anlass zu einem manuellen Abbruch des Versuches. Abschließend wird durch die Software Test & Motion automatisch eine xls-Datei erstellt, die zuvor gewählten Messgrößen der aufgebrachten Kraft und der zugehörigen Verformung enthält.

**Schritt I - Krafrichtung: Parallel zu Holzfaserrichtung**

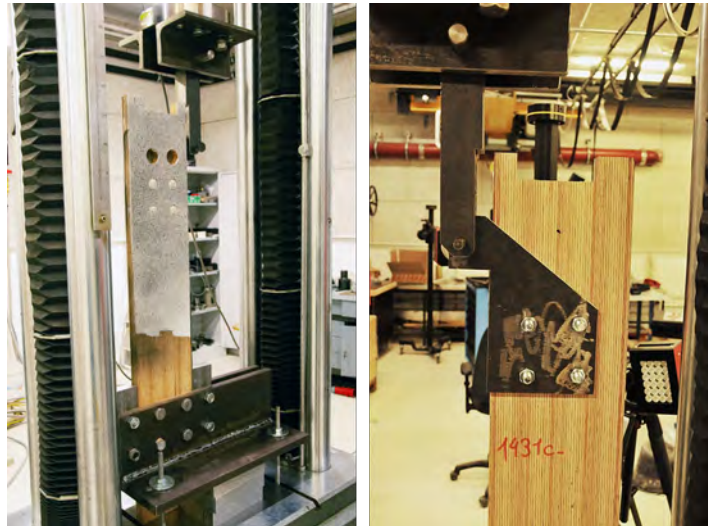


Abbildung 6.5: Versuchsaufbau

Die Abb. 6.5 zeigt die wesentlichen Informationen zum Versuchsaufbau. Vereinfachend werden die Versuche mit flachen Fahnenblechen durchgeführt. Der Einfluss wird gesondert betrachtet. Infolgedessen erfahren die Prüfkörper dieser Versuchsreihe eine einseitige und exzentrische Kraft parallel zur Faserrichtungen.

Um die Kraftleitung von der Maschine in das Fahnenblech realisieren zu können, werden zuerst zwei Winkel unter dem kreisförmigen Lastverteiler von der Maschine verschraubt. Der Kraftfluss erfolgt über eine gabelförmige Einleitung, die vom oberen Teil mit einem  $\varnothing 20$  Bolzen 10.9 in den Winkel und vom unteren Teil mit einem M12-Bolzen 12.9 in das Fahnenblech befestigt ist (s. Abb. 6.6)

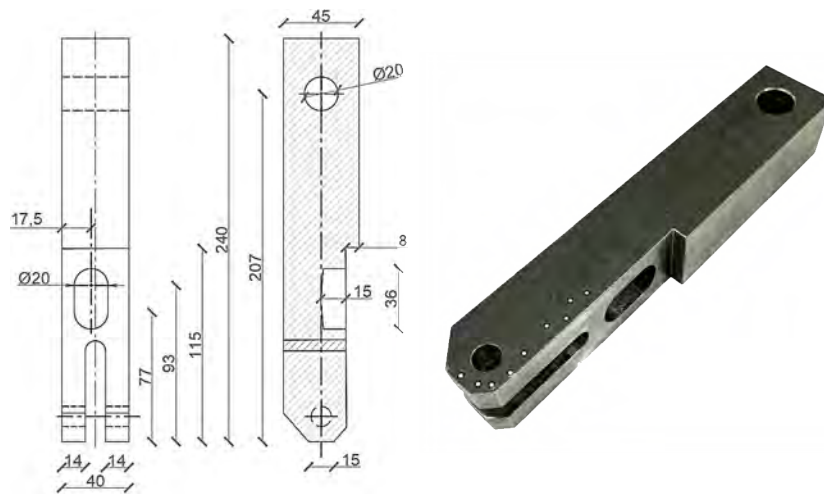


Abbildung 6.6: gabelförmiges Gegenstück

Um die Probekörper in der Prüfmaschine zu befestigen, werden zwei gleiche Winkelprofile L 178×108×12 mit einer Länge von 500 mm verwendet. Die Winkelprofile werden mit vier M12 Hammerkopfschrauben direkt auf der Maschine verankert. Der beschriebene Winkel muss auf drei aufeinander gelegten Alublöcke (180×110×40 L×B×H [ mm]) gelegt werden, um das mögliche Holzversagen am Lagerpunkt vermeiden zu können. Das heißt, dass der vertikale Randabstand der unteren Verschraubungen vom Lagerpunkt (R1) im Holz größer als der vertikale Abstand zwischen der oberen Schlossschraubenreihe und der oberen Holzkante (R2) sein muss (s. Abb. 6.7).

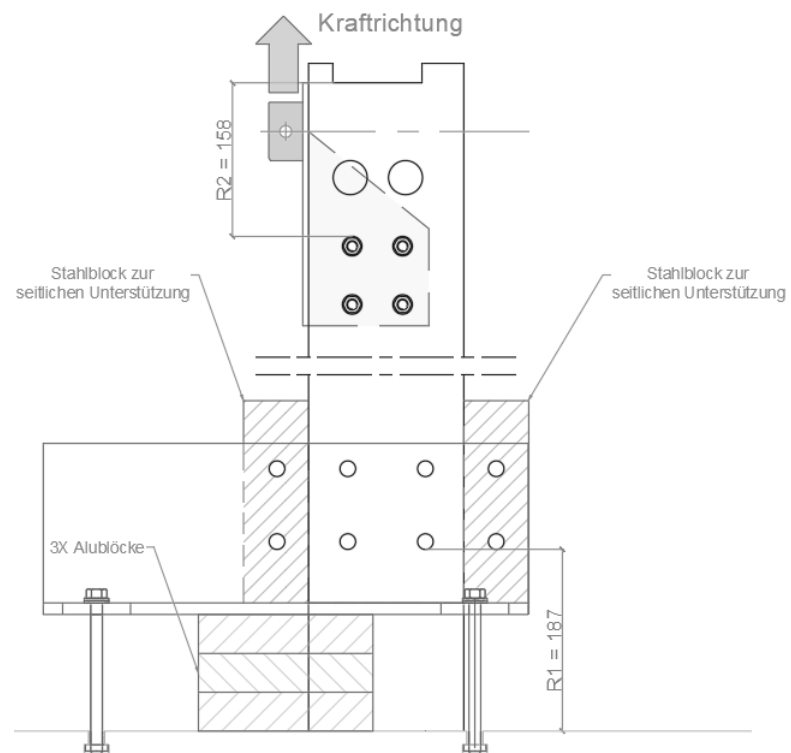


Abbildung 6.7: Lagerung der Proben in der Maschine

Ergänzend dazu wird der Prüfkörper durch zwei Stahlblöcken  $67 \times 220 \times 25$  mm seitlich unterstützt. Um eine wesentlich höhere Tragfähigkeit der Verbindung mit den Winkelprofilen zu garantieren, werden sechs Schrauben  $M16 \times 80$  der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet.

Ergebnisse

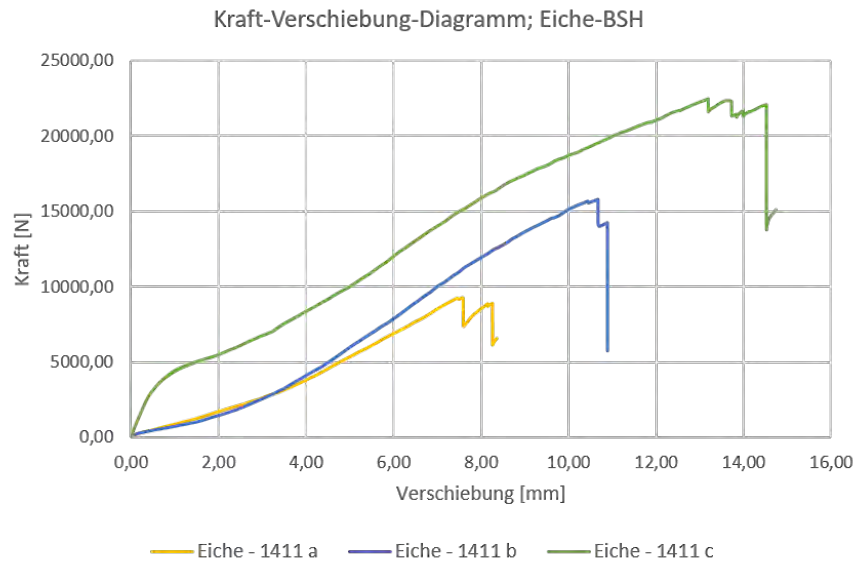


Abbildung 6.8: Kraft-Verschiebung-Diagramm der Prüfkörper aus Eiche-BSH

Wie in der Abb. 6.8 dargestellt, zeigen die Kraft-Verschiebung-Diagramme vom ersten und zweiten Prüfkörper eine kontinuierliche Steigung der Kraft- und Verschiebung. Sie stimmen sich bis zum  $F = 3 \text{ [kN]}$  überein. Der erste Prüfkörper versagte frühzeitig bei  $9,2 \text{ [kN]}$  und der zweite Prüfkörper bei  $15,7 \text{ [kN]}$ .

Prüfkörper	$F_{\text{Beginn}} \text{ [N]}$	$F_{\text{Rissbildung}} \text{ [kN]}$	$F_{\text{max.}} \text{ [kN]}$
1411 a	58,2	9,1	9,2
1411 b	78,4	15,5	15,7
1411 c	45,6	20,9	22,4

Tabelle 6.1: Maximalkraft und  $F_{\text{Rissbildung}}$  im Holz; Eiche-BSH

Im Vergleich zu dem ersten und zweiten Prüfkörper stellt das Kraft-Verformung-Diagramm des dritten Prüfkörpers bis ca.  $F = 3 \text{ [kN]}$  eine große Steifigkeit dar. Dann nimmt die Steifigkeit bis zum  $F = 5,5 \text{ [kN]}$  wieder ab. Nach ca.  $2 \text{ [mm]}$  Verschiebung gibt es wieder wie beim ersten und zweiten Prüfkörper eine kontinuierliche Steigung der Kraft-Verschiebung bis  $F = 22,4 \text{ [mm]}$ .

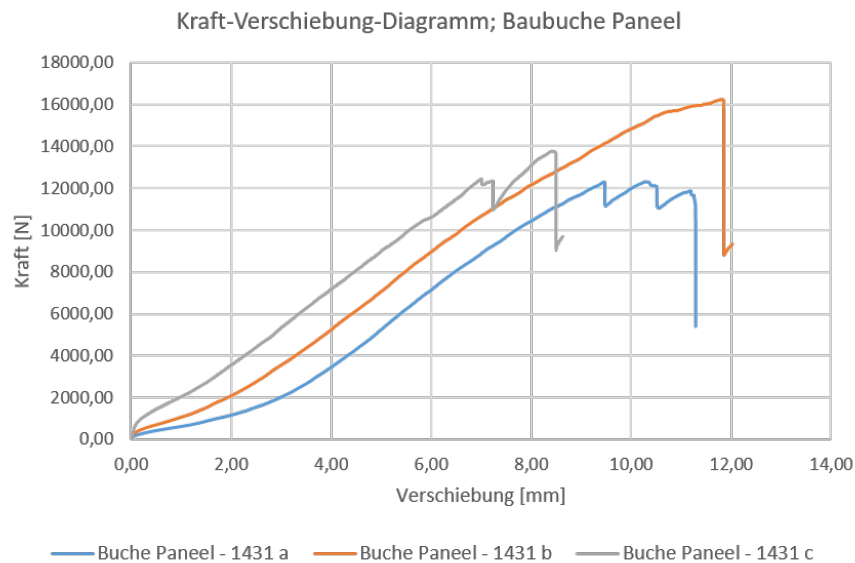


Abbildung 6.9: Kraft-Verschiebung-Diagramm der Prüfkörper aus Baubuche Paneel

Die Versuchskörper aus Baubuche Paneel weisen ähnliche Kurvenverläufe auf.

Prüfkörper	$F_{\text{Beginn}}$ [N]	$F_{\text{Rissbildung}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]
1431 a	62	11,6	12,3
1431 b	45,6	15,6	16,2
1431 c	29,2	12,1	13,7

Tabelle 6.2: Die max. tragende Kraft und  $F_{\text{Rissbildung}}$  im Holz; Baubuche Paneel

Wie in der Tabelle 6.2 dargestellt, liegt die max. Kraft in diesem Fall bei 16,2 [kN].

Der  $F_{\text{max.}}$ -Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche und Baubuche Paneel betrüge ca. 15,85 [kN] und ca. 14,11 [kN].

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Prüfkörper aus Eiche-BSH weisen eine große Streuung auf, die aufgrund der Vorbeschädigungen im Holz verursacht werden kann. Folgend muss die Tragfähigkeit des Anschlusses durch weitere Versuche untersucht werden.

Die durchgeführten Versuche dieser Versuchsreihe haben auch gezeigt, dass es ein internes Moment im Adapter gibt, das durch die exzentrische Krafteinleitung entsteht. Jede Schraube nimmt also einen gleichgroßen Anteil der Anschlusskraft in Richtung der Anschlusskraft auf und zusätzlich ein Anteil aus der Exzentrizität. Dieser exzentrische Anteil wird berechnet mit dem polaren Trägheitsmoment der Schraubenanordnung und dem Abstand der Schraube zum Schwerpunkt der Schraubenanordnung. Dieser Kraftanteil wirkt tangential zur Verbindungslinie zwischen dem Schwerpunkt der Schrauben-

anordnung und der Schraube.

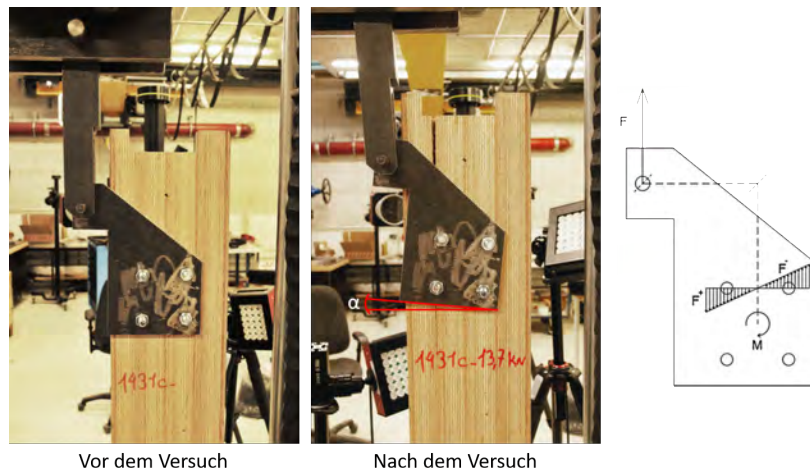


Abbildung 6.10: Internes Moment im Fahnenblech

Folgend dargestellt sind die Verschiebungen (AB003, AB004 und AB005) der Holzmellen um die Rissachse (in der X- & Y-Richtung) sowie die Hauptverformungsänderungen mit Aramis-System berechnet (s. Abb. 6.11).



Abbildung 6.11: Die Hauptverformung und die Verschiebung der Holzlamellen um die Rissachse;  
1431a

## Schritt II - Krafrichtung: senkrecht zu Holzfaserrichtung

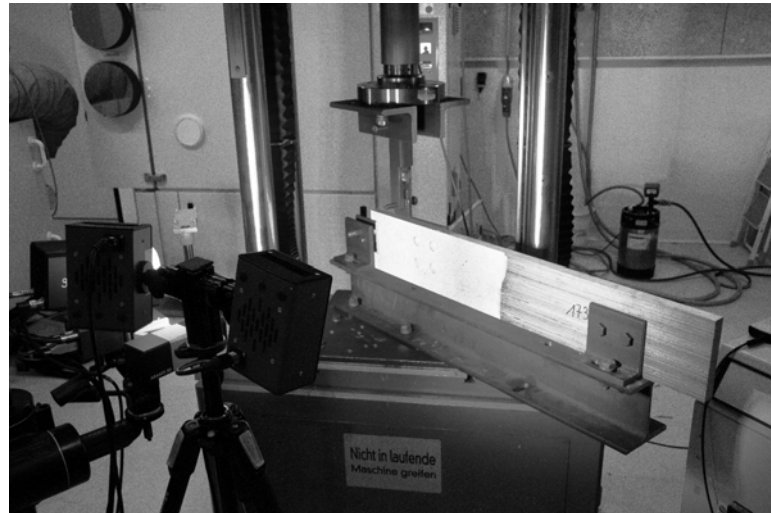


Abbildung 6.12: Versuchsaufbau

In diesem Schritt wird die Tragfähigkeit der Verbindung zur Geschossdecke unter einer senkrecht zur Holzfaserrichtung aufgetragenen Kraft (Windkraft und Holmlast) untersucht.

Die Abb. 6.12 zeigt den Versuchsaufbau. Die untere Verankerung des Prüfkörpers in der Maschine erfolgt über vier ungleichmäßigen Winkelprofile (Typ I & Typ II) L 58×120×10 mit einer Länge von 120 mm, die mit M16×50 Bolzen 10.9 und Muttern an dem Träger HEB 140 angeschraubt werden. Der Unterschied zwischen den genannten Winkelprofilen liegt daran, dass im Schenkel der ersten Profilart zwei ×16 [mm] Bohrung für die Verschraubung durch das Holz (Prüfkörper) vorgesehen wurden, während die zweite Profilart nur über eine Ø16 [mm] Bohrung verfügt (s. Abb. 6.13).

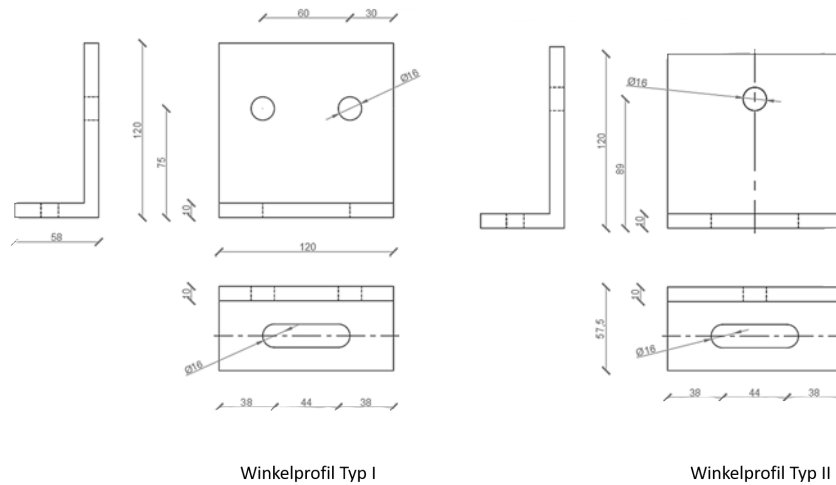


Abbildung 6.13: Winkelprofile

Wie im Abschnitt 4 diskutiert verfügt der Dorn (Splice) (s. Abb. 4.1) über ein  $\varnothing 16$  [ mm] Loch für die Kranverbindung, das zur Verankerung des Anschlussbereichs in dieser Versuchsreihe benutzt wird (s. Abb. 6.14).

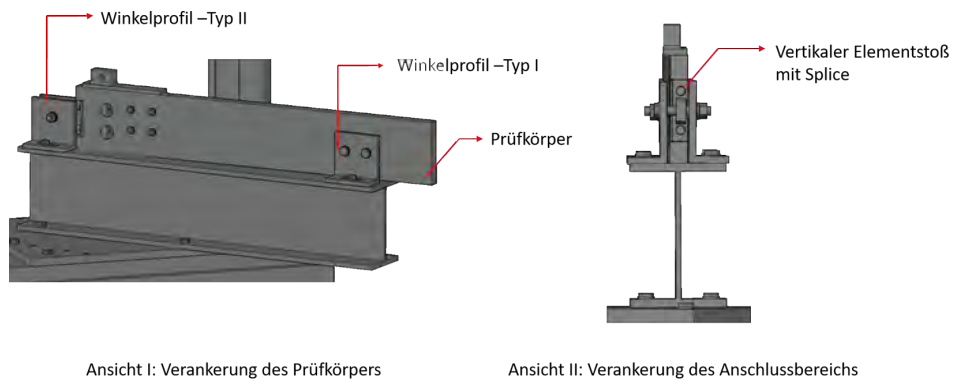


Abbildung 6.14: Versuchsaufbau - Verankerungen

In dieser Versuchsreihe erfolgt die Kraftleitung von der Maschine in das flach-förmige Fahnenblech wieder über die konstruierte Gabel-förmige Komponente (s. Abb. 6.6), die vom oberen Teil durch einem  $\varnothing 20$  Bolzen 10.9 mit den vorher an der Maschine angeschraubten Winkel und vom unteren Teil mit einem M12-Bolzen 12.9 an das Fahnenblech zu befestigen ist (s. Abb. 6.6).

## Ergebnisse

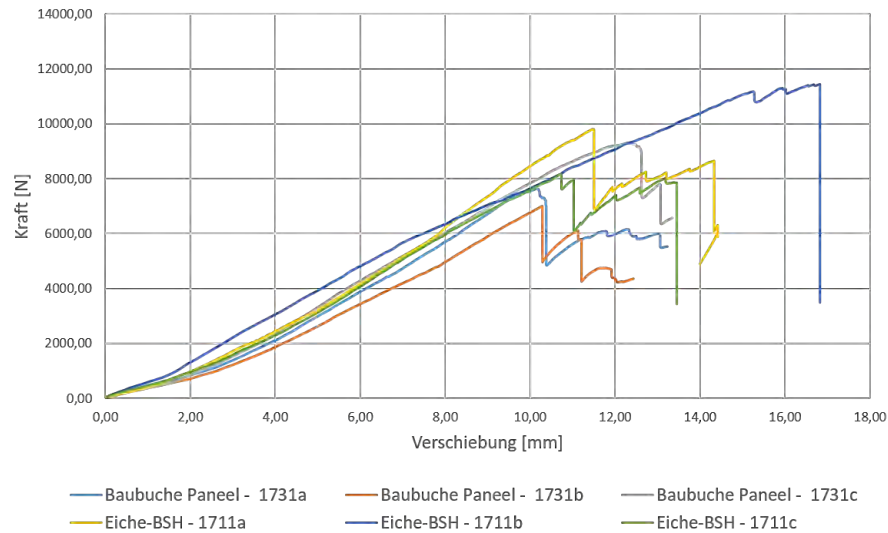


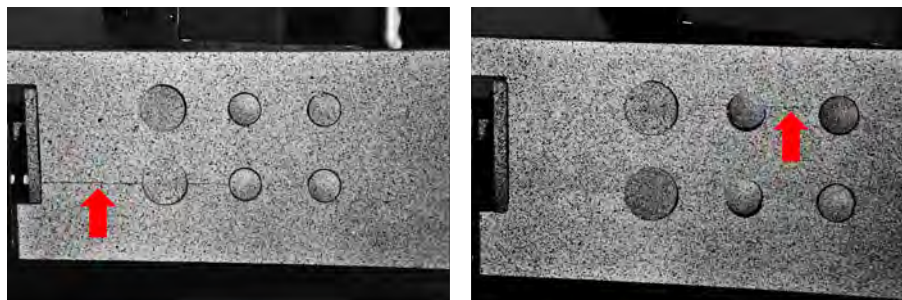
Abbildung 6.15: Kraft-Verschiebung-Diagramme der Prüfkörper aus Eiche-BSH und Baubuche Paneel

Der direkte Vergleich zwischen den Ergebnissen weist keine großen Unterschiede zwischen den Kurvenverläufen auf. Die Ergebnisse aus dem Aramis-System zeigen auch, dass die erste Rissbildung bei beiden Holzarten bei einer Belastung unterhalb 10 [kN] stattfindet (s. Tabelle 6.3).

Prüfkörper	$F_{\text{Beginn}}$ [N]	$F_{\text{Rissbildung}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]
Eiche - 1711 a	29,2	8,8	9,8
Eiche - 1711 b	12,6	-	11,4
Eiche - 1711 c	32,6	-	8,1
Buche Paneel - 1731 a	-18,2	7,38	7,6
Buche Paneel - 1731 b	12,6	6,4	6,9
Buche Paneel - 1731 c	20	8,3	9,3

Tabelle 6.3: Die max. tragende Kraft und  $F_{\text{Rissbildung}}$

Außerdem beträgt die  $F_{\text{max.}}$ -Mittelwert von den Versuchskörpern aus Eiche und Baubuche Paneel ca. 8,32 kN und ca. 9,46 kN. Auffallend waren die verschiedenen Versagensmuster der Hölzer. Der Vergleich zwischen den resultierenden Ergebnissen mit den Ergebnissen aus dem ersten Schritt (6.1.1) verdeutlicht, dass die Tragfähigkeit der Anschlüsse um 58,6% bei Eiche-BSH und ca. 50% bei Baubuche Paneel abgenommen haben.



Baubuche Paneel 1731b

Eiche-BSH 1711b

Abbildung 6.16: Die Rissbildung in den Prüfkörpern aus Eiche-BSH & Baubuche Paneel

Um eine Aussage über die Ursache des frühzeitigen Versagens im Vergleich zur letzten Versuchsreihe treffen zu können, werden die Interaktionseffekte genauer betrachtet. Die Lasteinleitung in dieser Versuchsreihe führt zu Zug- und Druckbelastung in den Arbeitsplattenverbindern. Ergänzend dazu wirkt die Exzentrizität zwischen der Maschinenachse und dem Schraubenfeld.

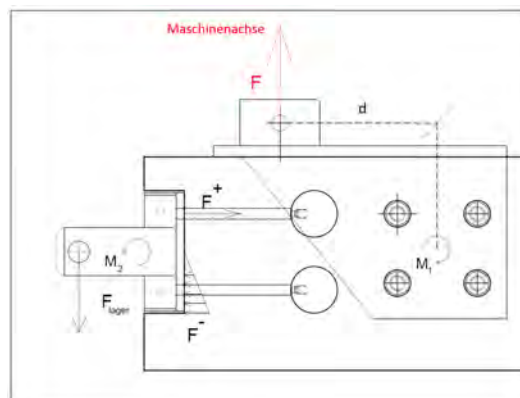


Abbildung 6.17: Übersicht Anschlusskräfte

Um die entstehende Verschiebungen im Prüfkörper mit dem Aramis-System zu erfassen, wird jeder Schraube und jedem Arbeitsplattenverbinder ein Facettenpunkt zugewiesen (P1 bis P8).

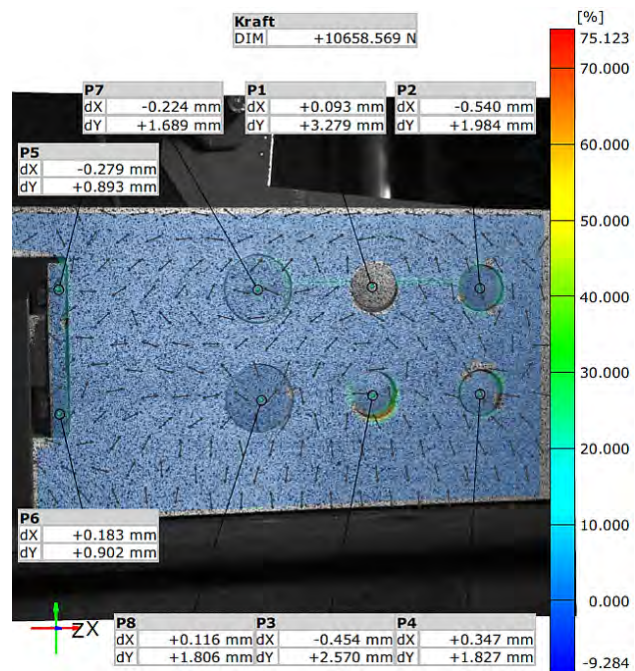


Abbildung 6.18: Verschiebungen an den Facettenpunkten; Eiche-1711b

Die Aramis-Daten zeigen kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers eine Verschiebung von ca. 0,2 mm entgegen der X-Richtung in Schraubenachse am oberen Arbeitsplattenverbinder.

### Schritt III - Krafrichtung: schräg zur Holzfaserrichtung

In diesem Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses an die Geschossdecke unter einer schräg zur Holzfaserrichtung aufgebrauchten Kraft (aus Eigengewicht und Windsog) untersucht.

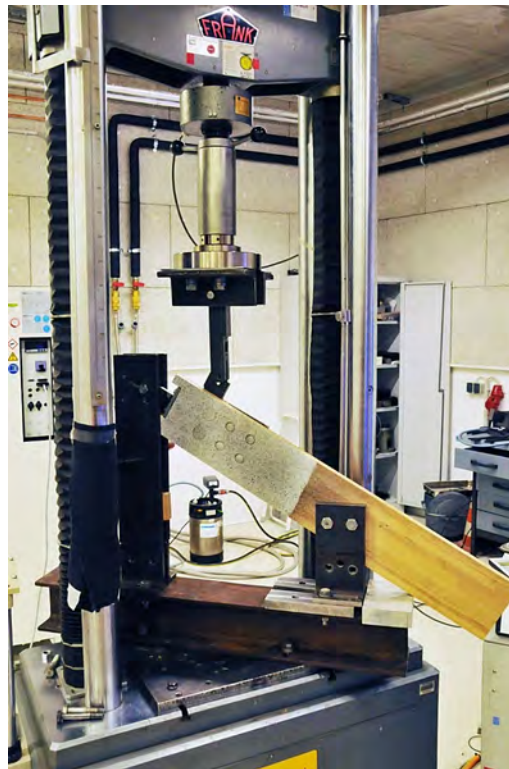


Abbildung 6.19: Versuchsaufbau Eiche-BSH

Die Abb. 6.19 zeigt den Versuchsaufbau. Die Kraftresultierende aus Eigengewicht und Windsoglast bestimmt den Neigungswinkel. In dieser Versuchsreihe beträgt der Winkel  $30^\circ$ .

Die untere Verankerung der Prüfkörper mit der Versuchsmaschine erfolgt wieder über vier Winkelprofile mit unterschiedlichen Schenkelgrößen. Die Prüfkörper lassen sich sowohl durch den konstruierten vertikalen Elementstoß (Splice) als auch durch zwei  $\varnothing 16 \times 70$  Bolzen 10.9 auf dem Träger HEB 140 mit vier M16 $\times$ 70 Bolzen 10.9 und Muttern in der Maschine befestigen. Da der reale vertikalen Elementstoß (Splice) keine Belastung parallel zu Pfostenachse bzw. zur Holzfaserrichtung übertragen kann, werden Langlöcher  $\varnothing 16,5 \times 76$  in die größeren Winkelprofile gefräst, dessen Winkel  $30^\circ$  betragen (s. Abb. 6.20).



Abbildung 6.20: Versuchsaufbau; vorgebohrtes Langloch im Schenkel der großen Winkelprofile

## Ergebnisse

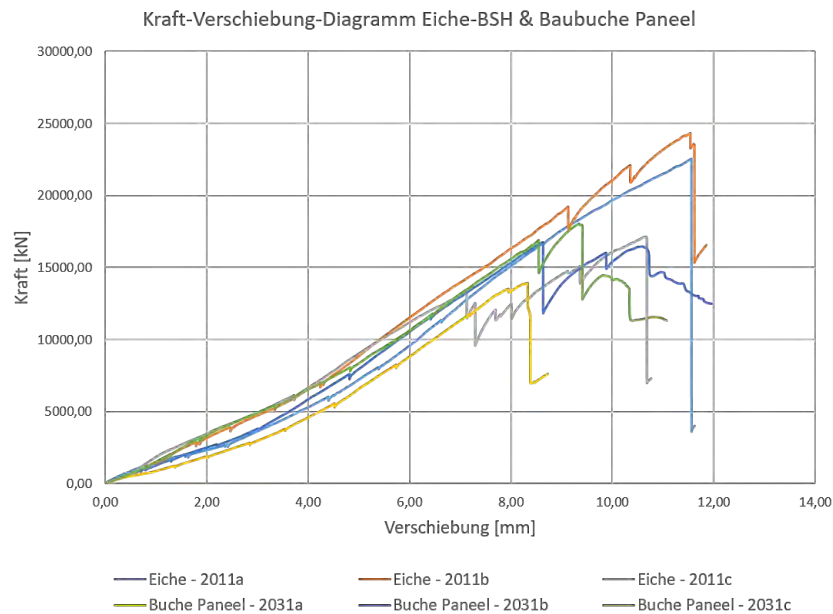
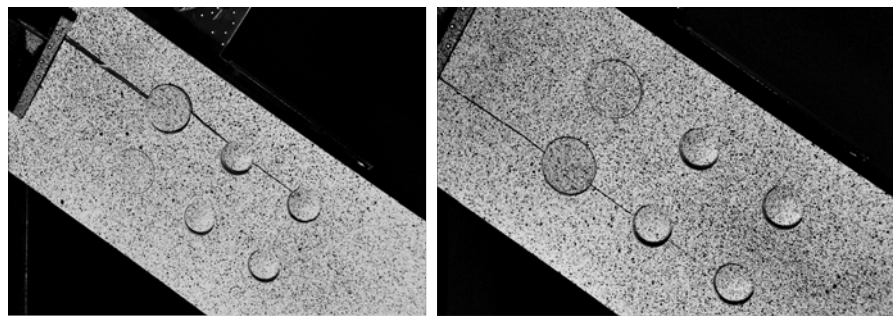


Abbildung 6.21: Kraft-Verschiebung-Diagramme der Prüfkörper aus Eiche-BSh & Buche Paneel

Wie in der Abb. 6.21 zu sehen, stimmen die Kurvenverläufe der Prüfkörper aus Eiche-BSh und Baubuche Paneel annähernd überein. Die Messergebnisse zeigen, dass der Mittelwert der max. aufgetragenen Kraft  $F_{\max.-Mittelwert}$  bei den Versuchskörpern aus Eiche-BSh ca. 21,34 [kN] beträgt und bei den Versuchskörpern aus Baubuche Paneel ca. 16,24 [kN] beträgt.

Auffallend waren die verschiedenen Versagensformen beziehungsweise die verschiedenen Orte erster Risse im Holz. Die Versuche dieser Versuchsreihe können anhand der Orte der ersten Rissbildung in zwei Gruppen unterteilt werden. In der ersten Gruppe erscheint die erste Rissbildung im Holz bei der oberen Schlossschraubenreihe, während sie sich in der zweiten Gruppe bei der unteren Schlossschraubenreihe befindet (s. Abb. 6.22).



Gruppe I – Eiche-BSH 2011b

Gruppe II – Eiche-BSH 2011c

Abbildung 6.22: Orte erster Rissbildung im Holz

Die Tabelle 6.4 liefert Informationen über die max. tragende Kraft der Prüfkörper sowie über die Erscheinungsorte der ersten Rissbildung im Holz.

Prüfkörper	$F_{\text{Beginn}}$ [N]	$F_{\text{Riss}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]	Gruppe
Eiche - 2011 a	60,2	-	22,5	Gruppe II
Eiche - 2011 b	25,6	16,8	24,3	Gruppe I
Eiche - 2011 c	25,4	7,8	17,1	Gruppe II
Buche Paneel - 2031 a	34,6	13,6	13,9	Gruppe I
Buche Paneel - 2031 b	21,8	-	16,7	Gruppe I
Buche Paneel - 2031 c	29,2	-	18	Gruppe I

Tabelle 6.4: Die max. tragende Kraft und  $F_{\text{Rissbildung}}$

Um die Versagensmechanismen des Holzes besser betrachten zu können, werden die Ergebnisse aus dem Aramis-System aufgerufen. Es ist zu beachten, dass zwei Momente entsprechend der unten dargestellten Abb. 6.23 im Prüfkörper wirken. Wie vorher diskutiert, werden alle Auszugsversuche von diesem Anschluss (Fassadenelement-Primärkonstruktion-Anschluss mit der geschosshohen Element-Element-Verbindung) mit einem flachen Fahnenblech für die Kraftleitung von der Maschine in den Schlossschrauben durchgeführt, da die Vorbereitung des L-förmigen Fahnenblechs an der HCU nicht möglich ist.

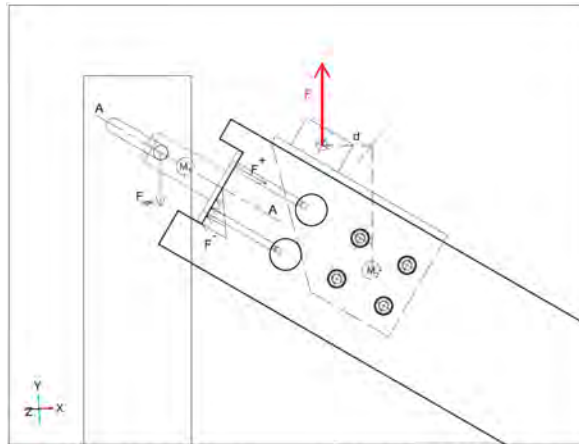


Abbildung 6.23: Die entstehende Versatzmomente im Prüfkörper beim Aufbringen der Kraft

Die Abb. 6.24 stellt exemplarisch die Verschiebungen des Prüfkörpers aus Eiche-BSH in X-Richtung und die entstehenden Verschiebungen der Anschlüsse in den X- und Y-Richtungen dar. Wie dargestellt haben alle Anschlüsse eine Verschiebung in X-Richtung.

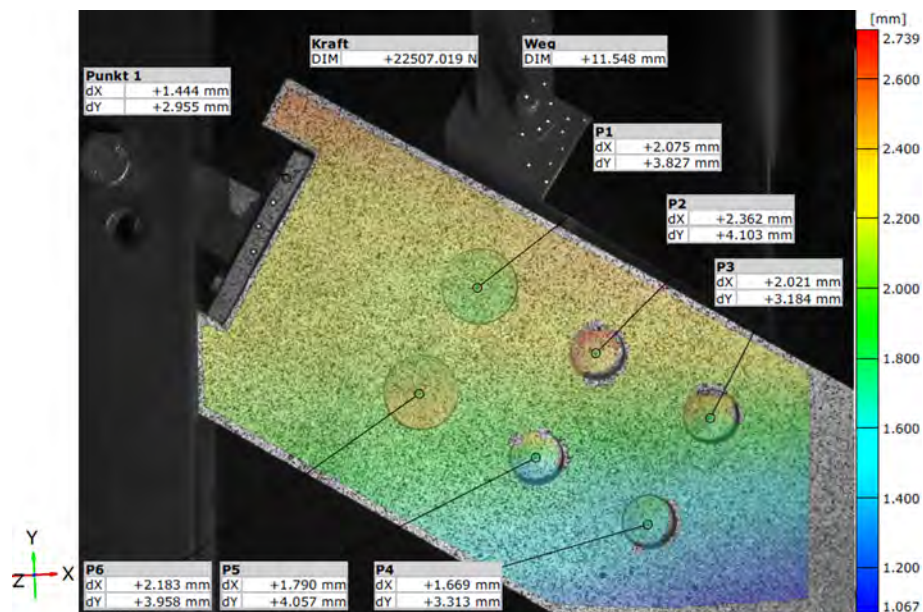


Abbildung 6.24: Verschiebung des Prüfkörpers in X-Richtung & Verschiebungen in den Anschlüssen kurz vor dem Bruch - Eiche 2011a

Um besondere Verschiebungen mit dem Aramis-System visualisieren zu können, wurden Punktmarkierungen sowohl auf der Oberfläche des gabelförmigen Gegenstücks als auch auf der Oberfläche des Fahnenblechs (Adapter) geklebt. Die Verschiebungen dieser Punkte sind (vor und nach dem Versuch) in Abb. 6.25 dargestellt.

Verschiebung des Fahnenblechs (Adapter) und des gabel-förmigen Gegenstück

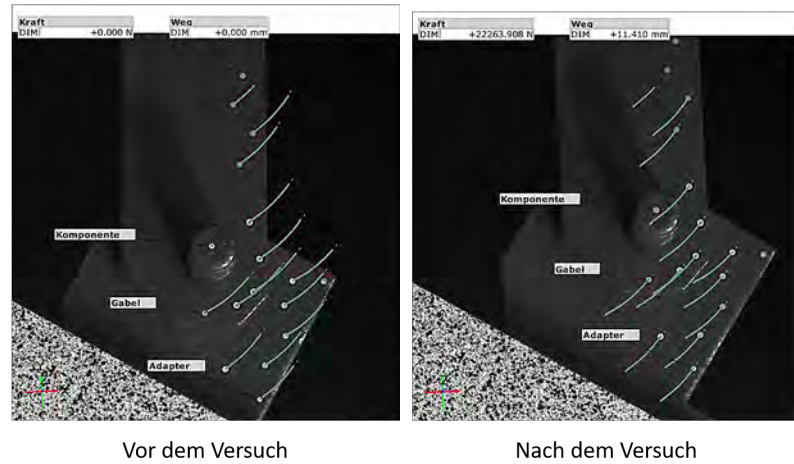


Abbildung 6.25: Verschiebungprofile des Fahnenblechs (Adapter) und des Gabel-förmigen Gegenstück - Eiche 2011a

Weiterhin zeigt die Abb. 6.24 eine positive Verformung (in den x- und Y-Richtungen) für den Anschluss auf der Hirnseite des Holzes (Dorn).

Verschiebung des Anschlusses auf der Hirnseite des Holzes (Dorn)

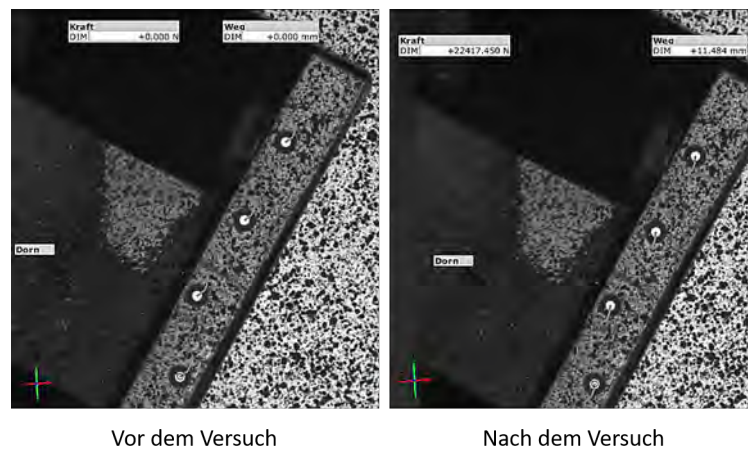


Abbildung 6.26: Verschiebungprofilen des Anschlusses auf der Hirnseite des Holzes (Dorn)- Eiche 2011a

## 6.1.2. Geschossdeckenanschluss bei brüstungshohen Elementstößen

### Geschossdeckenschluss mittels Arbeitsplattenverbinder

Das T-förmige Bauteil mit den Maßen  $60 \times 40$  [mm] wird durch den entsprechenden Ausschnitt in die Ankerplatte auf den Auflagerbalken geführt. Dabei erleichtert die deutliche Fase des Bauteils an ihrem unteren Rand die Montage der Elemente. Das T-Stück wird bereits werksseitig durch eine DHV-Schweißnaht an einem  $28$  [mm] breiten und  $180$  [mm] langem Blech befestigt, das mit  $8$  [mm] starken Bohrungen in einem Abstand von  $140$  [mm] versehen ist. Durch diese werden die Bolzen  $8 \times 70$  in die Pfosten geführt, die ebenfalls eine  $8$  [mm] starke Bohrung aufweisen. Die Verbindung der Bolzen mit den kreisförmigen Arbeitsplattenverbindern (s. Abb. 4.2) wird in einer  $20$  [mm] tiefen Bohrung mit einem Durchmesser von  $35$  [mm] ausgeführt. Diese Bohrungen sind, um einen Konflikt mit der inneren Dichtung zu vermeiden, auf der Elementinnenseite der Pfosten ausgeführt.

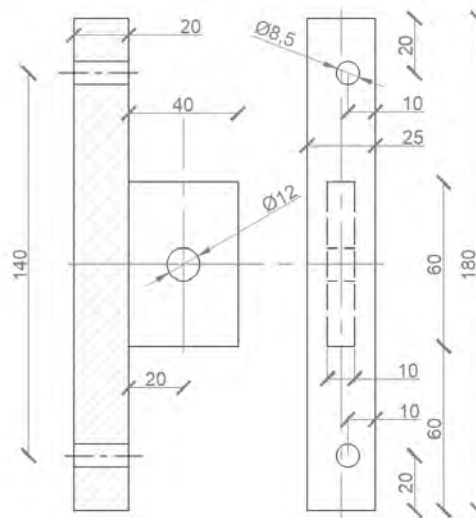


Abbildung 6.27: Geschossdeckenanschluss mittels Arbeitsplattenverbinder

Das Eigengewicht der Fassade erzeugt eine Querkraft in den Bolzen. Zusätzlich werden sie infolge der Windsoglasten und der Holmlasten beansprucht, die über die Plattenverbinder in die Bolzen eingeleitet werden. Aus der zentrischen Anordnung der beiden Verbindungen mit einem beidseitigen Abstand von  $70$  [mm] zu der Wirkungsachse des Anschlusses resultiert eine gleichmäßige Zugbelastung der Bolzen. Es treten keine zusätzlichen Kräfte infolge eines Versatzmomentes auf.

### Experimentelle Untersuchungen

Es werden die Windsogbelastung, die horizontal gerichtete Holmlast für absturzsichernde Bauteile und die Lastfallkombination aus Wind- und Holmlast getestet.

### Prüfkörper

Alle Prüfkörper dieser Versuchsreihe wurden von der Firma Brüninghoff GmbH & Co. KG entsprechend der Abbildung 6.4 bearbeitet.

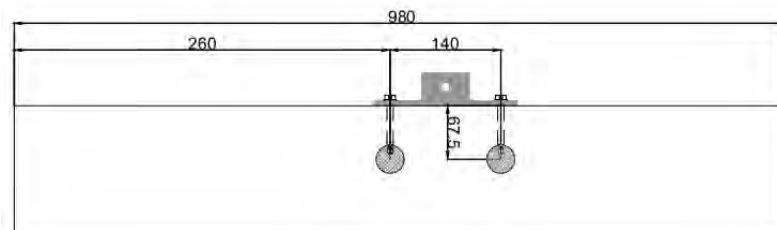


Abbildung 6.28: Prüfkörper

Die Tragfähigkeit des Anschlusses wird in drei Krafrichtung untersucht. Im ersten Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer parallel zur Holzfaserrichtung einwirkenden Kraft (Eigengewicht) untersucht. Im zweiten Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer senkrecht zur Holzfaserrichtung aufgebrauchten Kraft (Windeinwirkung) bestimmt und im dritten Schritt wird der Einfluss einer diagonal zur Holzfaserrichtung wirkenden Kraft (Kombinationskraft) geprüft.

### Versuchsdurchführung

Für alle drei Schritte dieser Versuchsreihe entspricht die Versuchsdurchführung nach dem Einbau des Probekörpers prinzipiell der Durchführung von Versuchen der ersten Reihe. So wird der unbelastete Zustand der Presse als Kraftreferenz eingestellt, damit nur die während des Versuches tatsächlich aufgebrauchte Last erfasst wird. Nach dem Einführen der Schraube  $M6 \times 100$ , 8.8 wird der Fahrbefehl bis zu einer Kraft von  $10\text{ N}$  erteilt, damit keine Verformung gemessen wird, solange die Klemmplatte keinen kraftschlüssigen Kontakt mit dem Holz hat. Ist eine konstante Kraft von  $10\text{ N}$  erreicht, wird die aktuelle Position des Überbaus als Verformungsnull eingestellt. Anschließend wird die Referenzmessung durch Aramis eingeleitet und die Messung wird gestartet. Sobald die optische Verformungsmessung nachweislich stattfindet, wird der Versuch gestartet und der Überbau der Prüfmaschine mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $1\text{ mm/min}$  nach oben gefahren. Fortlaufend wird das Kraft-Verformungs-Diagramm auf der Benutzeroberfläche der Software Test & Motion visualisiert. Der Versuch wird durchgehend fotografisch mit einer Spiegelreflexkamera in regelmäßigen Abständen dokumentiert, wobei Rissbildungen, die sich auch besonders akustisch bemerkbar machen, festgehalten werden.

Die vollständige Zerstörung der Verbindung, die sich sowohl durch den schlagartigen Abfall der Kurve in dem Kraft-Verformungs-Diagramm als auch durch das abgeschlossene Spalten eines Probestückes bemerkbar machen kann, gibt den Anlass zu einem manuellen Abbruch des Versuches. Abschließend wird durch die Software Test & Motion automatisch eine xls-Datei erstellt, die die zuvor gewählten Messgrößen der aufgebrauchten Kraft und der zugehörigen Verformung enthält.

### **Schritt I - Krafrichtung senkrecht zur Holzfaserrichtung**

Bevor die Tragfähigkeit des Anschlusses untersucht wird, ist der Einfluss der Einbindetiefe der Arbeitsplattenverbinder auf die Tragfähigkeit im Rahmen einer Vorversuchsreihe zu bestimmen. In diesem Schritt wird der Auszug der Arbeitsplattenverbinder für jedes der zwei Holzprodukte (Eiche-BSH und Baubuche Paneel) gleichermaßen durchgeführt. Es werden ausschließlich Verbindungen mit den Einbindetiefen von 50 und 60 [mm] getestet, sodass insgesamt 2 Versuchsdurchläufe stattfinden. Die Prüfkörper weisen den realitätsgetreuen Querschnitt eines Pfostens auf, der bei  $25 \times 160$  [mm] liegt. Da ein Spalten der Hölzer entlang ihrer Faser- bzw. Furnierrichtung erwartet wird, das sich von der getesteten Verbindung seitlich fortsetzen wird, werden möglichst lange Probekörper verwendet. So können große Rissweiten im Bereich der Bohrung gemessen werden und der Rissfortschritt wird deutlich sichtbar, bevor es durch die komplette Spaltung des Holzes zum endgültigen Versagen kommt. Auf der Hälfte der Länge von 980 mm wird die Verbindung eingebaut. Sie entspricht den für die Versuchsreihe 4 hergestellten Verbindungen und umfasst die kreisförmigen Klemmplatte, die in einer 20 [mm] tiefen Bohrung mit einem Durchmesser von 35 [mm] installiert wird, sowie die Sechskantschraube  $M8 \times 100$ , 8.8, die entsprechenden Unterlegscheiben und Mutter. Die 8 [mm] starke Bohrung wird händisch mit einem Spiralbohrer an einer Standbohrmaschine durchgeführt. Gleichermaßen wird die 35 [mm] starke Bohrung mit einem Forstnerbohrer hergestellt. Um die Probekörper an der Versuchsvorrichtung zu befestigen, werden vier Bohrungen mit einem Durchmesser von 16 [mm] hergestellt, die in einem Abstand von 125 [mm] bzw. 165 [mm] von der Mittelachse des Holzes vorgesehen sind. Da der Randabstand dieser Fixierung mit 42 [mm] geringer ist, als die Einbindetiefe der zu prüfenden Verbindung, werden sicherheitshalber vier Schrauben verwendet.

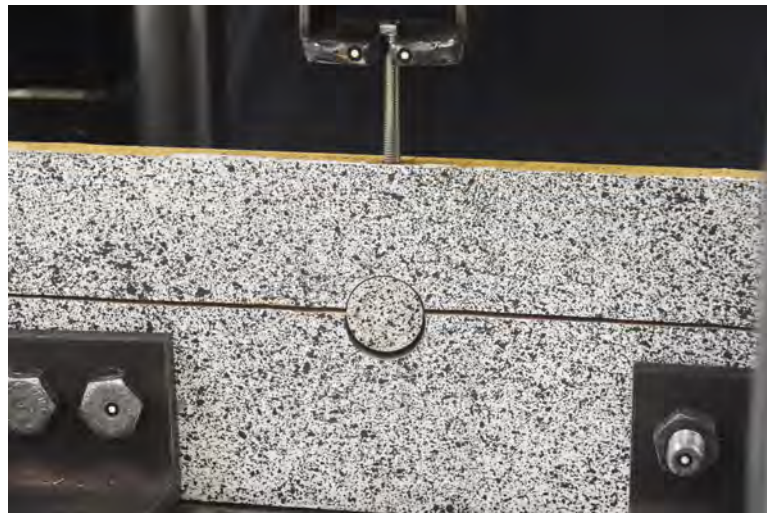


Abbildung 6.29: Vorversuch Rissbildung

### **Versuchsaufbau**

Das Foto 6.30 zeigt den Versuchsaufbau. Um die Probekörper in der Prüfmaschine zu befestigen wer-

den vier ungleichschenklige Winkelprofile L 120×80×12 mit einer Länge von 150 [mm] verwendet. Der kürzere Schenkel des Winkelprofils liegt am Holz an, da der lange Schenkel die Verbindung verdecken würde. Daher beträgt der Randabstand der zweischnittigen Verbindungen zwischen dem Probekörper und der Versuchsvorrichtung nur 42 [mm] und ist geringer als die Einbindetiefe der zu prüfenden Verbindung. Um eine wesentlich höhere Tragfähigkeit der Verbindung mit den Winkelprofilen zu garantieren, werden vier Schrauben M 16×80 der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet. Dadurch sollen die Verformungen des Anschlusses so gering wie möglich gehalten werden, sodass die gemessene Verformung in erster Linie durch die zu prüfende Verbindung verursacht wird. Wie für die erste Versuchsreihe werden alle vier Schrauben mit einem Anziehmoment von 120 [Nm] vorgespannt. Bedingt durch die Länge der Probestücke muss die Haltevorrichtung aus den beiden spiegelsymmetrischen Winkelprofilen um 36° rotiert werden, da zwischen den Spindeln der Prüfmaschine nur Probestücke mit einer maximalen Breite von 570 [mm] passen. In der Folge können die Winkel nicht direkt in den Schraubenkanälen der Prüfmaschine fixiert werden, sodass eine Adapterplatte mit den Maßen 500×450×20 [mm] aus Stahl gefertigt werden muss. Eingeschnittene Gewinde nehmen die durch den langen Schenkel der Winkel geführten Schrauben M16×40, 8.8 auf. Die Adapterplatte wird wiederum mit vier Sechskantschrauben M12×40 in den Schraubenkanälen der Prüfmaschine befestigt. Die Objektive der Messvorrichtung Aramis werden der Rotation des Probekörpers folgend verschoben und auf die eingebaute Verbindung ausgerichtet. Die zur Verfügung stehende optische Messfläche misst eine Breite von 600 [mm] und kann den gesamten Probekörper nicht erfassen. Jedoch ist das Tragfähigkeitskriterium ohnehin überschritten, sobald Risse sich außerhalb dieses Bereiches fortsetzen. Auch die Spiegelreflexkamera wird wieder auf den Anschluss ausgerichtet und dokumentiert den Versuchsablauf. Der oberhalb des Probekörpers befindliche Versuchsaufbau entspricht prinzipiell dem Aufbau der ersten Versuchsreihe. Auf die an dem Überbau der Prüfmaschine angeschlossene 20 kN Kraftmessdose folgt die Verlängerung und die Adapterplatte. Daran ist das Gelenk angeschraubt, das die Aufnahme der Schrauben, bestehend aus einem Quadratrohr QRO 70×3, trägt.



Abbildung 6.30: Versuchsaufbau

## Ergebnisse

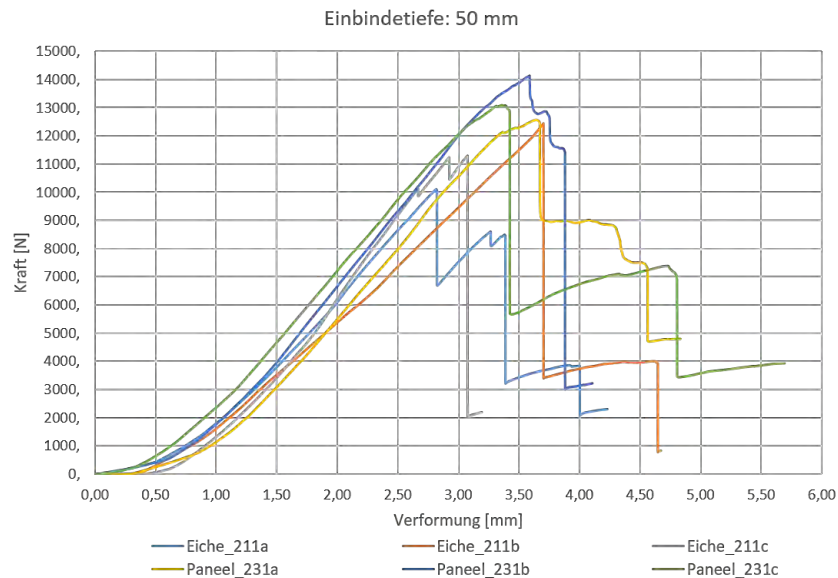


Abbildung 6.31: Kraft-Verschiebung-Diagramm der Prüfkörper mit der Einbindetiefe von 50 mm

Die Gegenüberstellung der Kraft-Verformung-Diagramme 6.31 der Prüfkörper mit einer Einbindetiefe von 50 [mm] zeigt nur geringe Differenzen.

Bei allen Prüfkörpern fängt die erste Rissbildung im mittleren Bereich des Prüfkörpers statt, wo sich der kreisförmige Plattenverbinder befindet. Mit zunehmender Rissbildung bietet das Holz anfangs noch einen relativ hohen Widerstand, bis ein kritischer Wert überschritten ist. Anschließend fällt die Anschlusskraft stark ab.

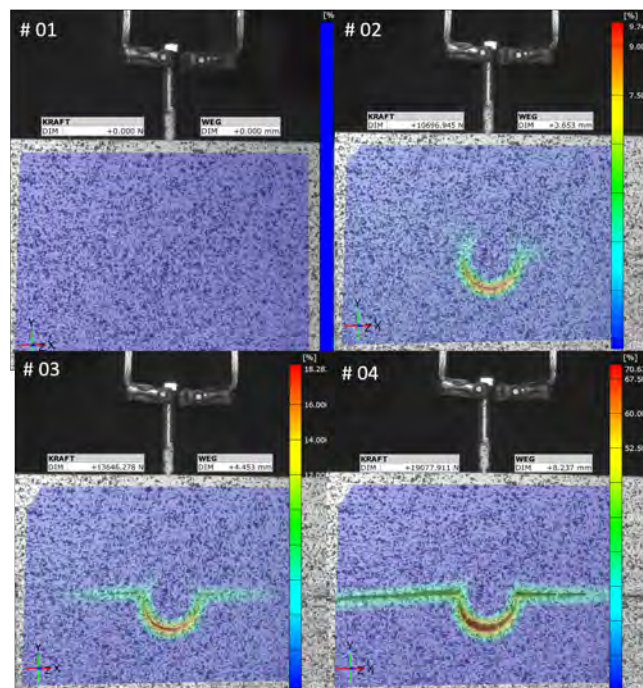


Abbildung 6.32: Versuchskörper Eiche-BSH 211a

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass die Tragfähigkeit des Holzes mit zunehmender Einbindetiefe steigt, um ca. 54% für die Prüfkörper aus Eiche-BSH und ca. 19% für die Prüfkörper aus Baubuche Paneel. Die Einbindetiefe 60 [mm] wird für die weiteren Versuchsreihen zur Grunde gelegt.

## Untersuchung des Anschlusses mit zwei Arbeitsplattenverbindern

### Versuchsaufbau

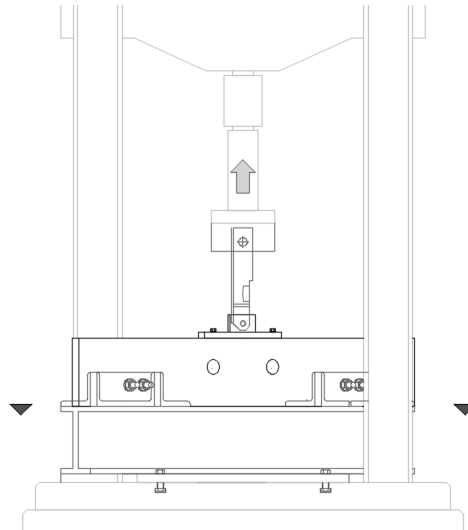


Abbildung 6.33: Versuchsaufbau

Wie in der Abb. 6.33 zu sehen, wird der Prüfkörper  $1000 \times 160 \times 25$  [mm] wieder auf einem Träger HEB 140 durch vier Winkelprofile L  $120 \times 58 \times 10$  mit der Länge 120 [mm] durch vier Bolzen  $M16 \times 70$  [mm] in der Maschine befestigt. Die Krafteinleitung erfolgt wieder über das gabelförmige Gegenstück von der Prüfmaschine in der T-förmige Adapter (s. Abb. 6.27). Die Versuchsdurchführung bleibt genauso wie im Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

### Ergebnisse

Grundsätzlich liegt eine große Streuung bzgl. der Kraft bei erster Rissbildung ( $F_{\text{Erstriss}}$ ) vor. Dies ist zum einen auf die begrenzte Anzahl baugleicher Probekörper zurückzuführen, zum anderen auf die Inhomogenität des Baustoffes Holz (s. die Tabelle 6.5).

In der Regel kündigt sich das Versagen der Verbindung im Holz jedoch an. Der Erstriss lässt sich normalerweise auf einer Seite der Verbindung erkennen. Dieser verläuft horizontal von der Bohrung für den Arbeitsplattenverbindern in der Längsrichtung des Probekörpers. Auffallend ist, dass die erste Rissbildung in dem Kraft-Verschiebung-Diagramm nicht zu erkennen ist, weil der Kraftabfall nicht groß ist.

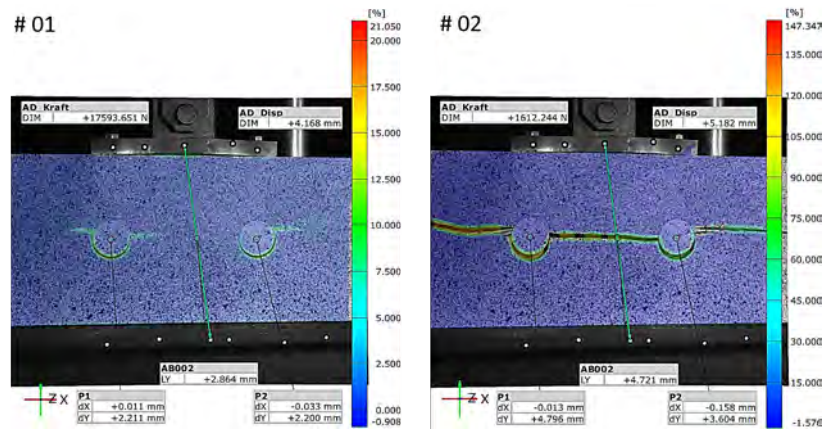


Abbildung 6.34: Fortschritt der Rissbildung und Versagen der Probe; Eiche-BSH 1511b

Manche Kraft-Verschiebung-Diagramme weisen einen Kraftabfall während des Versuchsvorgangs auf, andere nicht.

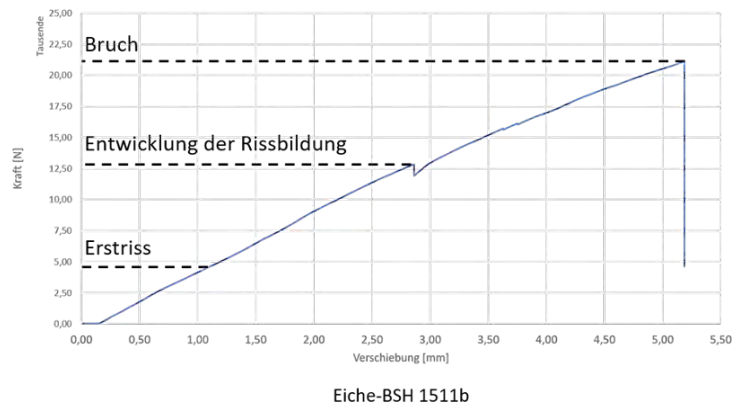


Abbildung 6.35: exemplarische Kurvenverlauf mit Kraftabfall; Eiche-BSH 1511b

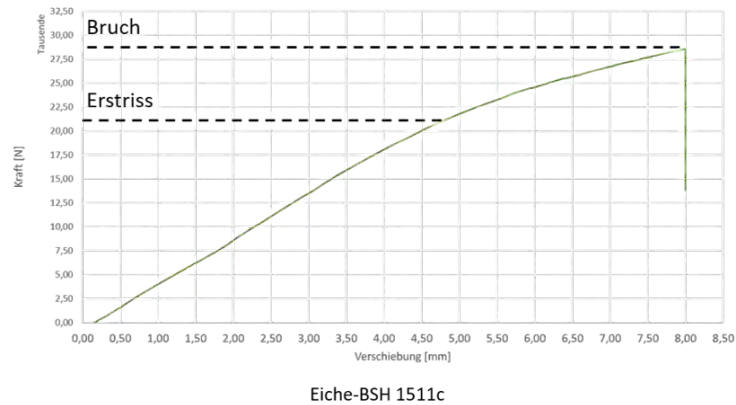


Abbildung 6.36: exemplarische Kurvenverlauf ohne Kraftabfall; Eiche-BSH 1511c

Der direkte Vergleich zwischen den Kraft-Verschiebung-Diagrammen weist keinen signifikanten Unterschied zwischen den Proben beziehungsweise zwischen der Holzarten auf. Die in der Tabelle 6.5 dokumentierte Werte stellen die max. Kraft  $F_{\max}$  und die Kraft bei der ersten Rissbildung  $F_{\text{Rissbildung}}$  dar.

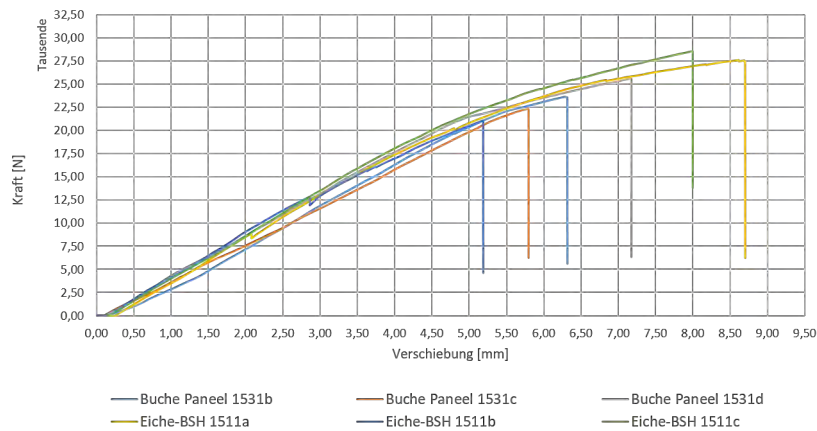


Abbildung 6.37: Unterschied zwischen den Kurvenverläufen

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe haben gezeigt, dass der Mittelwert der max. Kraft  $F_{\max}$ -Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche ca. 25,77 [kN] beträgt bzw. der Versuchskörper aus Baubuche Paneel ca. 23,86 [kN] beträgt.

Prüfkörper	$F_{\text{Riss}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]
Eiche - 1511 a	16,1	27,6
Eiche - 1511 b	4,6	21,1
Eiche - 1511 c	21,5	28,5
Buche Paneel - 1531 a	7,7	23,6
Buche Paneel - 1531 b	16,6	22,3
Buche Paneel - 1531 c	14	25,6

Tabelle 6.5: Die max. tragende Kraft und  $F_{\text{Riss}}$  Bildung

## Schritt II - Kraftrichtung parallel zur Holzfaserrichtung

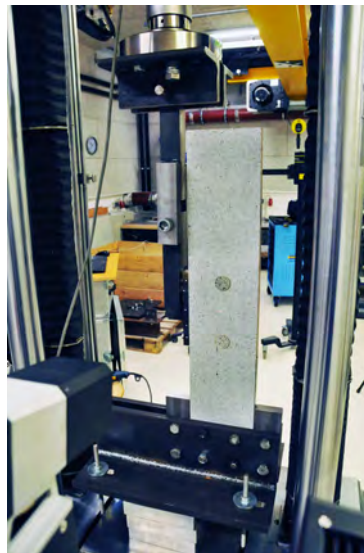


Abbildung 6.38: verwendete Winkelprofile

In diesem Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses an die Geschossdecke für brüstungshohe Elemente unter einer parallel zur Holzfaserrichtung aufgebrauchten Kraft (Eigengewicht) untersucht. Die Abb. 6.38 zeigt den Versuchsaufbau. Um die Krafteinleitung von der Maschine in das Fahnenblech realisieren zu können, werden zuerst zwei Winkel unter dem kreisförmigen Lastverteiler von der Maschine verschraubt. Die Kraft fließt von der Maschine zuerst in ein Gabel-förmiges Gegenstück (s. Abb. 6.39) rein, das durch seine  $\varnothing 20$  [mm] Öffnung mit den Winkel unter dem kreisförmigen Lastverteiler von der Maschine gelenkig gelagert wird. Danach geht die Kraft in das vorher konstruierte gabelförmigen Gegenstück (s. Abb. 6.6), das von unten durch ein M12-Bolzen 12.9 an einen T-förmigen Adapter zu befestigen ist.)

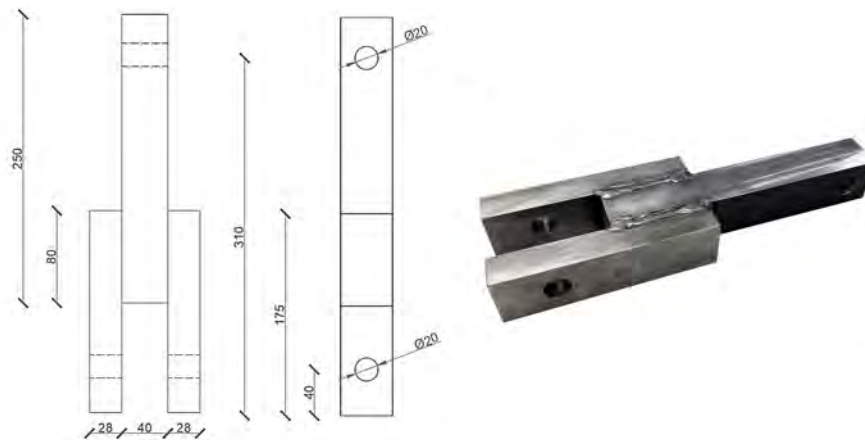


Abbildung 6.39: Gabelförmige Gegenstück

Um die Probekörper in die Prüfmaschine zu befestigen, werden zwei gleiche Winkelprofile L 178×108×12 mit einer Länge von 500 mm verwendet. Die Winkelprofile werden mit vier M12 Bolzen & T-förmigen Muttern direkt auf der Maschine verankert. Die beschriebenen Winkelprofile müssen wieder auf drei aufeinander gelegten Alublöcke (180×110×40 L×B×H [mm]) gelegt werden, um das mögliche Holzversagen am Lagerpunkt zu vermeiden. Ergänzend dazu wird der Prüfkörper durch zwei Stahlblöcke 67×220×25 mm seitlich unterstützt. Um eine wesentlich höhere Tragfähigkeit der Verbindung mit den Winkelprofilen zu garantieren, werden sechs Schrauben M16×80 der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet.

## Ergebnisse

Wie im Abschnitt 6.1.2 beschrieben, werden die Arbeitsplattenverbinder in Holzfaserrichtung gezogen. Die Aramis-Ergebnisse zeigen die Auswirkungen des Versatzmoments infolge der Lasteinleitung (Maschinenachse vs. Probenachse).

In dieser Versuchsreihe fließt die Kraft vom T-förmigen Adapter (s. Abb. 6.27) in die M8-Bolzen der Arbeitsplattenverbinder, was ggf. eine Überschreitung der Lochleibungsfestigkeit im Holz zur Folge hat. Die aufgenommene Aramis-Bilder der Hauptformänderungsvektoren unterstreichen dies.

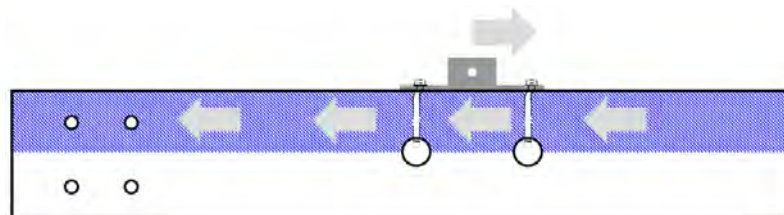


Abbildung 6.40: Schubspannungen in den Holzlamellen

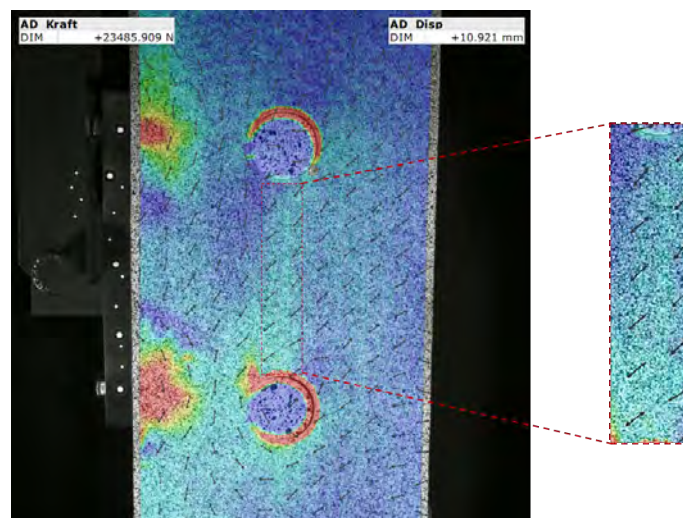


Abbildung 6.41: Schubspannung um die Rissachse kurz vor dem Bruch - Eiche 131b

In dieser Versuchsreihe wurden zwei Holzversagen bzgl. des Rissbildungsorts dokumentiert. Im ersten Fall versagt das Holz wegen der Überschreitung der Holzlochleibungsfestigkeit an den M8-Bolzen.

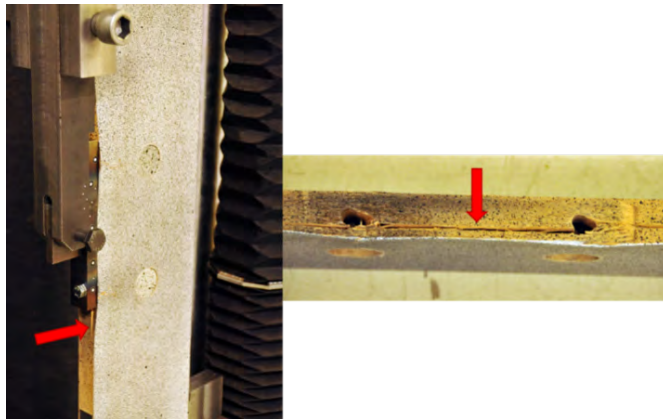


Abbildung 6.42: Lochleibungsversagen - Eiche 131a

Im zweiten Fall entsteht die Rissbildung auf der vorderen Seite des Holzes, wo sich die Bohrungen der Arbeitsplattenverbinder befinden, nach einer Überschreitung der kritischen Schubspannungen in den Furnierschichten.

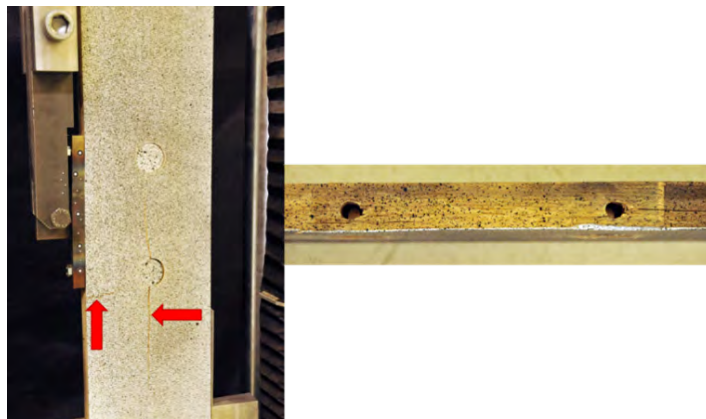


Abbildung 6.43: Schubspannungsversagen in der Klebschicht - Eiche 131b

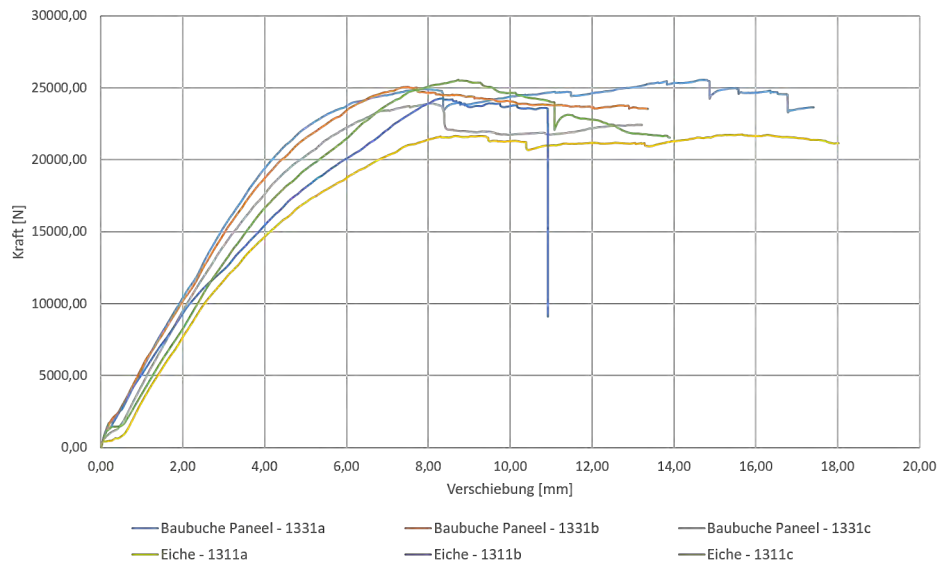


Abbildung 6.44: Kraft-Verschiebung-Diagramme

Ein Vergleich zwischen den Kraft-Verschiebung-Diagrammen zeigt ein global prinzipiell linear elastisches - plastisches Verhalten mit einem Übergang bei ca. 7 [mm]. Da die meisten Proben keinen großen Kraftabfall verzeichnen lag daran, dass in diesen Fällen die Lochleibungsfestigkeit maßgebend war. Im Gegensatz dazu weist die zweite Probe aus Eiche-BSH (131b) einen großen Kraftabfall aufgrund der entstehenden Rissbildung auf der vorderen Seite des Holzes bei ca. 10,9 [mm] Verschiebung auf (s. Abb. 6.45).

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass die Mittelwerte der max. Kraft  $F_{\max.}$ -Mittelwert der beiden Holzarten (Eiche-BSH & Baubuche Paneel) nah beieinander liegen. Die  $F_{\max.}$ -Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche und Baubuche Paneel betragen ca. 23,86 [kN] und ca. 24,84 [kN].

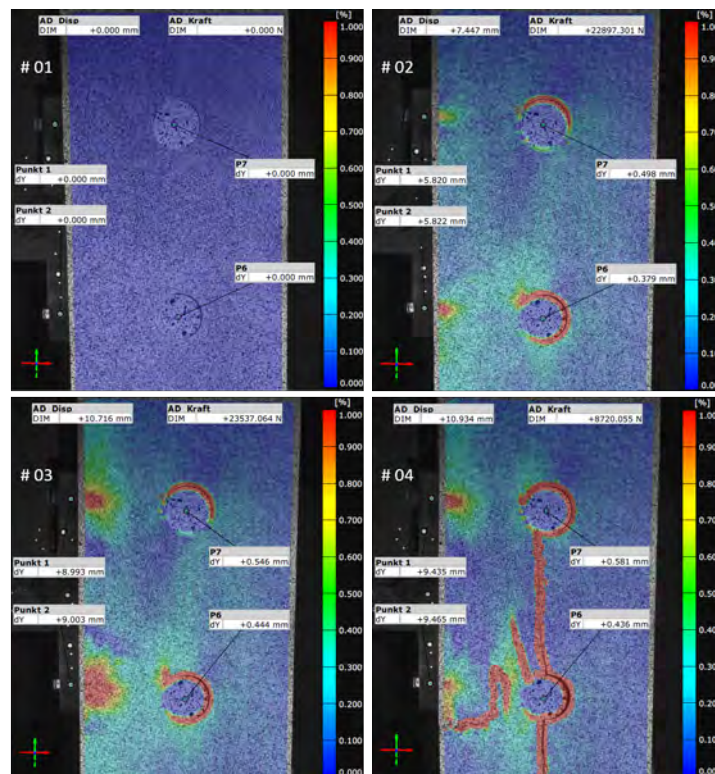


Abbildung 6.45: Versagen der zweiten Probe aus Eiche-BSH 131b

### Schritt III - Krafrichtung schräg zur Holzfaserrichtung

In diesem Schritt wird die Tragfähigkeit vom Anschluss an die Geschosdecke bei brüstungshohen Fassadenelementen unter einer schräg zur Holzfaserrichtung aufgebracht Kraft (aus Eigengewicht und Windsog) untersucht.

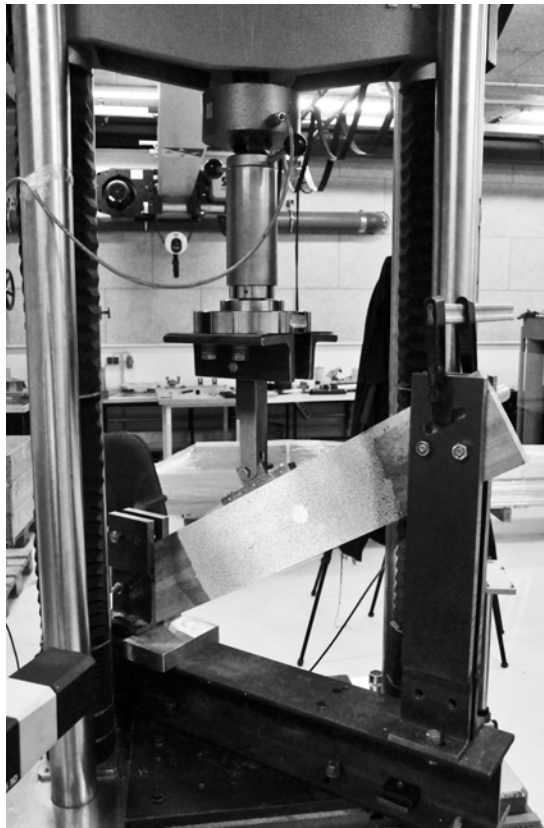


Abbildung 6.46: Versuchsaufbau Eiche-BSH

Die Abb. 6.46 zeigt den Versuchsaufbau. Der Kraftwinkel für diese Versuchsreihe beträgt  $30^\circ$ . Die Verankerung der Prüfkörper in der Maschine erfolgt wieder über vier Winkelprofile mit unterschiedlichen Schenkelgrößen. Die Prüfkörper lassen sich von beiden Seiten durch zwei  $\varnothing 16 \times 70$  Bolzen 10.9 mit den Winkelprofilen befestigen. Anschließend sind die Winkelprofile an den Träger HEB 140 jeweils durch ein M16 Bolzen 10.9 und Muttern angeschraubt. Der Träger wird selbst durch vier  $M16 \times 30$  Bolzen 10.9 in der Maschine befestigt.

### Ergebnisse

In dieser Versuchsreihe wirkt eine diagonale Kraft auf das Holz.

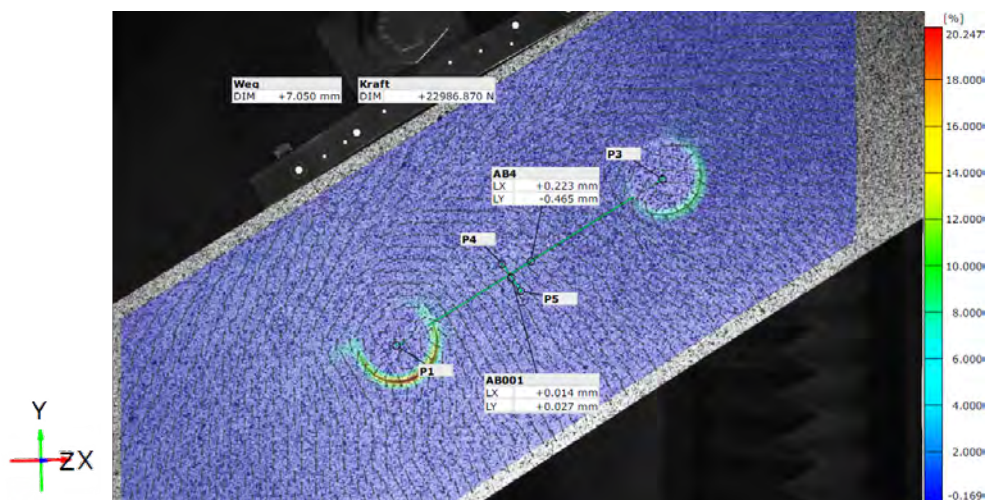


Abbildung 6.47: Versatzmoment im T-förmigen Adapter

Wie oben dargestellt herrscht zwischen den Arbeitsplattenverbindern (AB4) ca. 0,465 [ mm] relative Verschiebung in Y- und 0,223 [ mm] in X-Richtung. Ergänzend dazu wurden zwei Punkte (P4 & P5) um die Rissebene ausgewählt, um eine erste Einschätzung über die relativen Verschiebungen der Holzlamellen treffen zu können. Laut der dargestellten Ergebnisse gibt es zwischen den ausgewählten Ebenen ca. 0.014 [ mm] Verschiebung in X- und 0.027 [ mm] in der Y-Richtung (AB001). Es ist klar, dass der Zuganteil der aufbrachten Kraft größere Verschiebungen (Y-Richtung) im Holz verursacht hat. Aber da einerseits das Holz ein inhomogenes Material ist und andererseits die Aramis-Software die lokalen Verschiebungen berechnet, kann man nicht eine kräftige Aussage über gesamte Verschiebung der Furnierschichten im Holz treffen.

Den Aramis-Ergebnissen zur Folge erfahren die Arbeitsplattenverbinder negative Verschiebungen in X-Richtung und positive Verschiebungen in Y-Richtung (s. Abb. 6.48).

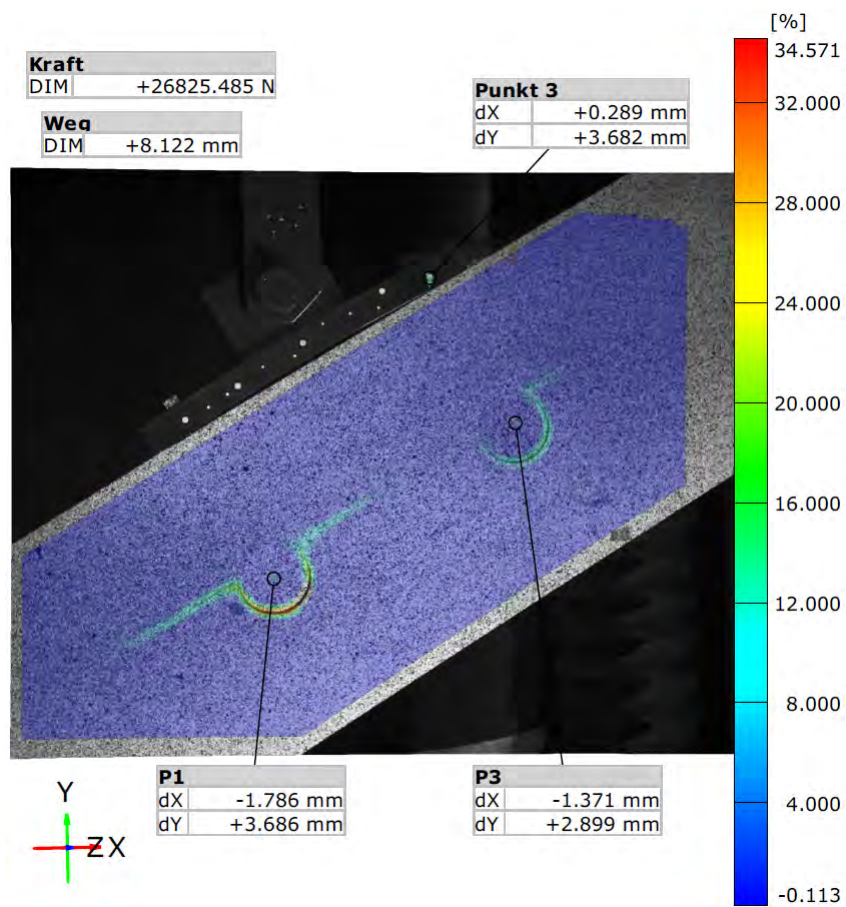


Abbildung 6.48: Verschiebung der Arbeitsplattenverbinder kurz vor dem Bruch; Eiche 1811b

Wie in der Abb. 6.48 exemplarisch dargestellt, weist der rechte Arbeitsplattenverbinder kleinere Verschiebung in Y-Richtung auf, aufgrund des kleinen Versatzmoments im T-förmigen Adapter (s. Abb. 6.49).

Die negative Werte lassen sich so interpretieren, dass die Arbeitsplattenverbinder durch die Kräfteinleitung in den T-förmigen Adapter und anschließend in die Schrauben in  $\varnothing 8$ -Bohrungsachse ausgezogen werden.

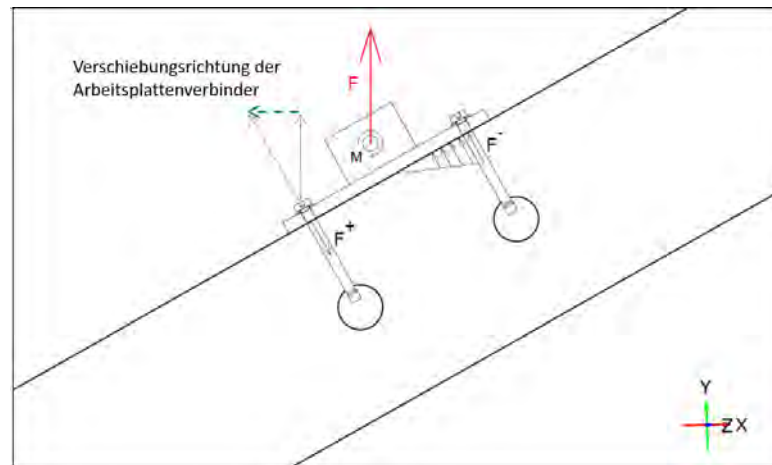


Abbildung 6.49: Verschiebungsrichtung der Arbeitsplattenverbinder

Die Abb. 6.50 stellt exemplarisch das Kraft-Verschiebung-Diagramm der zweiten Probe aus Eiche-BSH dar. Die Kraft-Verschiebung-Diagramme dieser Versuchsreihe lassen sich bzgl. ihres Kurvenverlaufs kaum unterscheiden. Auffallend ist, dass keine erkennbare Kraftabfälle wegen der Rissbildungen zu erkennen sind.

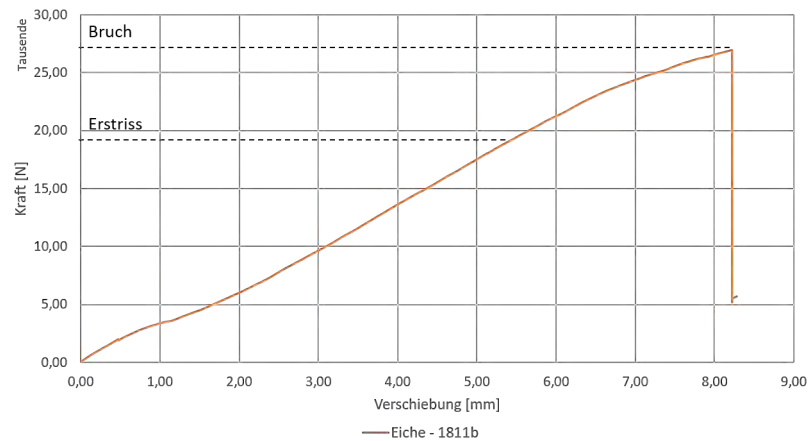


Abbildung 6.50: Kraft-Verschiebung-Diagramm der zweiten Probe aus Eiche-BSH

Wie in der Tabelle 6.6 dargestellt, gibt es eine große Steuerung bzgl. der Kraft, die zum ersten Riss führt.

Prüfkörper	$F_{\text{Riss}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]
Eiche - 1811 a	21,2	22,9
Eiche - 1811 b	18,1	26,9
Eiche - 1811 c	15	29,2
Buche Paneel - 1831 a	14,2	24,2
Buche Paneel - 1831 b	5	25,08
Buche Paneel - 1831 c	11	21,2

Tabelle 6.6: max. Kraft und  $F_{\text{Riss}}$  Bildung

Den Kraft-Verschiebung-Diagrammen und den Werten aus der Tabelle 6.6 zufolge, beträgt der Mittelwert der max. Kraft  $F_{\text{max.}}$ -Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche-BSH ca. 26,38 [kN] und der Versuchskörper aus Baubuche Paneel ca. 23,54 [kN].

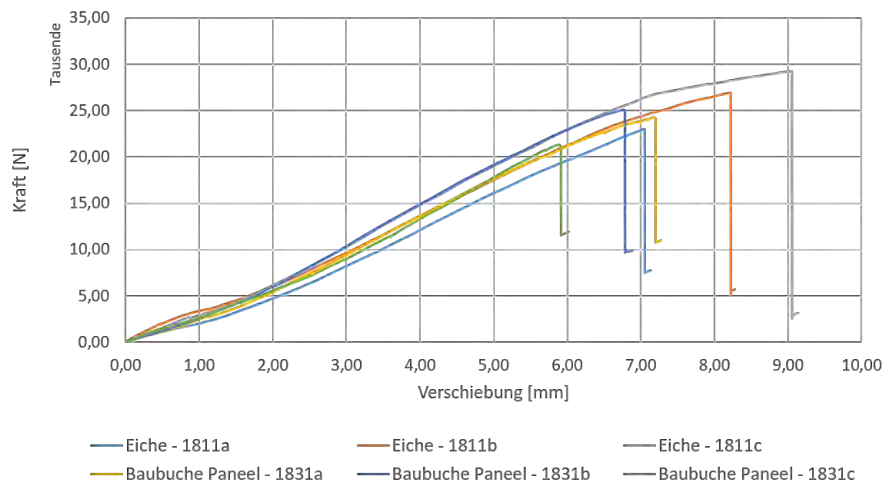


Abbildung 6.51: Kraft-Verschiebung-Diagramme

### 6.1.3. Variante2

In diesem Abschnitt wird die Tragfähigkeit der zweiten Variante vom Geschossdeckenanschluss für brüstungshohe Fassadenelemente untersucht. Die vier Schrauben sind in einem quadratischen Raster von  $60 \times 52$  mm angeordnet. Sie übertragen Querkräfte der Fassadenpfosten infolge Windlasten und Holmlasten sowie Normalkräfte infolge des Fassadeneigengewichts. Zu beachten sind sekundäre Momente infolge der Exzentrizität im Anschluss.

#### Prüfkörper

Alle Prüfkörper dieser Versuchsreihe wurden von der Firma Brüninghoff GmbH & Co. KG entsprechend der Abbildung 6.52 bearbeitet.

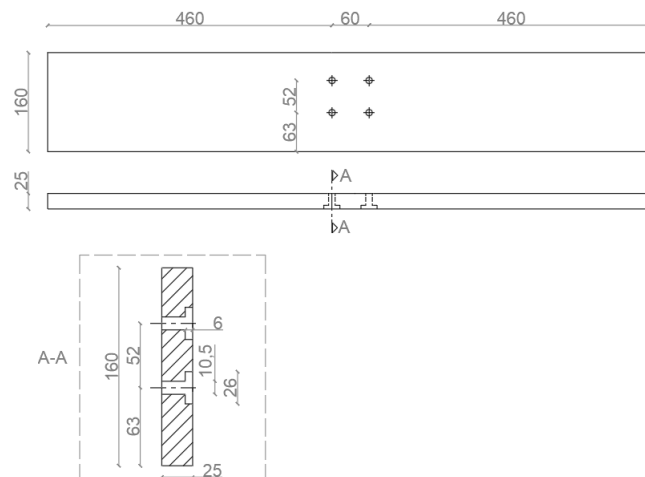


Abbildung 6.52: Prüfkörper - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

Die Tragfähigkeit des Anschlusses wird je nach Krafrichtung in zwei Schritten untersucht. Im ersten Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer senkrecht zur Holzfaserrichtung einwirkenden Kraft (Windlast & Holmlast) untersucht. Im zweiten Schritt wird die Tragfähigkeit des Anschlusses unter einer schräg zur Holzfaserrichtung wirkenden Kraft (Kombinationskraft) untersucht.

#### Versuchsdurchführung

Für beide Schritte dieser Versuchsreihe entspricht die Versuchsdurchführung nach dem Einbau des Probekörpers prinzipiell der Durchführung von Versuchen der ersten Reihe. Alle Versuche werden mit einer konstanten Geschwindigkeit von  $1 \text{ mm/min}$  durchgeführt. Der Versuchsdurlauf wird durchgehend photographisch mit einer Spiegelreflexkamera in regelmäßigen Abständen dokumentiert, wobei Rissbildungen, die sich auch besonders akustisch bemerkbar machen, festgehalten werden. Die vollständige Zerstörung der Verbindung, die sich sowohl durch den schlagartigen Abfall der Kurve

im Kraft-Verformungs-Diagramm als auch durch das abgeschlossene Spalten eines Probestückes bemerkbar machen kann, gibt den Anlass zu einem manuellen Abbruch des Versuches. Abschließend wird durch die Software Test & Motion automatisch eine xls-Datei erstellt, die die zuvor gewählten Messgrößen der aufgebrauchten Kraft und der zugehörigen Verformung enthält.

### Schritt I - Krafrichtung senkrecht zur Holzfaserrichtung

#### Versuchsaufbau

Die Abb. 6.53 zeigt den Versuchsaufbau. Die Versuche werden mit flachen Fahnenblechen durchgeführt (s. Abb. 6.53).

Um die Krafteinleitung von der Maschine in das Fahnenblech realisieren zu können, werden zuerst zwei Winkel unter dem kreisförmigen Lastverteiler von der Maschine verschraubt. Der Kraftfluss erfolgt über einen gabelförmigen Gegenstand, der von oben mit einem  $\varnothing 20$  Bolzen 10.9 in den Winkel und von unten mit einem M12-Bolzen 12.9 in das Fahnenblech zu befestigen ist (s. Abb. 6.6)

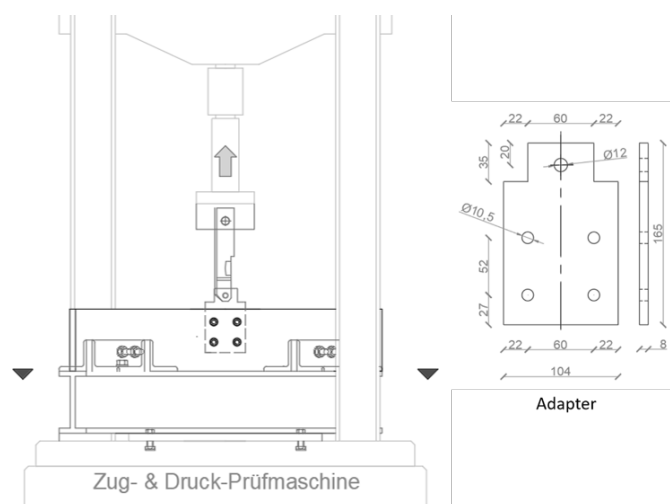


Abbildung 6.53: Versuchsaufbau - Geschossdeckenschluss mit Schlossschrauben

Um die Probekörper in der Prüfmaschine zu befestigen, werden vier gleiche Winkelprofile L 120×58×10 mit einer Länge von 500 mm verwendet. Die Winkelprofile werden mit vier M16 Bolzen & Muttern direkt an den HEB 140 angeschraubt, der durch vier M16-Bolzen mit der Stahlplatte befestigt ist, die an die Prüfmaschine angeschraubt wurde.



Abbildung 6.54: Lagerung der Proben in der Prüfmaschine - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

### Ergebnisse

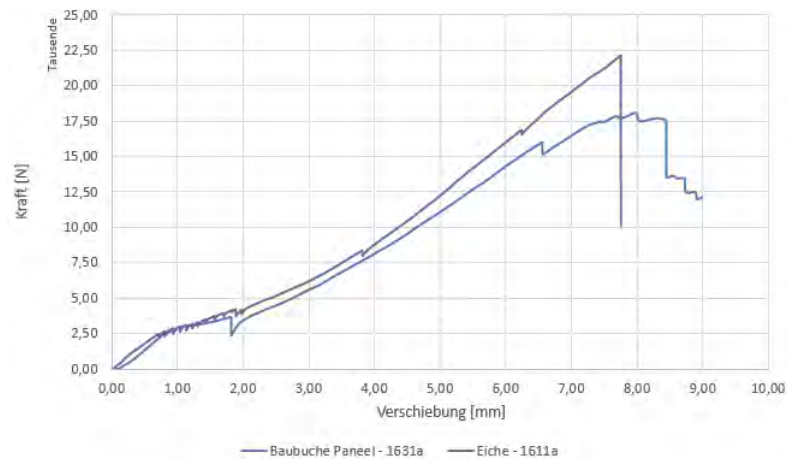


Abbildung 6.55: Kraft-Verschiebung-Diagramme der ersten Proben aus Eiche-BSH & Baubuche Panel - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

Die Abb. 6.55 zeigt den exemplarischen Kurvenverlauf der ersten Proben aus Eiche-BSH & Baubuche Panel. Wie in der Abb. 6.55 zu sehen ist, gibt es einige Kraftabfälle in den Kurvenverläufen vor dem Bruch (bei ca. 7,5 mm Verschiebung), die keine Rissbildung im Holz repräsentieren. Die Aramis-Bilder unterstreichen dies.

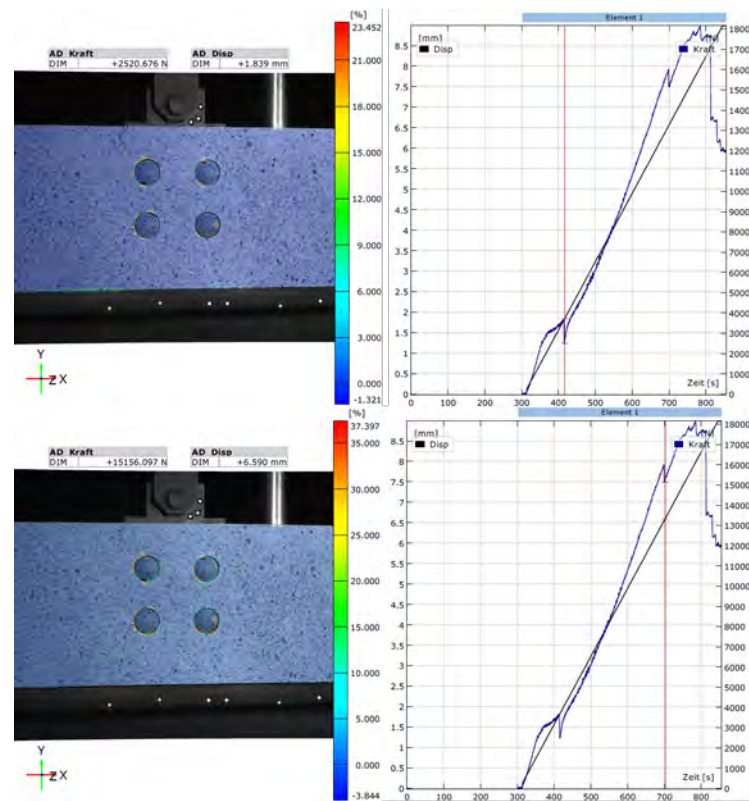


Abbildung 6.56: Aramis-Bilder der ersten Probe aus Baubuche Panel - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass der Mittelwert der ‚max. Kraft  $F_{max}$ .-Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche ca. 20,11 kN und der Versuchskörper aus Baubuche Panel ca. 18,94 kN beträgt.

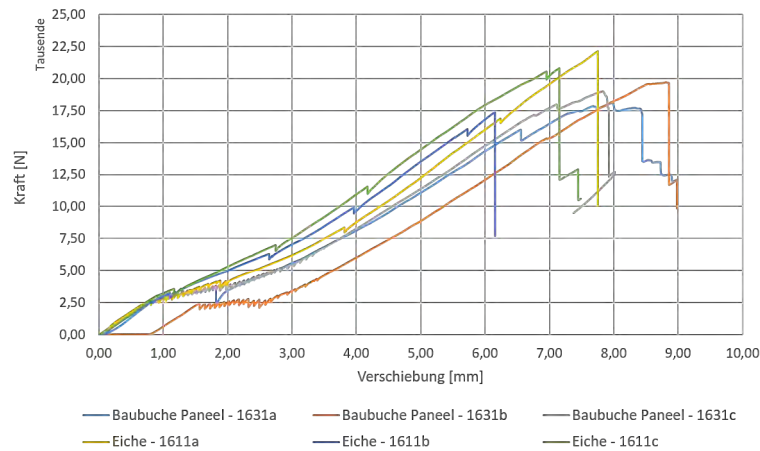


Abbildung 6.57: Kraft-Verschiebung-Diagramme - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

Die Gemeinsamkeit aller Versuche liegt es darin, dass das Holz immer an der unteren Schraubenreihe versagt.

<b>Prüfkörper</b>	$F_{\text{Riss}}$ [kN]	$F_{\text{max.}}$ [kN]
Eiche - 1611 a	20	22,91
Eiche - 1611 b	15,4	17,3
Eiche - 1611 c	20	20,8
Buche Paneel - 1631 a	17,4	18,1
Buche Paneel - 1631 b	19,5	19,7
Buche Paneel - 1631 c	18,2	19

Tabelle 6.7: max. Kraft und  $F_{\text{Riss}}$  Bildung

## Schritt II: Krafrichtung schräg zur Holzfaserrichtung

In diesem Schritt wird die Tragfähigkeit vom Geschossdeckenanschluss brüstungshoher Fassadenelemente unter einer schräg zur Holzfaserrichtung aufgebrachten Kraft (aus Eigengewicht und Windsog) untersucht.

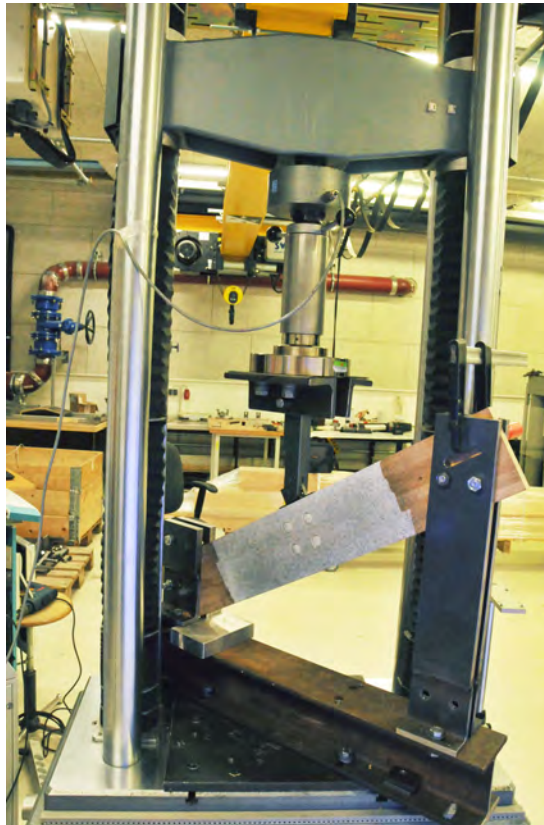


Abbildung 6.58: Versuchsaufbau - Geschossdeckenanschluss

Die Abb. 6.58 zeigt den Versuchsaufbau. Der Kraftwinkel beträgt  $30^\circ$ . Die Verankerung der Prüfkörper in der Maschine erfolgt wieder über vier Winkelprofile mit unterschiedlichen Schenkelgrößen. Die Prüfkörper lassen sich von beiden Seiten durch zwei  $\varnothing 16 \times 70$  Bolzen 10.9 mit den Winkelprofilen befestigen. Anschließend sind die Winkelprofile an den Träger HEB 140 jeweils durch ein M16 Bolzen 10.9 und Muttern angeschraubt. Der Träger wird selbst durch vier  $M16 \times 30$  Bolzen 10.9 in der Maschine befestigt.

## Ergebnisse

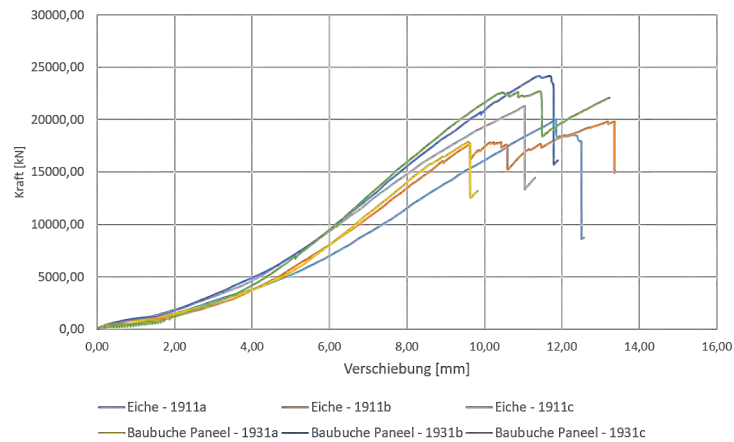


Abbildung 6.59: Kraft-Verschiebung-Diagramme - Krafrichtung schräg zur Holzfaserrichtung - Geschossdeckenanschluss

Den Ergebnissen dieser Versuchsreihe zufolge stimmen die Kurvenverläufe relativ gut überein. In dieser Versuchsreihe wurde zwei Versagen-Mechanismen, und zwar schlagartiges Versagen und Versagen nach der Rissentwicklung dokumentiert (s. Abb. 6.60). Die wirkende Kraft von der Maschine führt zur Zugbelastung in den Furnierschichten bzw. in den Klebfugen zwischen den Holzlamellen. In der Tabelle 6.8 wurde die max. Kraft  $F_{max}$  und die Kraft der ersten Rissbildung  $F_{Rissbildung}$  dokumentiert.

Prüfkörper	$F_{Riss}$ [kN]	$F_{max}$ [kN]
Eiche - 1911 a	19,9	20
Eiche - 1911 b	17,6	21,2
Eiche - 1911 c	-	19,8
Buche Paneel - 1931 a	17,5	17,8
Buche Paneel - 1931 b	21,6	24,1
Buche Paneel - 1931 c	-	22,7

Tabelle 6.8: max. Kraft und  $F_{Rissbildung}$

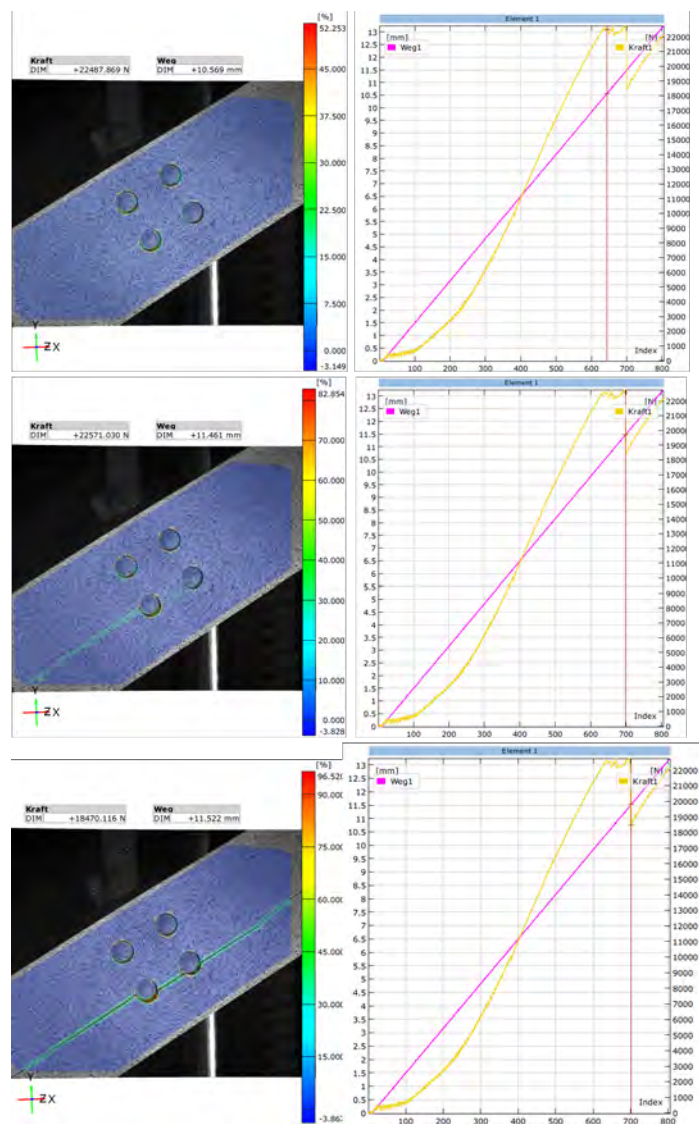


Abbildung 6.60: Rissbildung in der zweiten Probe aus Baubuche Paneel - Geschossdeckenanschluss mit Schlossschrauben

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass die  $F_{\max.}$ -Mittelwert aller Versuche relativ nah beieinander liegen. Die  $F_{\max.}$ -Mittelwert der Versuchskörper aus Eiche und Baubuche Paneel betragen ca. 20,39 kN und ca. 21,59 kN.

## 7. Aufstockungsvariante - Untersuchung der Bauteilanschlüsse

### 7.1. Allgemein

Die Nutzung des Fassadenelements als Aufstockung erfordert genauere Betrachtungen der Verbindungen zwischen den Bauteilen. Im folgenden Kapitel werden erste Untersuchungen zu den vorgesehenen Anschlüssen zwischen Pfosten und Riegel durchgeführt.

### 7.2. Konstruktionsbeschreibung

Der obere Riegel wird gelenkig mit dem Pfosten verbunden. Die Verbindung des Fassadenelements mit der unteren, bestehenden Dachdecke erfolgt über ein Stahlprofil, welches im Folgenden als Eckversteifung bezeichnet wird. Dieses dient der konzentrierten Lasteinleitung der Auflagerkräfte in die bestehende Betondecke. Gleichzeitig kann mit der Höhe der Eckversteifung die Höhendifferenz zwischen der Oberkante der Geschossdecke und OKFF der Aufstockung überbrückt werden (vgl. Abbildung 7.1).

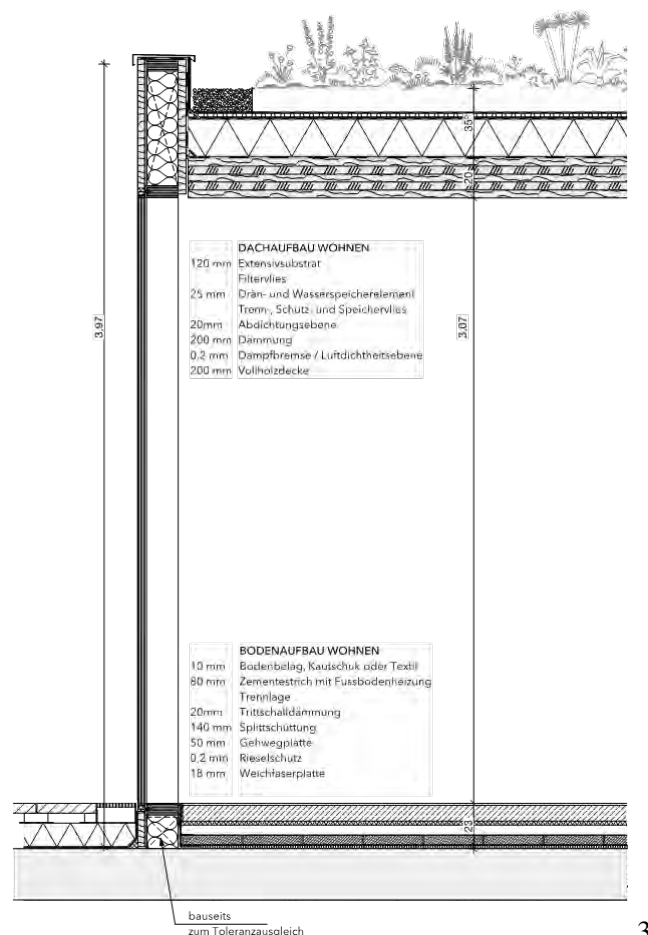


Abbildung 7.1: Schnitt Aufstockung

Die Eckversteifung besteht aus einem Stahlprofil HEB 160 (S 235) mit einer Länge von 460 mm mit einer aufgeschweißten Kopfplatte ( $t = 15$  mm). Der obere Flansch des Walzprofils wird mit einer Schraubverbindung mit dem unteren Riegel des Fassadenelements verbunden, der untere Flansch gelenkig mit der Geschossdecke. Die aufgeschweißte Kopfplatte wird mit dem Pfosten des Fassadenelements verschraubt. Zur Übertragung der Kräfte aus dem Pfosten sind mehrere Schrauben erforderlich, so dass eine Einspannwirkung vorliegt. Zusätzlich wird der Pfosten mit drei Schrauben mit dem unteren Riegel des Fassadenelements verbunden. Dieser Anschluss ist jedoch nicht statisch und nur konstruktiv wirksam.

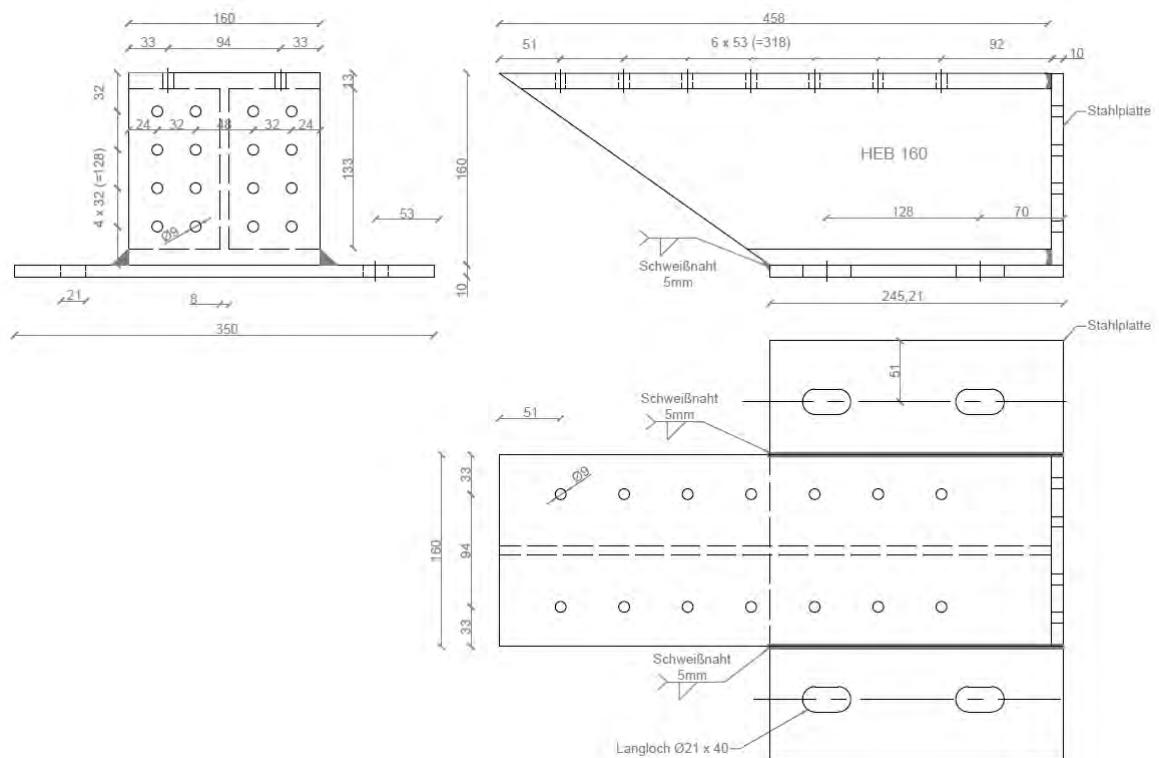


Abbildung 7.2: Eckversteifung

### 7.3. Verbindung Pfosten / oberer Riegel

Die Pfosten-Riegel-Verbindung erfolgt über M8-Bolzen 8.8 mit den Eindrehmuffen von der Firma Rampa, deren Außendurchmesser 16 mm beträgt. Alternativ dazu wäre die  $8 \times 60$  mm Holzschrauben-Verbindung. Aber da die Festigkeitsklasse der Holzschrauben normalerweise kleiner als die Festigkeitsklasse der Bolzen ist, kommen die Holzschrauben in diesem Fall nicht zum Einsatz (s. Abb.7.3 )

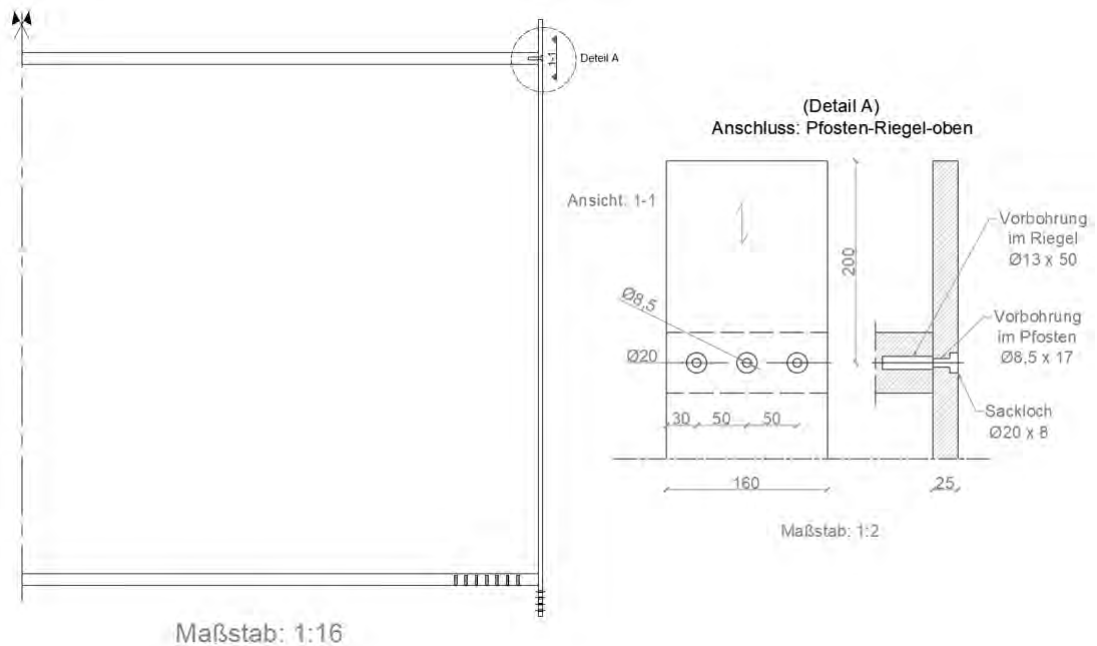


Abbildung 7.3: Die Pfosten-oberer Riegel-Verbindung

Die Vordimensionierung nach EC.05 zeigt, dass der Abstand der Bolzen mit dem Durchmesser 16 mm (der Durchmesser der Muffen) senkrecht zur Faserrichtung min. 64 mm sein muss. Da die Holzbreite 160 mm beträgt, wird dieser Abstand mit geringer Abweichung von EC.05 auf 50 mm runter gesetzt.

## 7.4. Experimentelle Untersuchung der Verbindung Pfosten / Eckversteifung

### 7.4.1. Übersicht der Versuche

Um die Tragfähigkeit der Schraubverbindung des Pfostens mit der Kopfplatte der Eckversteifung zu bestimmen, werden drei Varianten im Schubversuch geprüft (vgl. Abbildung 7.4) Hierbei ändert sich zwischen den Varianten lediglich der Verbindungsmitteltyp.

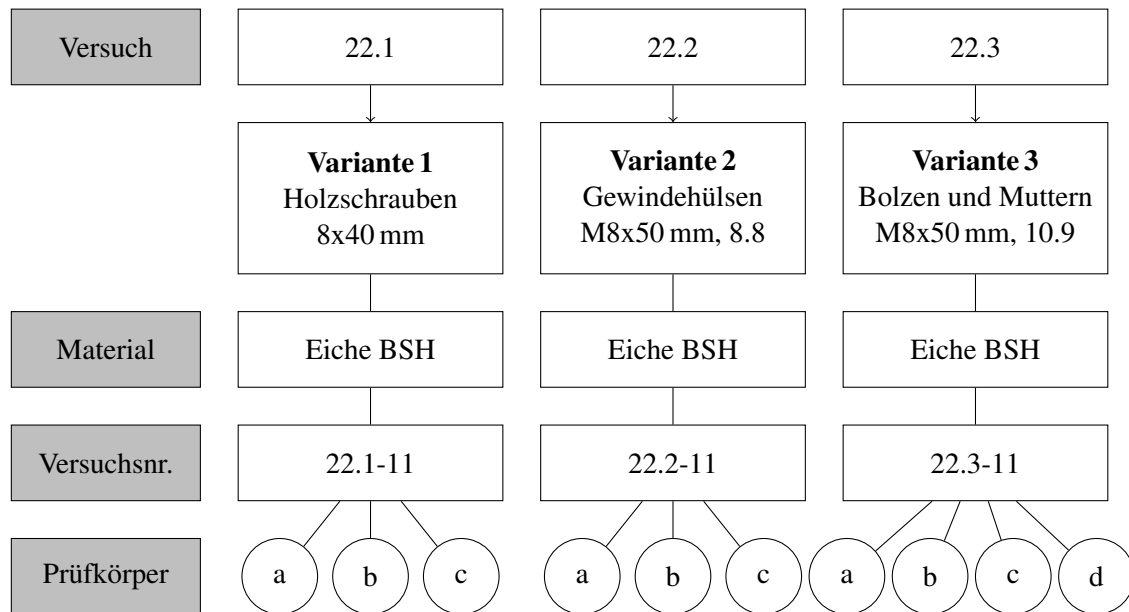


Abbildung 7.4: Gliederung der Versuche

### 7.4.2. Versuchsaufbau 1

Für Variante 1 und Variante 2 werden drei Prüfkörper aus Eiche BSH hergestellt und für Variante 3 vier Prüfkörper. Diese Prüfkörper aus Brettschichtholz (460x160x25 mm) stellen im Kleinversuch den unteren Riegel dar.

Die Lasteinleitung der Zugkraft aus der Prüfmaschine erfolgt über die Klemmung zweier Stahllaschen mit dem Brettschichtholz. Eine Schraubverbindung mit neun Schrauben am oberen Ende des Holzprüfkörpers erzeugt die nötige Klemmwirkung. Die Prüfmaschine wird weggesteuert betrieben, mit einer maximalen Zugkraft von 200 kN. Die Schraubverbindung am unteren Ende des Prüfkörpers entspricht dem zu prüfenden Anschluss. Der Holzprüfkörper wird unter Verwendung von 16 Schrauben/Bolzen mit einem Stahlprofil verbunden, welches im Anschlussversuch der Eckversteifung entspricht. Das Schraubenbild ist in Abbildung 7.6 dargestellt. In den ersten Versuchen wird zur Simulation der Eckversteifung ein zusammengeschweißter Winkel mit kurzen seitlichen Blechen verwendet. Der horizontale Schenkel des Winkels wird mithilfe einer Schraubverbindung mit dem Prüfstand verbunden. Aufgrund des Hebelarms zwischen der Zugkraft und der Schraubverbindung im horizontalen Blech des Winkels kommt es zu einem Versatzmoment. Da der Winkel mit den kleinen seitlichen Blechen nicht sehr steif in diese Richtung ist, verformt er sich stark, was zu Biegung

im Holzprüfkörper führt. Die Prüfkörper 1 (a) und 1 (b) versagten bereits sehr früh infolge dieser Biegung, weshalb es nicht zu einer vollen Ausnutzung der Tragfähigkeit des zu prüfenden Anschlusses kam. Daher wurde der Versuchsaufbau im weiteren Verlauf von „Versuchsaufbau 1“ zu „Versuchsaufbau 2“ optimiert. Die Prüfkörper, die mit dem ersten, weniger steifen, Versuchsaufbau geprüft sind, sind daher nachfolgend mit „Versuchsaufbau 1“ gekennzeichnet und in den Kraft-Weg-Diagrammen in rot dargestellt. Die Bohrungen für den Anschluss des Riegels stellen eine Querschnittsschwächung dar, die berücksichtigt wurden.

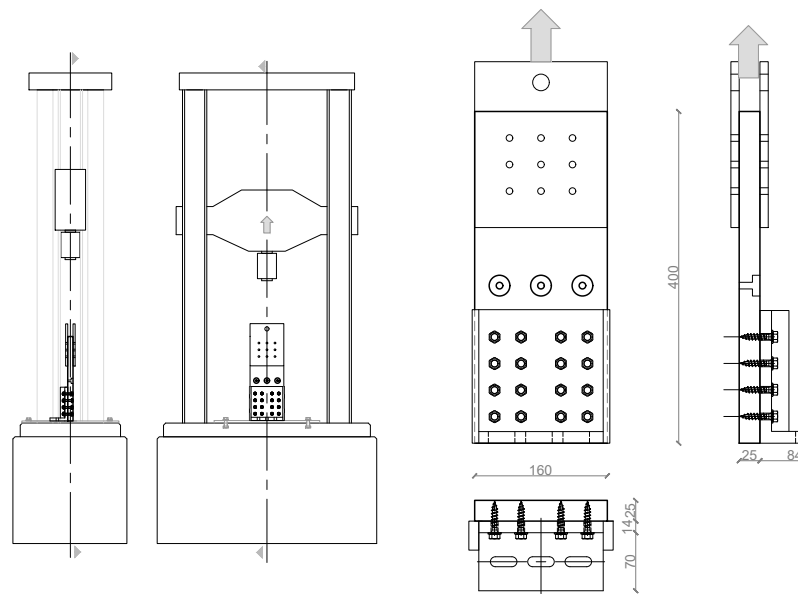


Abbildung 7.5: 22.1-11 / Versuchsaufbau 1 Anschlussversuch Pfosten / Eckversteifung

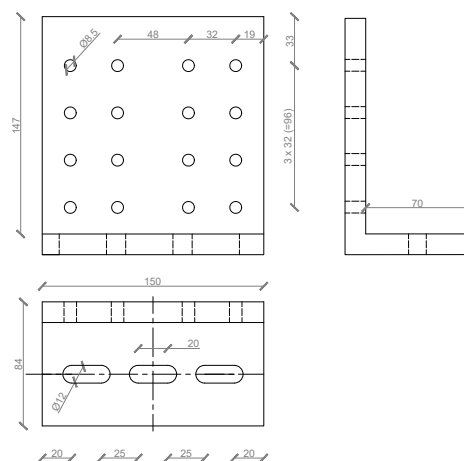


Abbildung 7.6: Detail Schraubanschluss Pfosten / Eckversteifung

### 7.4.3. Versuchsaufbau 2

Ziel der Optimierung des Versuchsaufbaus ist es, den schmalen BSH-Prüfkörper möglichst nur auf Zug und weniger auf Biegung zu belasten. Hierfür wird zunächst die Steifigkeit des Winkelprofils durch breitere und stärkere Seitenbleche erhöht. Darüber hinaus wird die Verbindung des Winkelprofils mit dem Prüfstand angepasst. Das Winkelprofil wird nun auf eine Stahlplatte geschweißt, welche mit je zwei Schrauben links und rechts des Prüfkörpers mit dem Prüfstand verbunden wird. Dies soll die Exzentrizität zwischen Zugkraft und Verbindung mit dem Prüfstand verringern. Der optimierte „Versuchsaufbau 2“ ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Die Prüfkörper, die mit diesem Versuchsaufbau geprüft sind, sind nachfolgend mit „Versuchsaufbau 2“ gekennzeichnet und in den Kraft-Weg-Diagrammen in blau dargestellt.

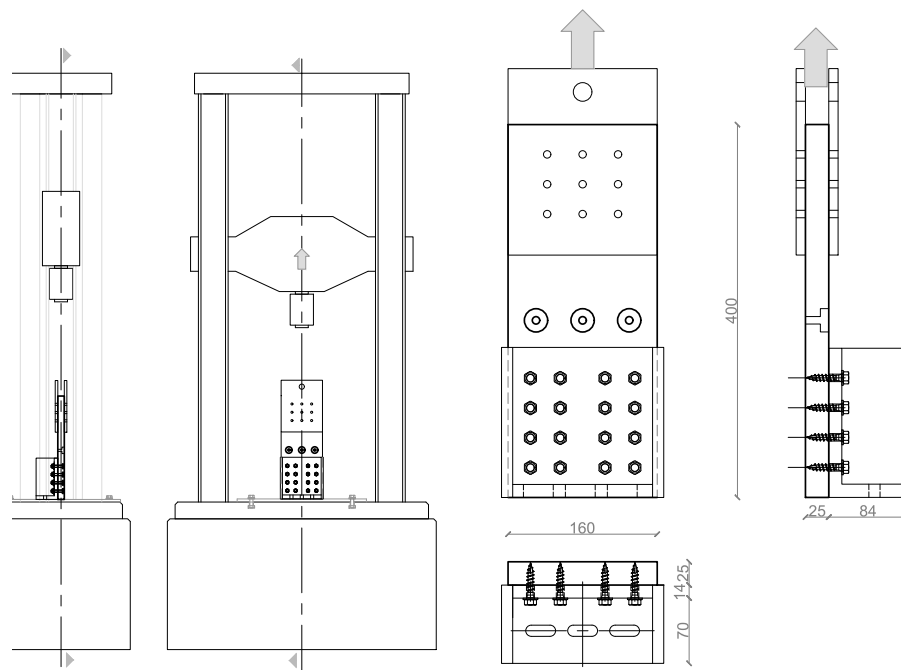


Abbildung 7.7: 22.1-11 / Versuchsaufbau 2 Anschlussversuch Pfosten / Eckversteifung

### 7.4.4. Ergebnisse

#### Variante 1 - Holzschrauben (8x40 mm)

Prüfkörper (a) und (b) werden mit dem ersten Versuchsaufbau geprüft. Die Exzentrizität zwischen Zugkraft und Schraubverbindung mit dem Prüfstand resultiert in einem Biegemoment. Das Stahlprofil verformt sich aufgrund seiner vergleichsweise geringen Steifigkeit sehr stark, genauso wie der schmale Holzprüfkörper. Es kommt zum Biegeversagen des Holzprüfkörpers, bevor die maximale Tragfähigkeit des Anschlusses erreicht ist (vgl. Abb. 7.8).

Bei Prüfkörper (c) ist ein anfängliches Blockscherversagen im Bereich des zu prüfenden Schraubanschlusses infolge großer Scherverformungen der Schrauben zu erkennen (vgl. Abb.7.9).

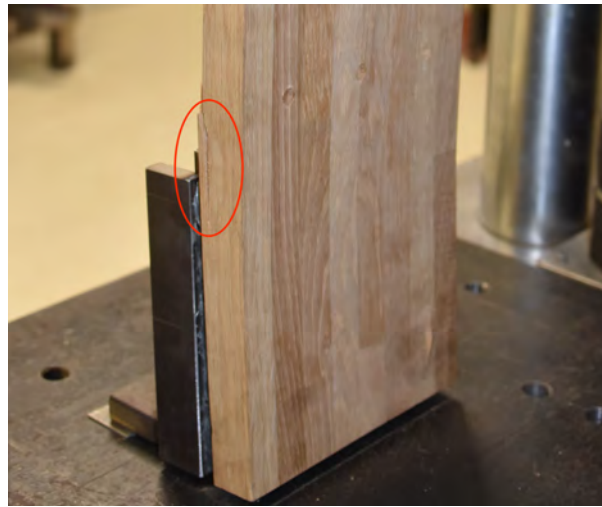


Abbildung 7.8: 22.1-11b / Prüfkörper (b) nach Versuch



Abbildung 7.9: 22.1-11c / Prüfkörper (c) nach Versuch

Die Ergebnisse des Schubversuchs von Variante 1 sind in Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11 dargestellt. Die geringere Steifigkeit des Anschlusses in Versuchsaufbau 1 zeigt sich auch hier, da die Kurven (a) und (b) eine geringere Steigung aufweisen, als Kurve (c). Bei gleichem Weg wird mit Versuchsaufbau 1 eine geringere Kraft erzielt. Die maximale Bruchkraft  $F_{\max,1}$  beträgt 82,8 kN und wird bei Prüfkörper (c) erreicht. Der Mittelwert der Bruchkraft  $F_{\text{mittel},1}$  für Variante 1 „Holzschrauben“ beträgt 65,6 kN. Die minimale Bruchkraft in Variante 1 beträgt  $F_{\min,1} = 48,5$  kN (Prüfkörper (a)). Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist aufgrund der verschiedenen Versuchsaufbauten jedoch kritisch zu hinterfragen.

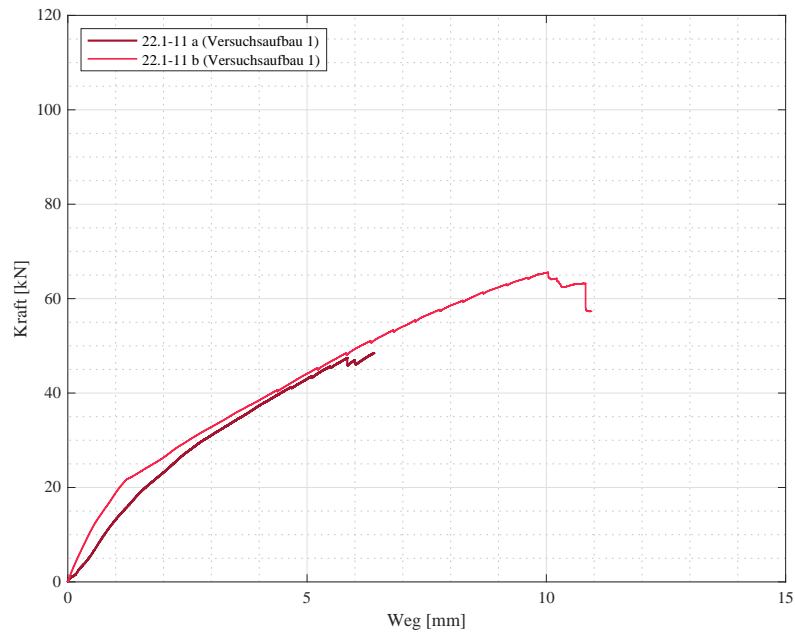


Abbildung 7.10: 22.1-11 / Schubversuch Variante 1 Holzschrauben, Versuchsaufbau 1

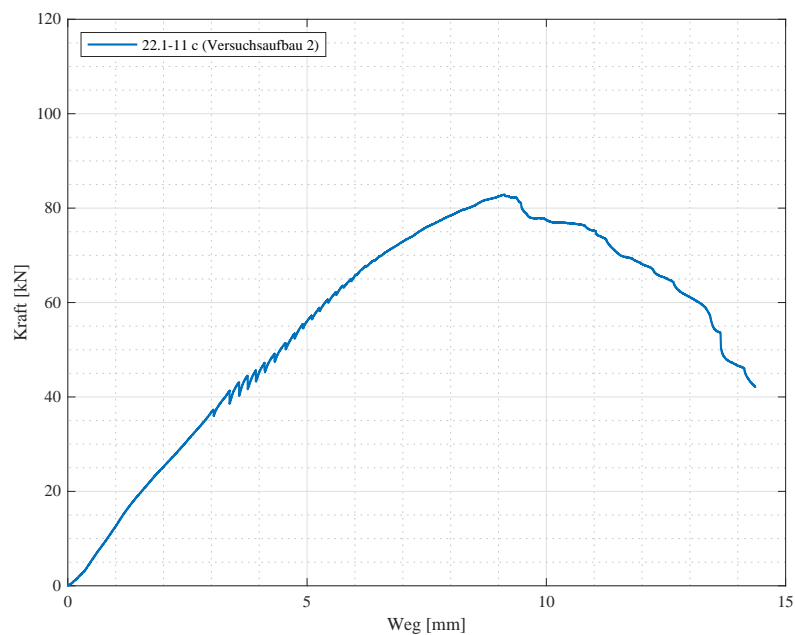


Abbildung 7.11: 22.1-11 / Schubversuch Variante 1 Holzschrauben, Versuchsaufbau 2

### Variante 2 - Gewindehülsen (M8x50 8.8)

Die Versuche der Variante 2 werden mit dem optimierten Versuchsaufbau 2 durchgeführt. Alle Prüfkörper der Variante 2 versagen am oberen Anschluss, welcher der Einleitung der Kraft aus der Prüfmaschine dient. Bei Prüfkörper (a) und (b) kommt es zum Zugversagen des Holzes im Bereich der oberen Bohrungen für die Klemmen der Prüfmaschine (vgl. Abb. 7.12). Hier ist die Reibung zur Kraftübertragung nicht ausreichend, sodass die Zugkraft unplanmäßig über die Verbindungsmittel eingeleitet wird. Die untere, eigentlich geprüfte, Schraubverbindung bleibt bei beiden Prüfkörpern unbeschädigt. Bei Prüfkörper (c) ist zusätzlich eine Aufspaltung des Holzes entlang der Verbindungsmittelreihen im unteren Anschluss erkennbar (vgl. Abb.7.13).



Abbildung 7.12: 22.2-11b / Prüfkörper (b) nach Versuch



Abbildung 7.13: 22.2-11c / Prüfkörper (c) nach Versuch

Abbildung 7.14 fasst die Ergebnisse der Versuche mit der Variante 2 im Kraft-Weg-Diagramm zusammen. Hier beträgt die maximale Bruchkraft  $F_{\max,2} = 96,2 \text{ kN}$  für Prüfkörper a. Die geringste Bruchkraft  $F_{\min,2}$  wird bei Prüfkörper (b) erreicht und beträgt  $91,2 \text{ kN}$ . Die Ergebnisse der drei Prüfkörper weisen jedoch einen ähnlichen Verlauf auf und sind deutlich weniger gestreut als die Ergebnisse der Variante 1. So beträgt der Mittelwert der Bruchkraft  $F_{\text{mittel},2} = 93,6 \text{ kN}$ , von dem die Ergebnisse der drei Prüfkörper mit einer Standardabweichung von  $2,4 \text{ kN}$  abweichen.

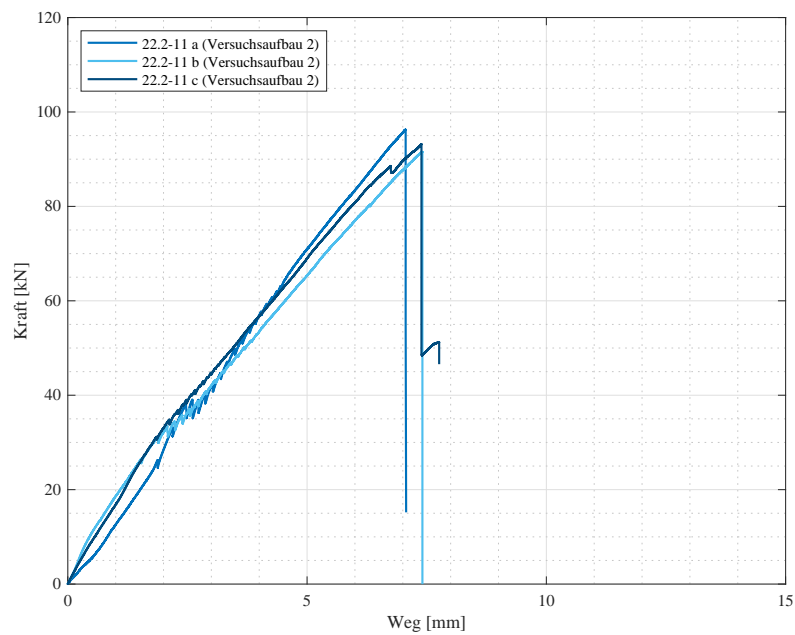


Abbildung 7.14: 22.2-11 / Schubversuch Variante 2 Gewindehülsen, Versuchsaufbau 2

### Variante 3 - Bolzen und Muttern (M8x50 10.9)

Wie bereits unter Kapitel 7.4.2 erwähnt, wird Prüfkörper (a) mit Versuchsaufbau 1 geprüft. Hierbei versagt die Schraubverbindung zwischen der Fußplatte und dem Prüfstand (vgl. Abbildung 7.15), aus der das Gewinde gelöst ist. Anschließend wird der Versuchsaufbau optimiert und drei weitere Prüfkörper dieser Variante (b, c und d) mit dem neuen Versuchsaufbau geprüft. Bei Prüfkörper (b) werden sowohl der obere, kraffteinleitende, Anschluss, als auch die untere, zu prüfende, Schraubverbindung beschädigt. Im Bereich des oberen Anschlusses ist zum einen eine Aufspaltung des Holzes im Bereich der oberen Schraubenreihen erkennbar (vgl. Abbildung 7.16). Gleichzeitig kommt es bei der Bruchkraft von 103,5 kN zum Blockscherversagen im Bereich des unteren Anschlusses. Prüfkörper (c) und (d) weisen lediglich Beschädigungen im Bereich des unteren Anschlusses auf. Auch hier kommt es zum Blockscherversagen (vgl. Abbildung 7.17).

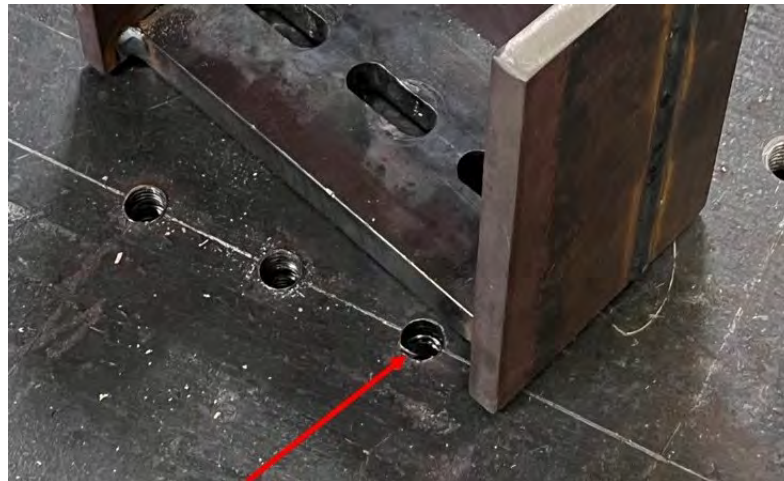


Abbildung 7.15: 22.3-11a / Stahlprofil (a) nach Versuch



Abbildung 7.16: 22.3-11b / Prüfkörper (b) nach Versuch



Abbildung 7.17: 22.3-11d / Prüfkörper (c) nach Versuch

Die Abbildungen 7.18 und 7.19 fassen die Ergebnisse des Schubversuchs von Variante 3 im Kraft-Weg-Diagramm zusammen. Die maximale Bruchkraft  $F_{\max,3}$  beträgt 103,5 kN für Prüfkörper (b). Die geringste Bruchkraft  $F_{\min,3}$  wird bei Prüfkörper (a) erreicht und beträgt 71,3 kN. Da hier jedoch die Verbindung mit dem Prüfstand versagt, entspricht dies nicht der maximalen Tragfähigkeit des Anschlusses in diesem Versuch. Der Mittelwert der Bruchkraft beträgt  $F_{\text{mittel},3} = 87,5$  kN. Die Bruchkräfte weisen jedoch eine große Streuung auf.

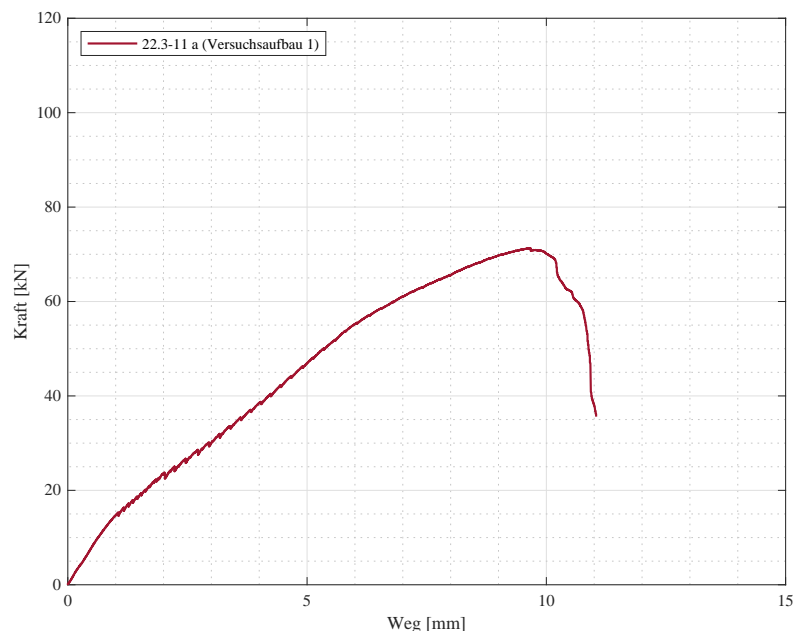


Abbildung 7.18: 22.3-11 / Schubversuch Variante 3 Bolzen und Muttern, Versuchsaufbau 1

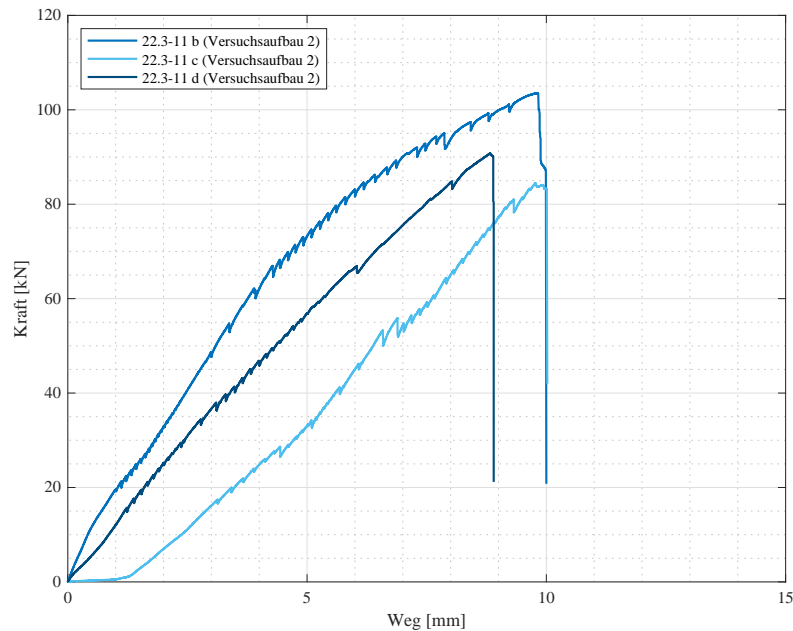


Abbildung 7.19: 22.3-11 / Schubversuch Variante 3 Bolzen und Muttern, Versuchsaufbau 2

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den Versuchen mit Versuchsaufbau 1 ist erkennbar, dass eine lokale Biegung im filigranen Pfosten unbedingt vermieden werden sollte. Da in diesen Versuchen jedoch die Anschlusstragfähigkeit untersucht werden soll, werden in Tabelle 7.1 die Bruchkräfte betrachtet und verglichen. Die zuverlässigsten Ergebnisse liefert Variante 2 „Gewindehülsen“, da hier die geringste Streuung vorliegt. Gleichzeitig wird in diesem Versuch mit  $F_{\text{mittel},2} = 93,6 \text{ kN}$  die größte mittlere Bruchkraft erreicht. Es werden daher Gewindehülsen für die Planung der Riegelversuche und die Großbauteilversuche vorgesehen.

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung Bruchkräfte Anschluss Pfosten-Eckversteifung

		22.1	22.2	22.3
		Holzschrauben	Gewindehülsen	Bolzen und Muttern
$F_{\text{max}}$	[kN]	82,8	96,2	103,5
$F_{\text{min}}$	[kN]	48,5	91,5	71,3
$F_{\text{mittel}}$	[kN]	65,6	93,6	87,5

## 7.5. Experimentelle Untersuchung der Verbindung Riegel / Eckversteifung

### 7.5.1. Versuchsaufbau

Die Verbindung des Riegels mit dem oberen Flansch der Eckversteifung wird im Versuch 22.4 geprüft. In den vorangegangenen Anschlussversuchen für die Verbindung der Eckversteifung mit dem filigranen Pfostenquerschnitt (22.1-22.3) ergibt die Variante mit Gewindehülsen die zuverlässigsten Ergebnisse und die größte mittlere Bruchkraft. Daher wird die Verbindung des Riegels mit der Eckversteifung im Versuch 22.4 nur mit Gewindehülsen geprüft. Hierfür wird der Versuchsaufbau analog zu Kapitel 7.4.2 gewählt (vgl. Abbildung 7.22). Es wird ein Prüfkörper aus Eiche-BSH (1000x60mm) hergestellt, welcher am unteren Ende mit einem geschweißten Stahlwinkel und den zu prüfenden Gewindehülsen M8x50 8.8 verbunden wird. Die vorgesehenen Schrauben- und Randabstände sind im Detail (Abbildung 7.21) zu sehen. Der Winkel wird, wie in den Versuchen 22.1 bis 22.3, auf eine Platte geschweißt, welche mit dem Versuchsstand verschraubt wird. Die Lasteinleitung aus der Prüfmaschine erfolgt über die Klemmung zweier Stahllaschen mit dem Holzprüfkörper. Es werden neun Schrauben am oberen Ende des Prüfkörpers vorgesehen, um die nötige Klemmwirkung zu erreichen. Die Prüfmaschine ist weggesteuert, mit einer maximalen Zugkraft von 200 kN.

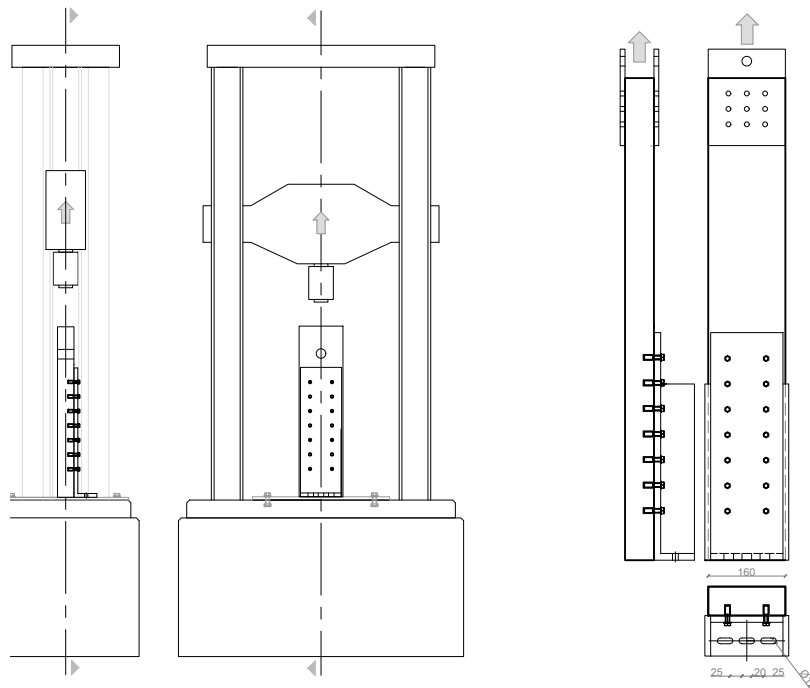


Abbildung 7.20: 22.4-11 / Versuchsaufbau Anschlussversuch Riegel / Eckversteifung

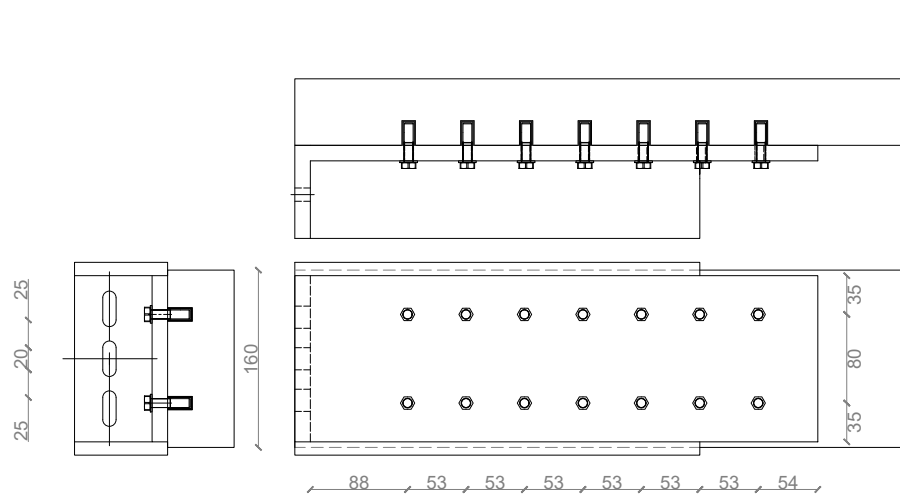


Abbildung 7.21: 22.4-11 / Detail Schraubenbild

### 7.5.2. Ergebnisse

In Abbildung 7.22 sind die Ergebnisse des Schubversuchs für den Anschluss des Riegels an die Eckversteifung als Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Die kleinste Bruchkraft  $F_{\min,4}$  wird bei Prüfkörper (a) erreicht und beträgt 133,09 kN. Hier versagt die Schweißnaht, die das Stahlprofil mit der Fußplatte verbindet. Bei Prüfkörper (b) und (c) wird die maximale Bruchkraft mit  $F_{\max,4} > 190$  kN erreicht, obwohl kein Versagen der Prüfkörper erkennbar ist. Die Versuche werden jedoch bei Überschreitung von 190 kN beendet, da die Prüfmaschine maximal 200 kN aufbringen kann und für den Anschluss im Fassadenmodul nur Scherkräfte kleiner als 200 kN erwartet werden.

Wie im Diagramm erkennbar, liegen die Kurven der drei Prüfkörper bis zum Erreichen der jeweiligen Bruchkraft recht nah bei einander. Lässt man Prüfkörper (a), bei der der Versuchsaufbau versagte (Abb. 7.23) aus der Betrachtung, kann davon ausgegangen werden, dass die Schraubverbindung des Riegels mit der Eckversteifung durch Gewindehülsen großen Scherkräften von mehr als 190 kN standhält.

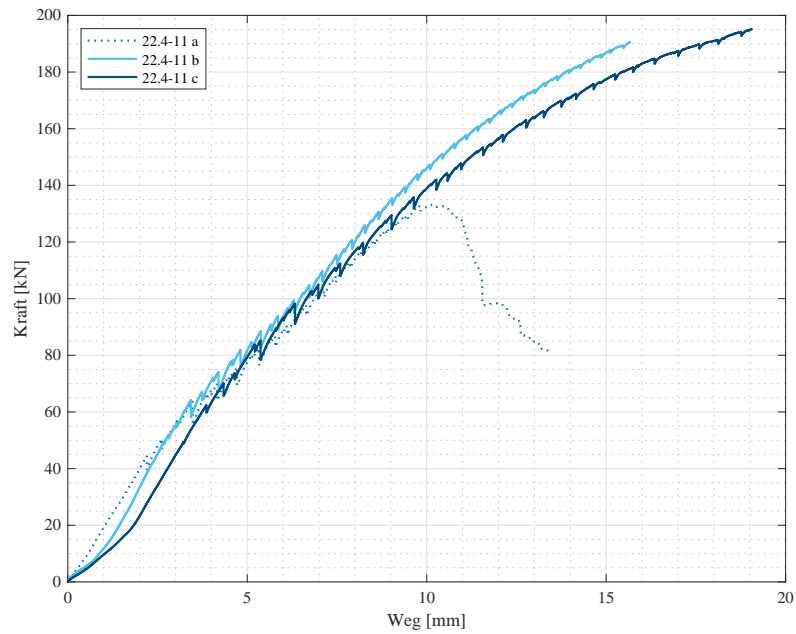


Abbildung 7.22: 22.4-11 / Schubversuch Gewindehülsen



Abbildung 7.23: 22.4-11a / Prüfkörper (a) nach Versuch

## 8. Aufstockungsvariante - Experimentelle Untersuchung der Fassadenelemente

### 8.1. Allgemein

Zur experimentellen Untersuchung werden zwei Großprüfkörper hergestellt, die in ihren Abmessungen ganzen Fassadenelementen entsprechen. Ziel der Versuche ist es, die Tragfähigkeit der gewählten Querschnitte und Bauteilanschlüsse zu prüfen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei zum einen auf der aussteifenden Wirkung der Scheibe und auf dem druckbelasteten Pfosten, welcher aufgrund seiner geringen Abmessungen stabilitätsgefährdet ist. Im Versuch soll geprüft werden, inwieweit die Pfosten durch die Klebeverbindung mit der Scheibe gehalten werden und vor dem Ausknicken geschützt werden können. Bis auf die Holzart und die Breite der Elemente sind die Prüfkörper identisch. Eine Übersicht der Versuche mit den wesentlichen Unterschieden ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Bauteilverbindungen (Holz-Holz, Holz-Glas und Holz-Stahl) werden für beide Prüfkörper gleich vorgesehen.

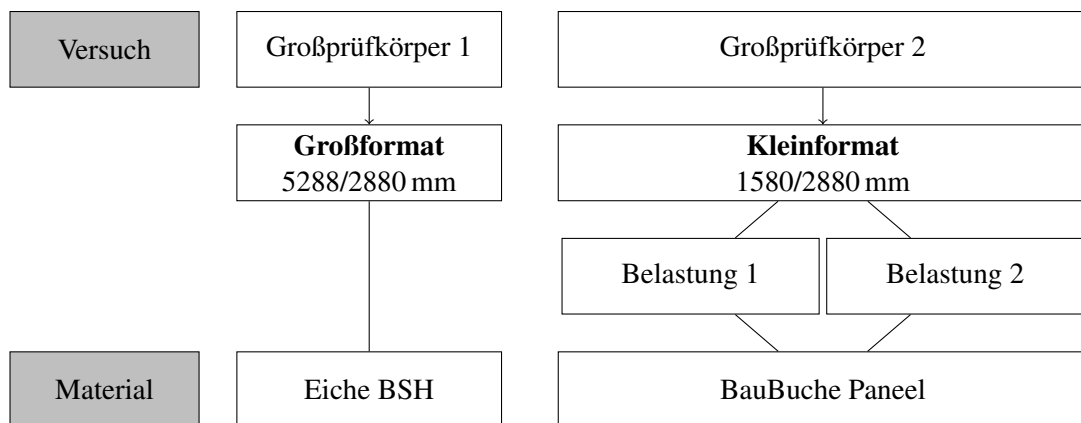


Abbildung 8.1: Gliederung der Großversuche

Um die elementierte Herstellung der Fassade zu gewährleisten, wird die Scheibe im Prüflabor, bzw. bei einer kommerziellen Nutzung im Werk, mit einem Adapterprofil aus GFK verklebt. Dieses wird dann auf der Baustelle mit dem Rahmen aus Laubholz verschraubt. Abbildung 8.2 zeigt einen Ausschnitt der Konstruktion. Das GFK-Profil ist hier in magenta, die Scheibe in cyan dargestellt. Das Adapterprofil zur Verbindung der Scheibe mit dem Pfosten weist bei einer Stärke von 10 mm die gleiche Breite wie der Pfosten auf (25 mm), während das GFK-Profil auf dem Riegel 40 mm breit ist. Die Adapterprofile werden im Abstand von 10 cm mit Senkkopfschrauben M 8 mit dem Pfosten, bzw. Riegel verbunden. Im Versuch wird der 1-K-Polyurethan Klebstoff „Sikaflex268“ der Firma SIKA verwendet, um ein frühzeitiges Versagen der Klebefuge zu vermeiden. Dieser Klebstoff zeichnet sich durch seine besonders hohe Zug- und Scherfestigkeit aus (vgl. [15]). Die Abmessungen der Klebefuge betragen 15/2 mm. Sonstige Bauteilanschlüsse werden wie in Kapitel 7 geplant ausgeführt.

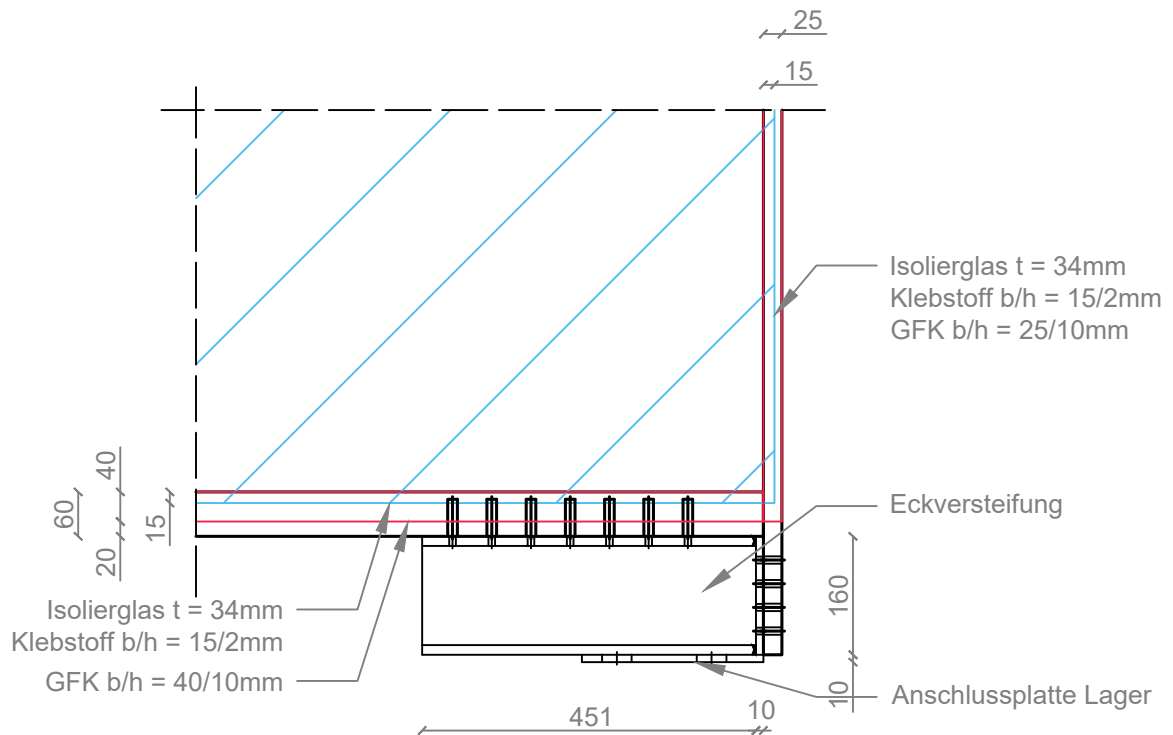


Abbildung 8.2: Auflagerpunkt Fassadenelement

Geprüft wird ein Einfach-Isolierglas, da die statische Tragfähigkeit maßgeblich durch das VSG bestimmt wird. Verklebt wird die Verbundglasscheibe mit dem Adapterprofil. Der geprüfte Glasaufbau besteht aus (Abb. 8.3) :

- 8 mm - ESG Float
- 0.75 mm - PVB
- 8 mm - ESG Float
- 12 mm - Thermo Spacer
- 6 mm - ESG Float

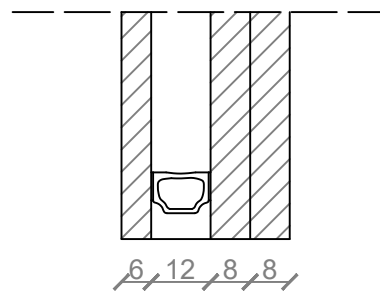


Abbildung 8.3: Glasaufbau

## 8.2. Großprüfkörper 1 - Großformat

### 8.2.1. Versuchsaufbau

Großprüfkörper 1 weist eine Breite von 5,30 m auf. Die Höhe beträgt 2,77 m, was eine lichte Raumhöhe von 2,60 m ermöglicht. Die Pfosten und Riegel des Fassadenelements werden aus Eiche-BSH hergestellt. Die Krafteinleitung erfolgt an der oberen rechten Ecke des Großprüfkörpers. Hier greift der Kolben mit einem Durchmesser von 12 cm am oberen Riegel an. Zur flächigen Krafteinleitung in den oberen Riegel wird ein steifer Stahlblock zwischen Kolben und Fassadenelement vorgesehen. Der obere Riegel ist kontinuierlich in x-Richtung verschieblich gelagert. Hierfür liegt er auf einem Stahlwinkel auf, welcher in drei Punkten auf Stahlprofilen IPE 180 aufliegt, die mit dem Boden verbunden sind. Gleichzeitig ist der Riegel auf dem Winkelprofil in y-Richtung unverschieblich gelagert, da in der Bauanwendung eine kontinuierliche Lagerung durch die Dachscheibe gegeben ist. Um zu verhindern, dass sich das Fassadenelement senkrecht zur Glasebene nach oben bewegt, werden weitere Winkelprofile im Abstand von 0,5 m mit dem kontinuierlichen Winkel verschraubt (vgl. Abbildung 8.5).

Am unteren Ende des Fassadenelements werden ein in x-Richtung verschiebliches Lager (links) und ein unverschiebliches Lager (rechts) vorgesehen. Hierdurch werden Zwangslängskräfte zwischen dem Fassadenelement und der Bodenscheibe vermieden. Diese bestehen aus Stahlprofilen HEB 160, bzw. HEB 200 und sind im Anhang A dargestellt. Die Auflager werden mit vier Schrauben M 20 gelenkig mit der Eckversteifung verbunden.

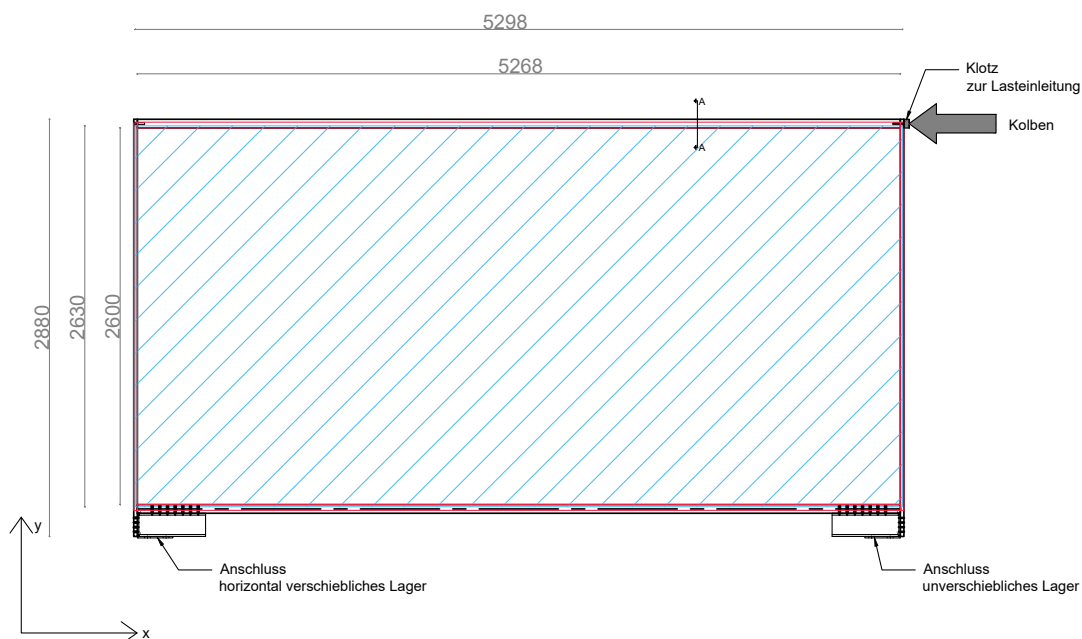


Abbildung 8.4: Großprüfkörper 1 (Großformat)

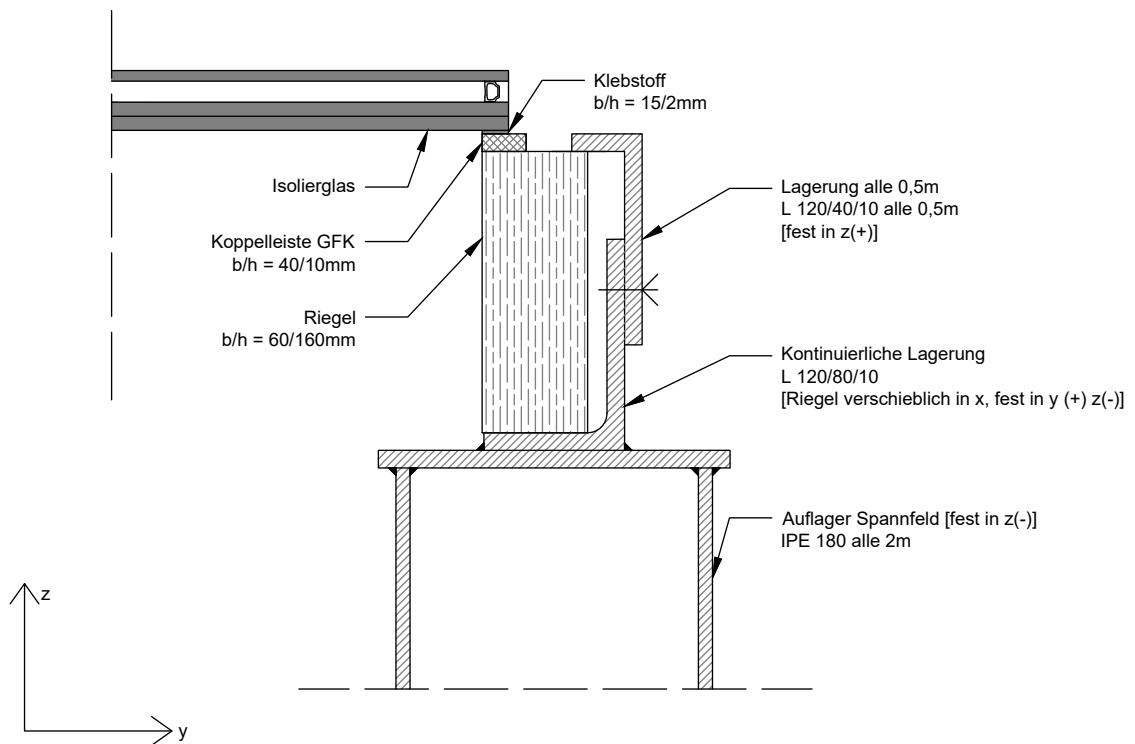


Abbildung 8.5: Großprüfkörper 1 (Großformat), Schnitt A-A

Der Versuchsaufbau im Spannfeld der HCU ist in Abbildung 8.6 dargestellt. Dabei ist links im Bild die Lagerung des oberen Riegels auf den Stahlwinkeln zu erkennen. Rechts ist das verschiebliche Auflager zu sehen. Vorne im Bild sind die Befestigung der Wegaufnehmer am Pfosten ersichtlich.

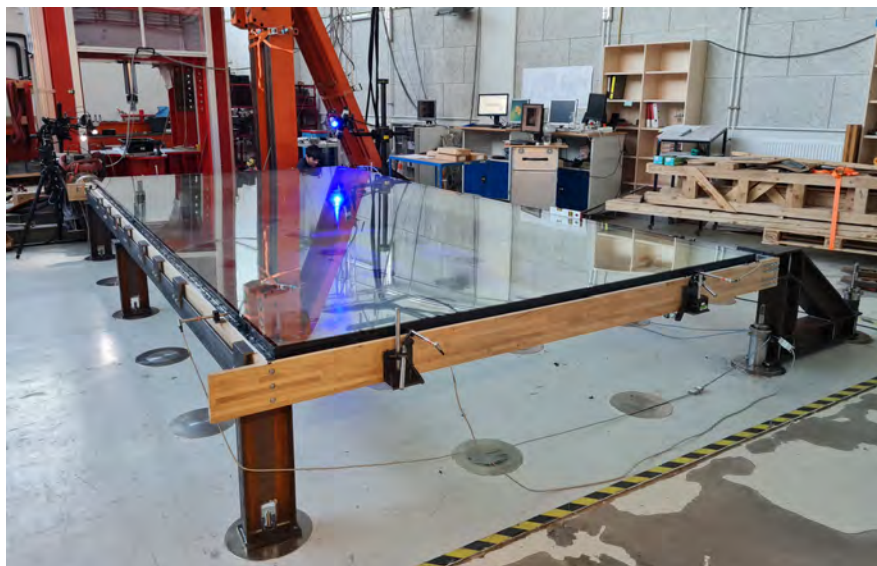


Abbildung 8.6: Großprüfkörper 1 / Versuchsaufbau im Spannfeld

Der Versuch wird weggesteuert durchgeführt, mit einer konstanten Änderung des Kolbenwegs von 5 mm/min. Zur Messung der Verformungen werden Wegaufnehmer im Abstand von 500 mm von der Außenecke der Glasscheibe am Holzrahmen angebracht, die die Verformungen der mittleren Glasscheibe in der Klebefuge messen. Die Positionierung der Wegaufnehmer ist Abbildung 8.7 zu entnehmen. Hierbei beschreibt die Bezeichnung der Wegaufnehmer, getrennt durch den Bindestrich, zunächst die Wegaufnehmerlänge und dann die Wegaufnehmernummer. Darüber hinaus wird das 3D-Kamerasystem *GOM Aramis* zur punktbasierten dreidimensionalen Messung von Verformungen und Dehnungen angewendet. Es werden zwei Kamerasysteme positioniert (Abb. 8.7):

- GOM Aramis System 5M - am Lasteinleitungspunkt
- GOM Aramis System 6M - am unverschieblichen Auflager

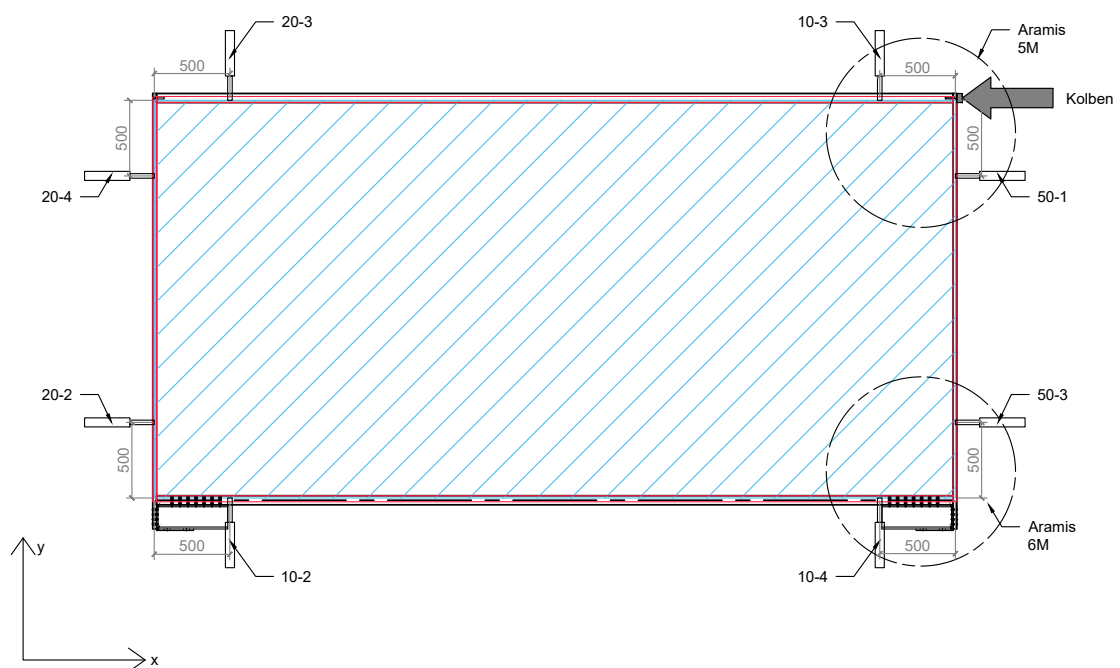


Abbildung 8.7: Positionierung der Wegaufnehmer und Kamerasysteme Großprüfkörper 1

In diesen Bereichen wird auf allen Komponenten des Fassadenelements ein stochastisches Muster aus kontrastreichen Messpunkten geklebt, das *Aramis* in einzelne Pixel unterteilt. An diesen Punkten können später mit der Analysesoftware *Aramis Professional Live* Verformungen und Dehnungen ermittelt werden. Die Frequenz der Messung wird mit 1 Hz festgelegt, sodass Bildfrequenz und Kolbenweg korrelieren. Die gemessene Kraft kann später in der Analysesoftware eingefügt und in einem Kraft-Zeit-Diagramm über den Bildindex aufgetragen werden. So können sich später direkte Bezüge zwischen gemessenen Verformungen und der jeweiligen Kraft herstellen lassen. Zum Vergleich der gemessenen Verformung/Kraft am Kolben und der erfassten Verformungen mit *Aramis* werden zusätzliche Messpunkte auf dem Kolben vorgesehen.

### 8.2.2. Ergebnisse

Großprüfkörper 1 erreicht eine Aussteifungslast von  $F_{\max} = 154 \text{ kN}$ , bei einer horizontalen Verschiebung des oberen Riegels von 28 mm. Bei dieser Kraft versagt der Anschluss des unteren Riegels an die Eckversteifung am unverschieblichen Auflager (Abb. 8.15). Infolgedessen lagern sich die Spannungen im System um und es kommt nur wenig später zum Bruch der Glasscheibe ( $F_{\text{Glas}} = 148 \text{ kN}$ ) und damit zum Komplettversagen des Fassadenelements.

Zunächst wird die obere Ecke (5M) betrachtet, an der die Krafteinleitung der Aussteifungslast erfolgt. In Abbildung 8.8 ist die horizontale Verschiebung von Riegel und Pfosten am Lasteinleitungspunkt im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Die beiden wesentlichen Kräfte  $F_{\max}$  und  $F_{\text{Glas}}$ , sowie die zugehörigen Verformungen zum Bruchzeitpunkt sind dort rot markiert.

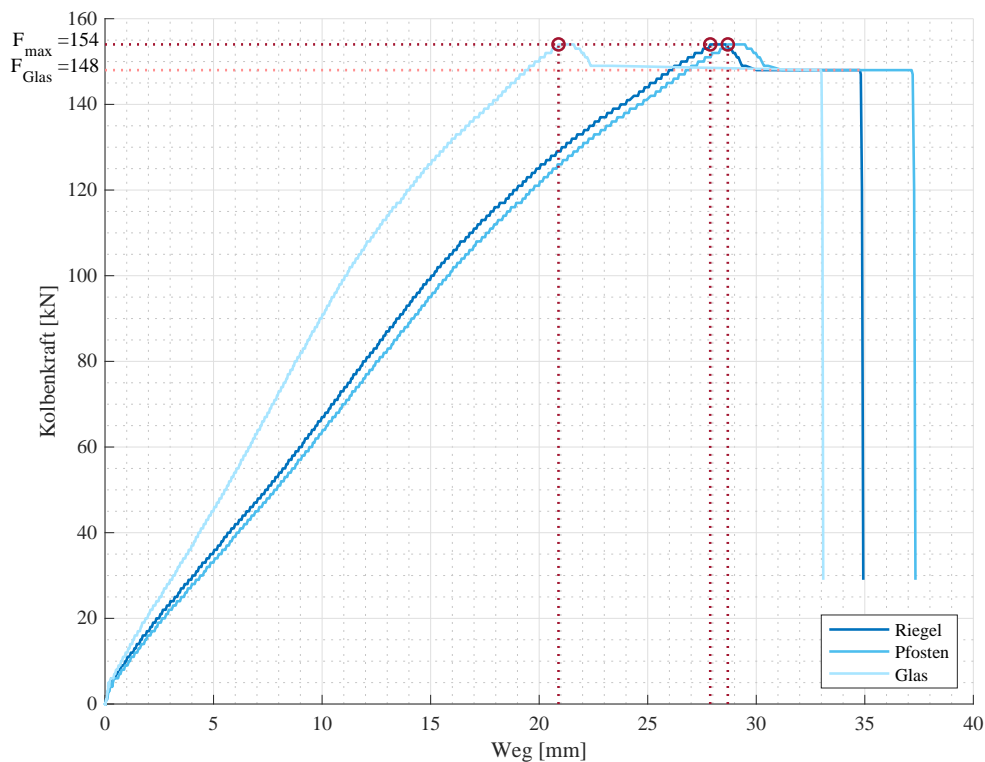


Abbildung 8.8: Großprüfkörper 1 / Verschiebung in x-Richtung am Lasteinleitungspunkt (5M)

Bis zum Versagen des unverschieblichen Auflagers ( $F_{\max}$ ) treten hauptsächlich horizontale Verschiebungen des Fassadenelements in x-Richtung auf. Anschließend wächst die vertikale Komponente in y-Richtung deutlich schneller an, bis es zum Glasbruch kommt. Infolgedessen löst sich die Verklebung der Scheibe in den Ecken und die Ecken bewegen sich nach oben. Die Vektorkomponenten der Verformung vor und nach dem Glasbruch an der Ecke der Lasteinleitung sind in Abbildung 8.9 dargestellt.

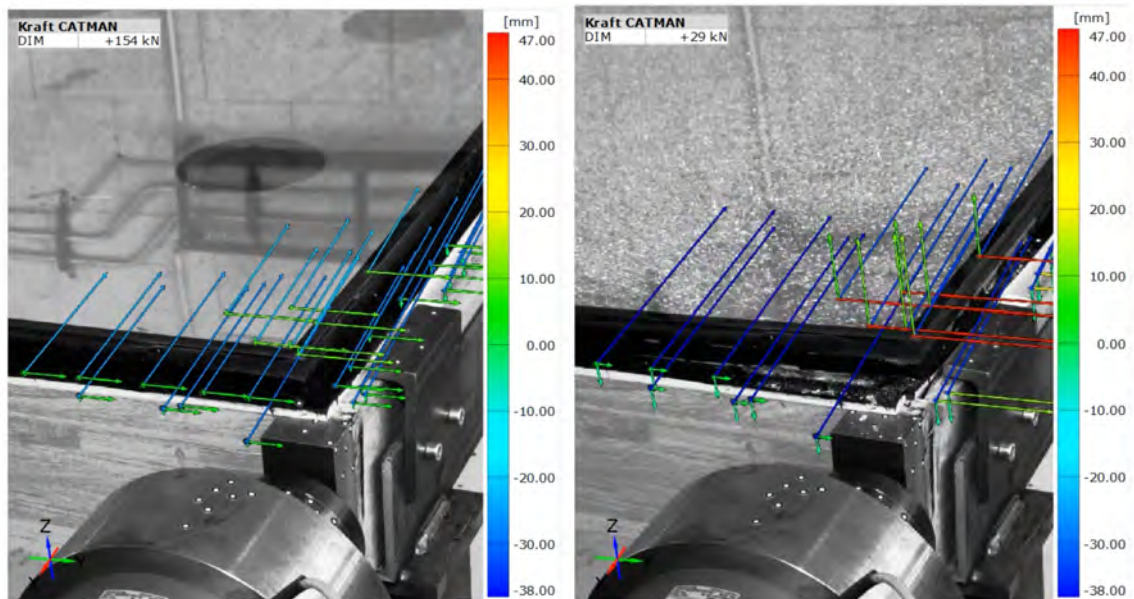


Abbildung 8.9: Großprüfkörper 1 / Verschiebung vektoruell absolut, bezogen auf die Ausgangsform (links: vor dem Bruch, rechts: nach dem Bruch)

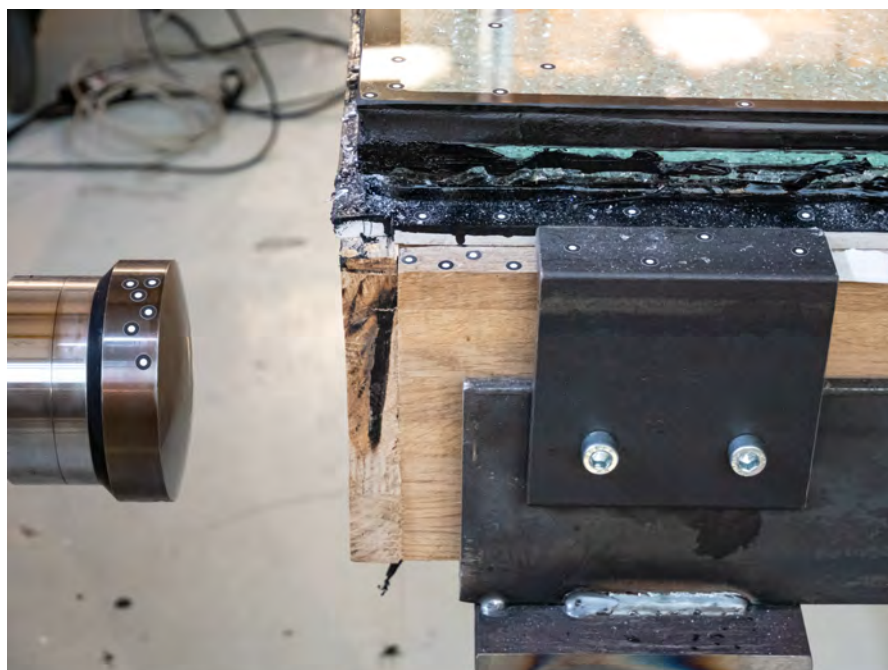


Abbildung 8.10: Großprüfkörper 1 / Ecke Lasteinleitung nach dem Bruch

An der Kamera am unverschieblichen Auflager (6M) ist ein ähnliches Verformungsverhalten erkennbar. Die wesentlichen Verformungen erfolgen in  $x$ -Richtung. Bereits kurz vor dem Versagen des Auflageranschlusses wächst die Verschiebungskomponente in  $y$ -Richtung schneller an (Abb. 8.12). Abbildung 8.11 zeigt die horizontalen Verschiebungen von Pfosten, Riegel und Eckversteifung am unverschieblichen Auflager im Kraft-Weg-Diagramm. Die maximale Kraft  $F_{\max}$  mit den zugehörigen Verformungen und die Glasbruchkraft  $F_{\text{Glas}}$  sind auch hier rot markiert. Bei allen drei Bauteilen, geht die Verformung in  $x$ -Richtung zwischen Erreichen der maximalen Kraft und der Glasbruchkraft zurück. Ferner wird im Kraft-Weg-Diagramm die unterschiedliche Steifigkeit von Riegel und Eckversteifung ersichtlich.

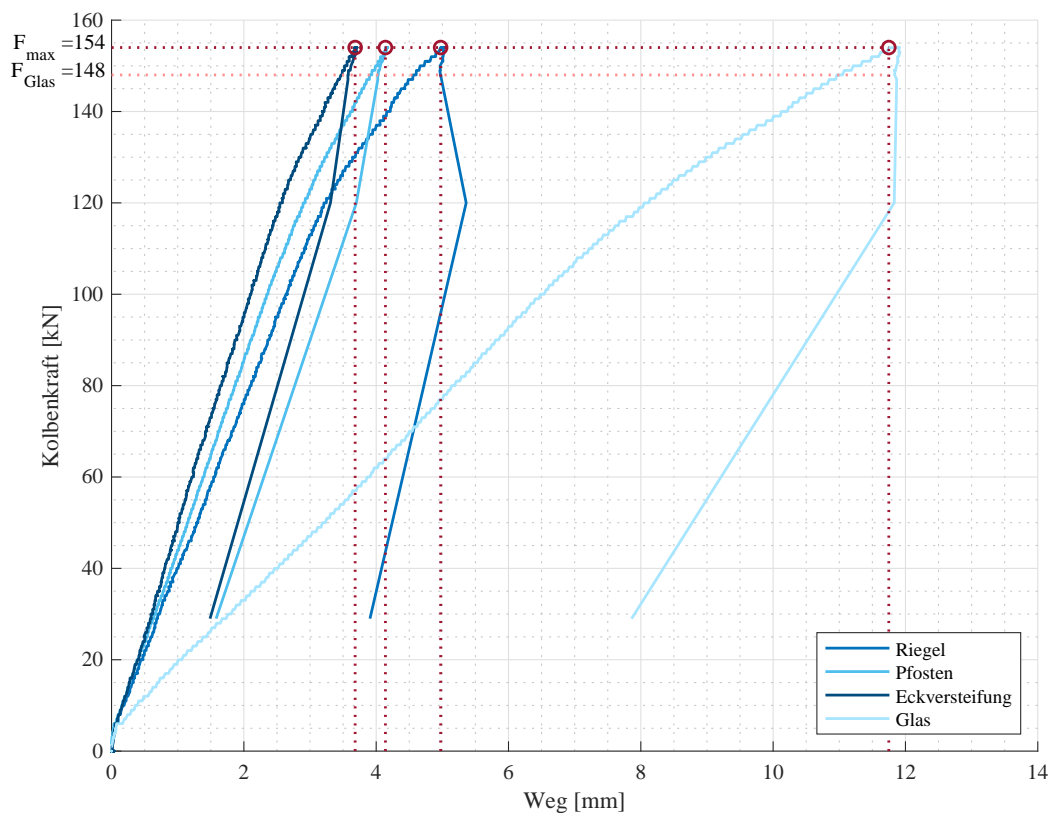


Abbildung 8.11: Großprüfkörper 1 / Verschiebung in  $x$ -Richtung am unverschieblichen Auflager (6M)

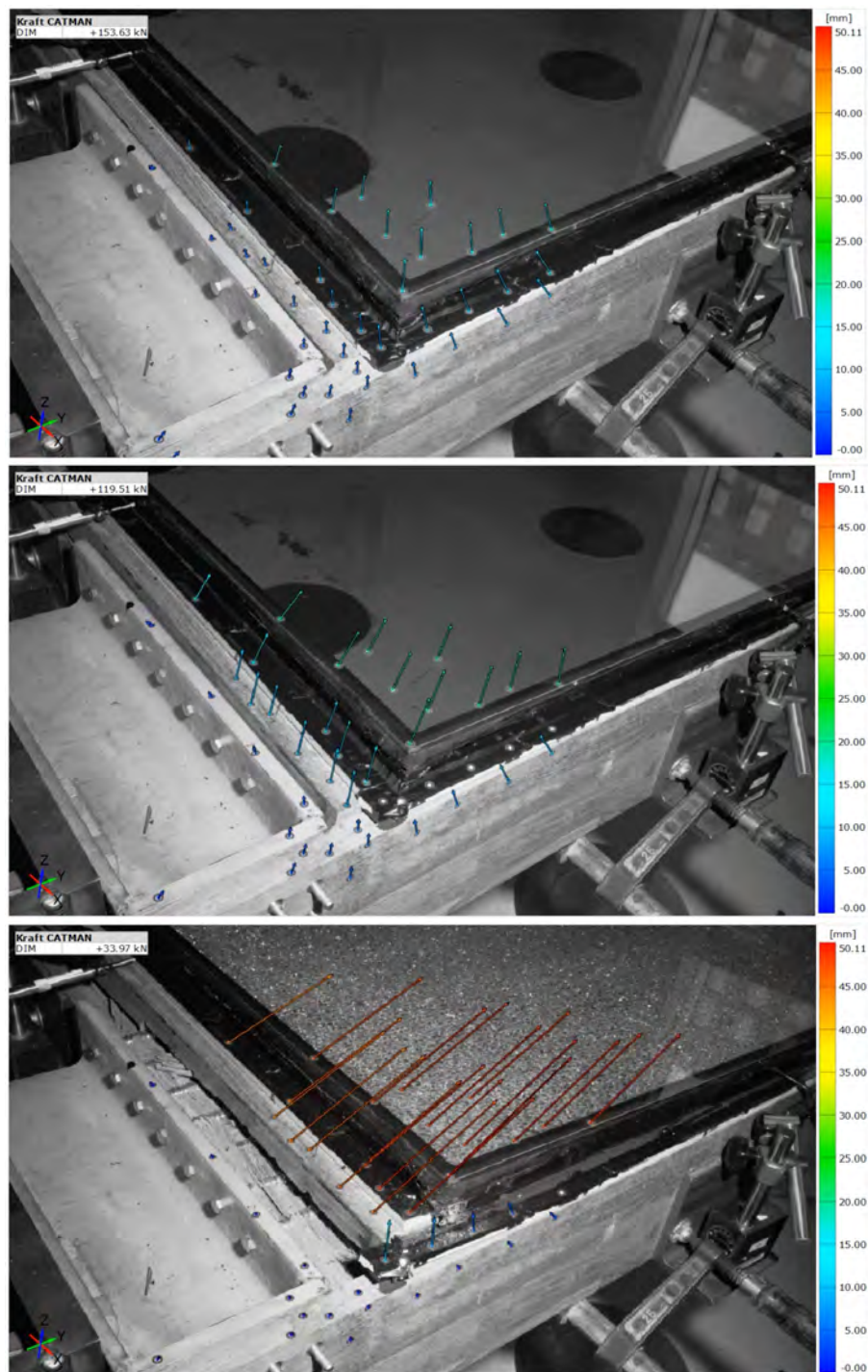


Abbildung 8.12: Großprüfkörper 1 / Resultierende Verformung am unverschieblichen Auflager  
 (Oben: maximale Aussteifungslast, Mitte: Sichtbares Aufspalten des Riegels, Un-  
 ten: Nach dem Glasbruch)

Im Versuch ist zunächst zu erkennen, dass sich infolge der Verschiebung in x-Richtung bei etwa 120 kN eine Schraube aus dem GFK-Adapterprofil löst, welches die Glasscheibe mit dem Pfosten verbindet (Abbildung 8.13). Dies könnte eine Umlagerung der Spannungen in vertikale (y) Richtung und damit auch die zunehmende Verformung in y-Richtung zur Folge haben.

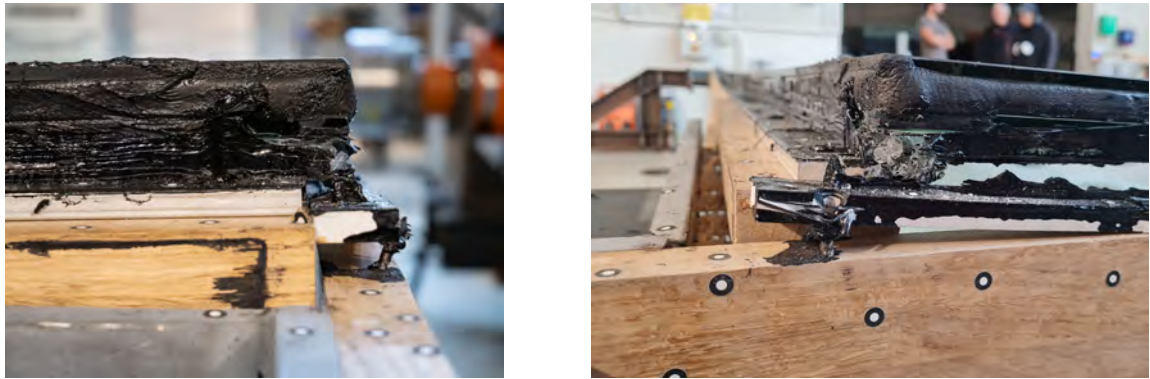


Abbildung 8.13: Ausgerissene GFK-Schraube nach dem Bruch

Letztendlich versagt Großprüfkörper 1 jedoch spröde infolge Aufspalten des Riegels am unverschieblichen Auflager (Abb. 8.15).

Die deutlich größere Verschiebung des Riegels gegenüber der Eckversteifung führt zu einer Verformung der Schrauben in der Scherfuge oder zu einem Abscheren der Schraube im Holz. Letzteres birgt aufgrund der vielen hintereinanderliegenden Schrauben in Faserrichtung bereits eine Gefahr des Aufspaltens.

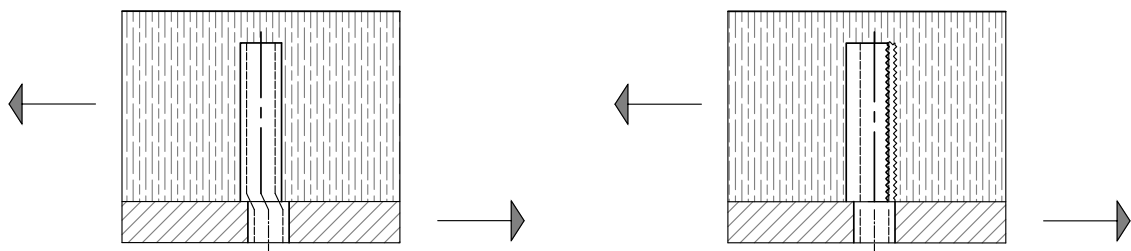


Abbildung 8.14: Großprüfkörper 1 / Auswirkungen der Differenzverformung zwischen Holz und Stahl - links: Verformung der Schrauben in der Scherfuge, rechts: Abscheren der Schraube im Holz



Abbildung 8.15: Großprüfkörper 1 / Unverschiebliches Lager nach dem Bruch

Für weitere statische Betrachtungen des Fassadenelements, im Hinblick auf die aussteifende Wirkung der Glasscheibe und ein mögliches Stabilitätsversagen des filigranen Pfostens, sind aus diesem Versuch die auf die statische

su  
pa  
de  
sc  
ge  
G:

eil  
uf  
ti-  
au  
lie

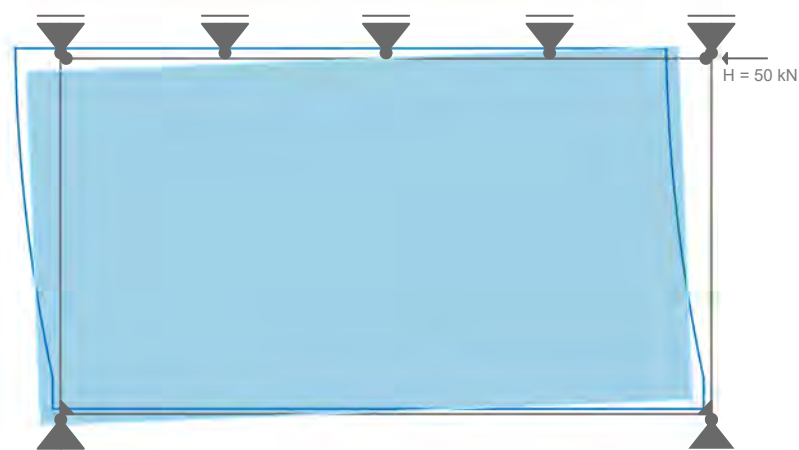


Abbildung 8.16: Großprüfkörper 1 / Relative Verformung der Glasscheibe über dem Holzrahmen  
H = 50 kN (50-fach überhöht dargestellt)

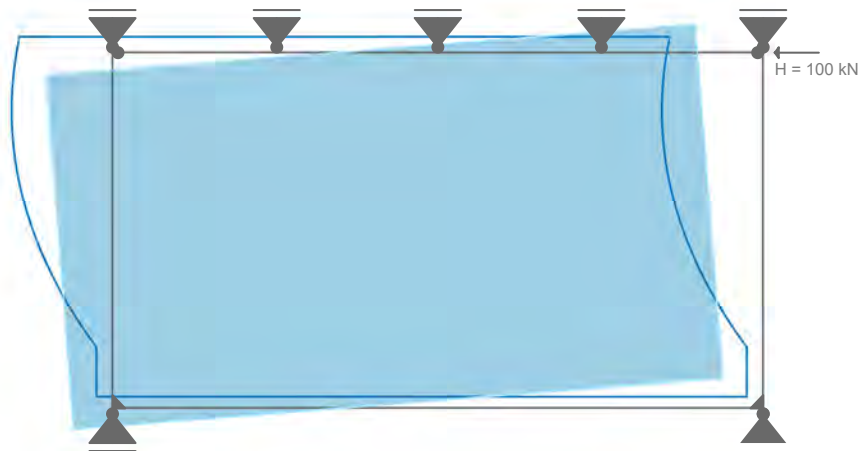


Abbildung 8.17: Großprüfkörper 1 / Relative Verformung der Glasscheibe über dem Holzrahmen  
 $H = 100 \text{ kN}$  (50-fach überhöht dargestellt)

Die Verformungen der Klebefugen sind in den nachfolgenden Abbildungen 8.18 bis 8.21 am unverschieblichen Auflager (6M) und am Lasteinleitungspunkt (5M) in Kraft-Weg-Diagrammen dargestellt. Die Schubverformungen werden mit *Aramis Professional Live* aus der Längenänderung des Abstands zwischen GFK und Glas ermittelt und in die Vektoren „senkrecht“ und „parallel“ aufgeteilt. Die „Gesamtschubverformung“ wird als Resultierende der beiden Vektorkomponenten ermittelt. Aus den Abbildungen 8.19 und 8.18 ist ersichtlich, dass die Schubverformungen der Klebefuge zwischen Riegel und Glas am unverschieblichen Auflager und am Lasteinleitungspunkt sehr ähnlich verlaufen. Die maximale Gesamtschubverformung bei Erreichen der maximalen Kraft  $F_{\max} = 154 \text{ kN}$  beträgt etwa 7,1 mm. Den wesentlichen Anteil liefert hierbei die Schubverformung parallel zum Riegel, welche annähernd linear zunimmt, bis zu einer maximalen Verformung von 5,2 mm (5M) bzw. 4,6 mm (6M).

Die Schubverformungen der Klebefuge zwischen Pfosten und Glasscheibe (Abb. 8.21 und Abb. 8.20) weisen parallel zum Pfosten ebenfalls einen ähnlichen Verlauf auf, mit einer maximalen Schubverformung parallel zum Pfosten von etwa 4,8 mm. Die Schubverformung senkrecht zum Pfosten unterscheidet sich jedoch stark zwischen dem Lasteinleitungspunkt (5M: 5,0 mm) und dem unverschieblichen Auflager (6M: 1,3 mm). Entsprechend unterscheidet sich auch die Gesamtschubverformung. Diese beträgt am Lasteinleitungspunkt maximal 6,8 mm und am unverschieblichen Auflager nur 5,3 mm. Die maximal zulässige Schubverformung des Klebstoffes gemäß Herstellerangaben [15] beträgt 7,94 mm und wird in diesem Versuch nicht überschritten. Das Versagen des Riegels tritt vor dem Versagen der Klebefuge auf.

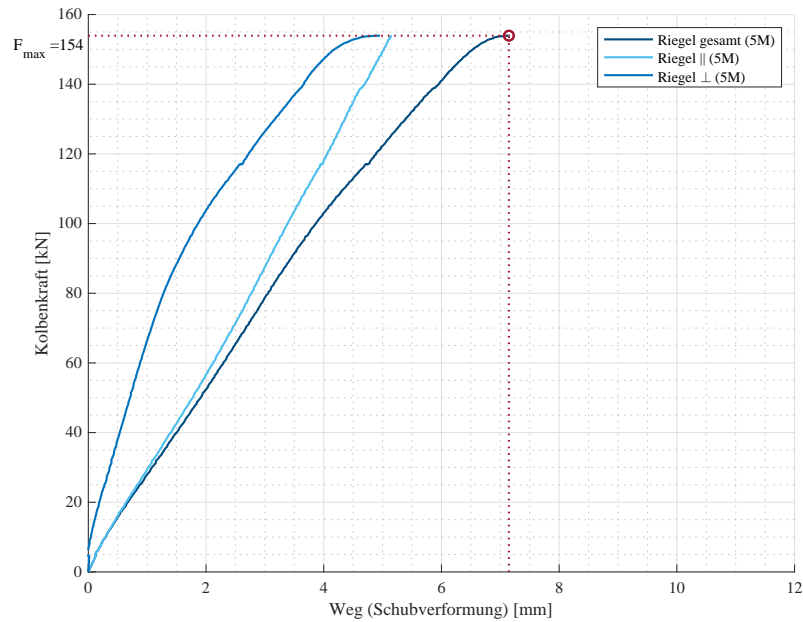


Abbildung 8.18: Großprüfkörper 1 / Schubverformung Klebefuge Riegel (5M)

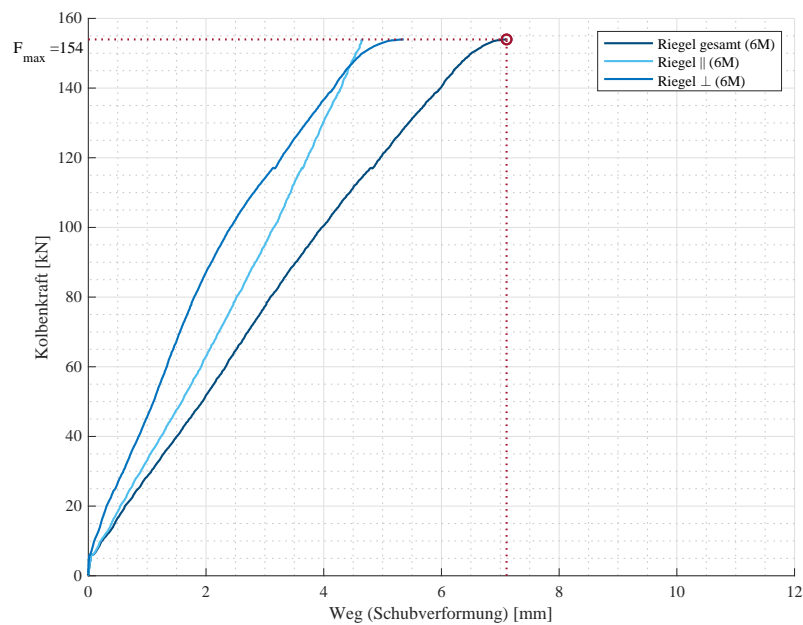


Abbildung 8.19: Großprüfkörper 1 / Schubverformung Klebefuge Riegel (6M)

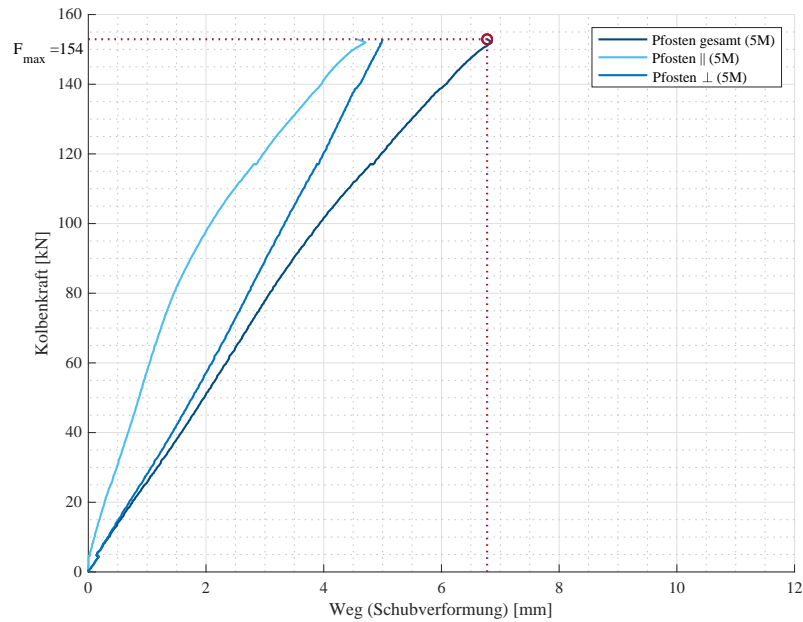


Abbildung 8.20: Großprüfkörper 1 / Schubverformung Klebefuge Pfosten (5M)

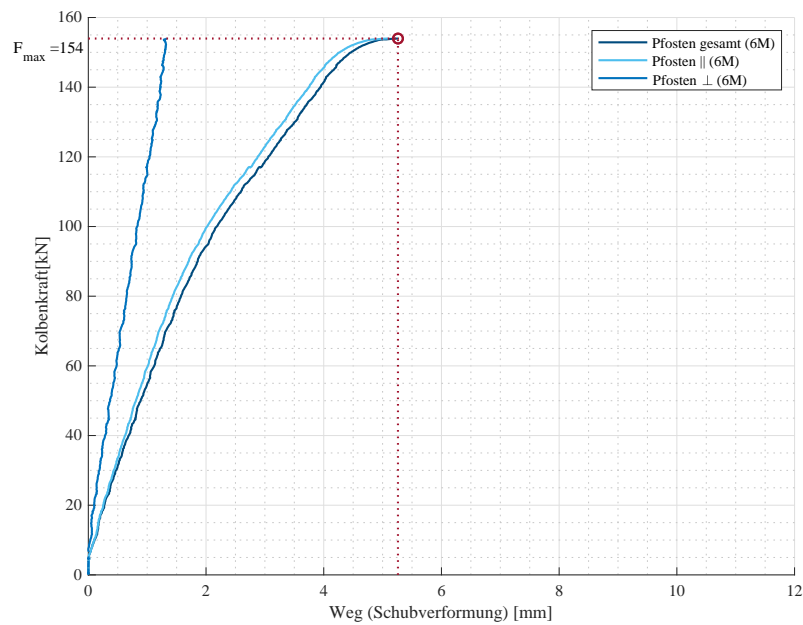


Abbildung 8.21: Großprüfkörper 1 / Schubverformung Klebefuge Pfosten (6M)

### 8.3. Großprüfkörper 2 - Kleinformat

#### 8.3.1. Versuchsaufbau 1

Der zweite Versuchskörper stellt die schmalere Variante der Holz-Glas-Fassadenelemente für die Nutzung als Aufstockung im Bürobau dar. Die Breite des Prüfkörpers beträgt 1,58 m. Pfosten und Riegel werden aus BauBuche gefertigt. Die Querschnitte betragen analog zum Großformat  $b/h = 25/160$  mm (Pfosten) und  $60/160$  mm (Riegel). Abbildung 8.22 zeigt den Versuchsaufbau. Die Krafteinleitung erfolgt wie bei Großprüfkörper 1 an der oberen rechten Ecke des Prüfkörpers. Zwischen Kolben und Fassadenelement wird ein steifer Stahlblock vorgesehen, welcher die flächige Einleitung der Kraft sicherstellen soll.

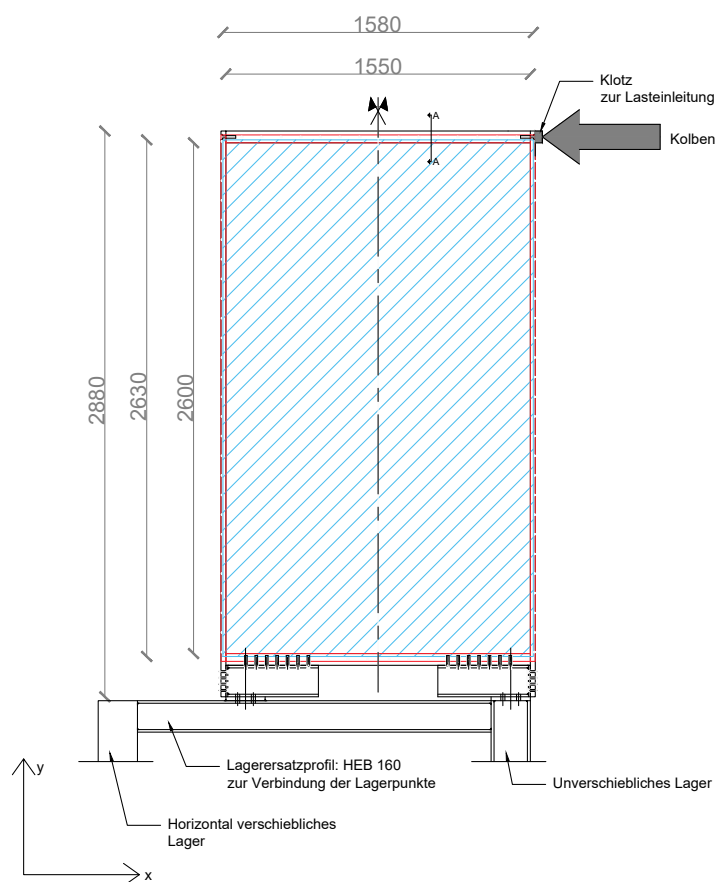


Abbildung 8.22: Großprüfkörper 2 (Kleinformat)

Der obere Riegel ist kontinuierlich in x-Richtung verschieblich gelagert. Hierfür liegt er auf einem Stahlwinkel auf, welcher in drei Punkten auf Stahlprofilen IPE 180 aufliegt, die mit dem Boden verbunden sind. Gleichzeitig ist der Riegel auf dem Winkelprofil in y-Richtung unverschieblich gelagert, da in der Bauanwendung eine kontinuierliche Lagerung durch die Dachscheibe gegeben ist. Um zu verhindern, dass sich das Fassadenelement senkrecht zur Glasebene nach oben bewegt, werden weitere Winkelprofile im Abstand von 0,5 m mit dem kontinuierlichen Winkel verschraubt (vgl. Abb. 8.23).

Die Fußpunkte des Fassadenelements sollen mit den gleichen Lagern verbunden werden, die bereits für Großprüfkörper 1 verwendet werden. Da das Spannfeld ein Raster von 1x1 m aufweist, müssen die Lagerblöcke im Abstand von 2 m positioniert werden. Der rechte (unverschiebliche) Fußpunkt des Prüfkörpers wird mit einer Schraubverbindung direkt mit dem Lagerblock verbunden. Da die Breite des Prüfkörpers geringer als der Abstand der Lagerblöcke ist, muss zur Lagerung des linken (horizontal verschieblichen) Fußpunkts eine Hilfskonstruktion vorgesehen werden. Hierfür wird ein Stahlprofil HEB 160 gewählt, welches die beiden Lagerblöcke verbindet. Dieses wird seitlich an die Lager geschweißt. Es wird angenommen, dass dieses Profil für die erwartete Bruchlast als steif betrachtet werden kann und nur minimale Verformungen aufweist. Zur Verbindung des linken Fußpunkts mit dem Stahlträger wird an der Position der Eckversteifung eine Kopfplatte ( $t=20\text{ mm}$ ) an den oberen Flansch geschweißt. Eckversteifung und Kopfplatte werden dann mit vier Schrauben M 20 mit einander verbunden.

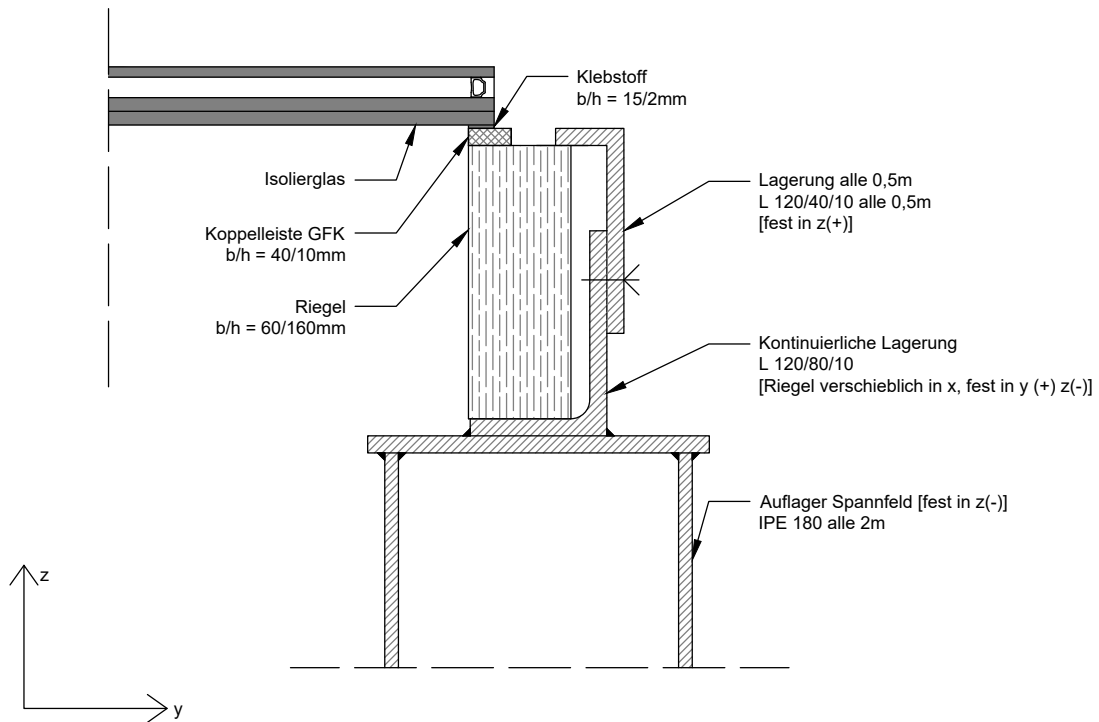


Abbildung 8.23: Großprüfkörper 2 (Kleinformat), Schnitt A-A

Der Versuch wird weggesteuert durchgeführt, mit einer konstanten Änderung des Kolbenwegs von 4 mm/min. Die Messung der Verformungen erfolgt wie bei Großprüfkörper 1 mit Wegaufnehmern und dem 3D-Kamerasystem *GOM Aramis*. Die Positionierung von Wegaufnehmern und Kameras ist in Abbildung 8.24 dargestellt und entspricht der Anordnung von Großprüfkörper 1. Die Wegaufnehmer werden im Abstand von 500 mm von der Außenkante der Glasscheibe am Holzrahmen angebracht und messen die Verformungen der Klebefuge an der mittleren Glasscheibe. Gegenüber Großprüfkörper 1 werden zwei zusätzliche Wegaufnehmer (50-4 und 50-2) am linken Pfosten angebracht, die die Verformungen zwischen Holzpfosten und GFK-Koppelleiste aufnehmen. Abbildung 8.25 zeigt den Versuchsaufbau im Spannungsfeld der HCU.

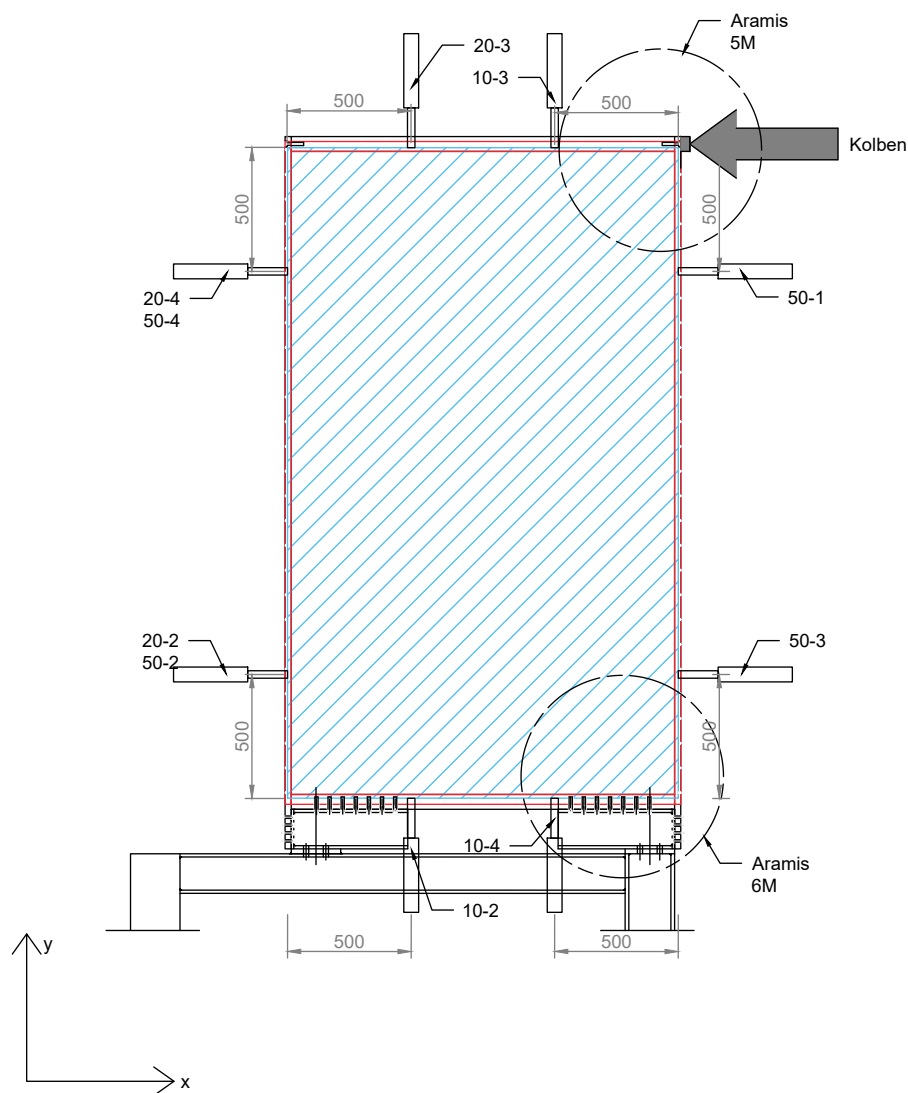


Abbildung 8.24: Positionierung der Wegaufnehmer und Kamerasysteme Großprüfkörper 2

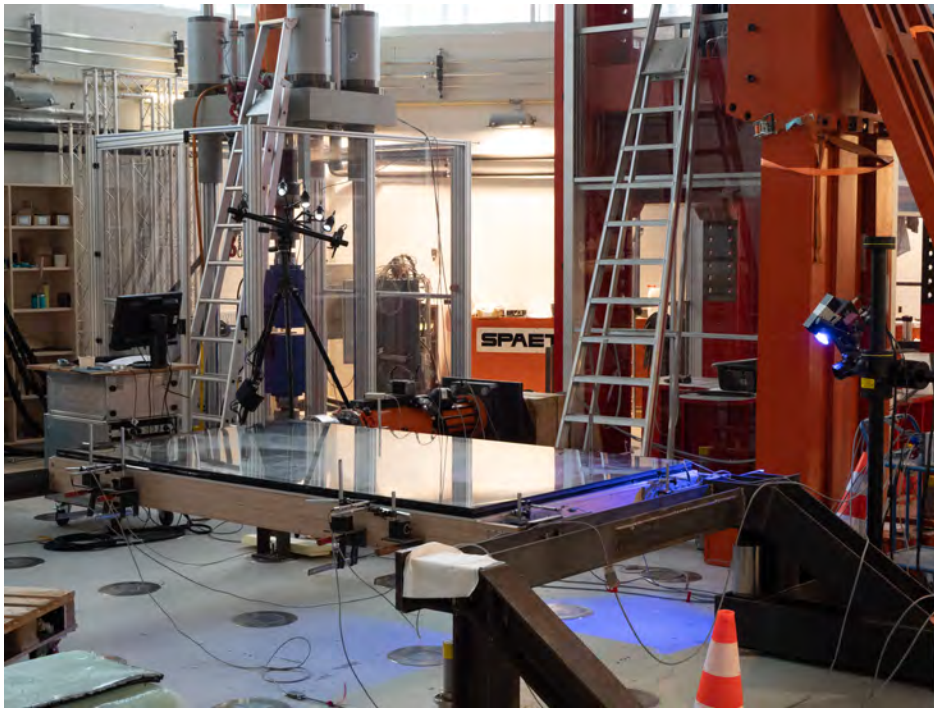


Abbildung 8.25: Großprüfkörper 2 / Versuchsaufbau im Spannfeld

### 8.3.2. Ergebnisse 1

Großprüfkörper 2 weist etwa ein Drittel der Breite von Großprüfkörper 1 auf. Die Druckkraft im unteren Riegel und somit auch die Schubspannung in der Klebefuge des Riegels wird daher beim vorliegenden Kleinformat bei gleicher Pfostennormalkraft etwa drei Mal so groß. Die erreichte Aussteifungslast beträgt  $F_{\max} = 49,2 \text{ kN}$ , bei einer horizontalen Verschiebung des oberen Riegels in  $x$ -Richtung von  $65,4 \text{ mm}$  (Abb. 8.28). Es entstehen erste Risse im Druckpfosten infolge großer Verformungen. Außerdem beginnt die Klebefuge in der Ecke des unverschieblichen Auflagers kohäsiv zu reißen. Der Versuch wird jedoch wegen eines Fehlers im Versuchsaufbau frühzeitig abgebrochen. Aufgrund großer vertikaler Verformungen ( $y$ -Richtung), des Lagerersatzprofils dreht sich der Prüfkörper stark um das unverschiebliche Auflager. Infolgedessen bewegt sich der obere Riegel aus den hinteren beiden umgedrehten Winkelprofilen heraus und ist in diesem Bereich somit in  $z$ -Richtung (senkrecht zur Glasebene) nicht mehr gehalten. Da diese Lagerung nicht mehr die reale Situation abbildet, wird der Versuch abgebrochen. Anschließend wird der Versuchsaufbau angepasst (Kapitel 8.3.3) und erneut belastet. Der Zeitraum bis zum Herauslösen des Riegels kann dennoch als repräsentativ angenommen werden und wird nachfolgend genauer betrachtet. Hierfür muss zunächst der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem sich der Riegel aus der Lagerung herauslöst. Abbildung 8.26 zeigt die Verschiebung in  $z$ -Richtung zweier Punkte auf der GFK-Koppelleiste des Riegels. Punkt 1 liegt dabei dichter am Lasteinleitungspunkt, an der Ecke zwischen Pfosten und Riegel, und Punkt 2 hinter dem ersten Stahlwinkel zur Lagerung senkrecht zur Glasscheibe ( $z$ ). Anfangs verläuft die Verformung in  $z$ -Richtung beider Punkte recht ähnlich. Nach Erreichen einer Aussteifungslast von  $32,3 \text{ kN}$  bewegt sich Punkt 2 (hinter dem ersten Stahlwinkel) zunehmend weiter nach oben, während Punkt 1 die maximale  $z$ -Verschiebung von  $0,29 \text{ mm}$  erreicht. Der hintere Stahlwinkel scheint den Riegel noch zu halten, daher kann sich Punkt 1 nicht weiter verschieben. Aus der unterschiedlichen Verschiebung der Punkte wird ersichtlich, dass sich der Riegel bei etwa  $32,3 \text{ kN}$  aus der Lagerung löst. Dieser Zeitpunkt wird fortan als *Lageränderung* bezeichnet und in den Diagrammen gekennzeichnet.

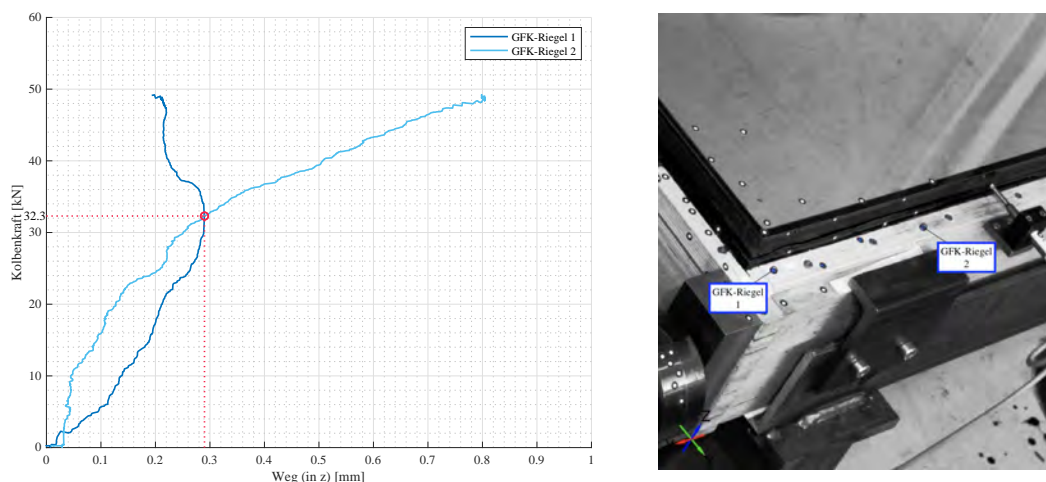


Abbildung 8.26: Großprüfkörper 2.1 / Verschiebung Riegel in  $z$ -Richtung (5M)

Abbildung 8.27 zeigt die Verschiebungen von Pfosten, Riegel und Eckversteifung am unverschieblichen Auflager in x-Richtung. Der Riegel weist mit fast 1,7 mm zum Zeitpunkt der Lageränderung die größte Verschiebung auf, die Eckversteifung die geringste (0,8 mm). Die Verschiebungen aller drei Bauteile sind am unverschieblichen Auflager jedoch im Vergleich zum oberen Riegel sehr gering. So beträgt die Verschiebung des oberen Riegels zum Zeitpunkt der Lageränderung etwa 39 mm (Abb. 8.28), während die Verschiebung des unteren Riegels nur rund 1,7 mm beträgt. Dies hat zur Folge, dass die Pfosten, sich in der Glasebene sehr stark verformen. Da die Pfosten am Fußpunkt durch die verhältnismäßig sehr steife Eckversteifung gehalten sind und sich am Kopfpunkt gleichzeitig sehr stark verschieben, beginnen die Pfosten in der Glasebene seitlich auszuknicken. Gleichzeitig verdrehen sie sich aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung durch die Schraubverbindung ein wenig um die eigene Achse. Es ist ein seitliches Ausreißen der Schrauben im Holz und ein entsprechender Riss im Pfosten (Abb. 8.29) erkennbar. Die GFK-Koppelleiste, welche steifer mit den Pfosten (Schraubverbindung) als mit der Glasscheibe (Klebeverbindung) verbunden ist, verdreht sich ebenfalls.

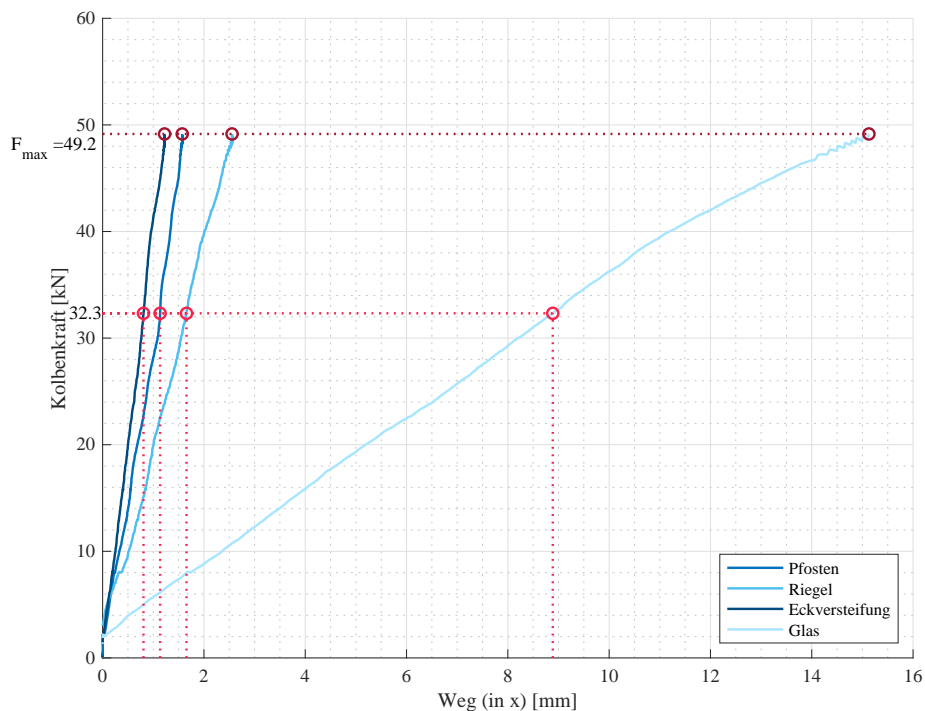


Abbildung 8.27: Großprüfkörper 2.1 / Verschiebung in x-Richtung am Auflager (6M)

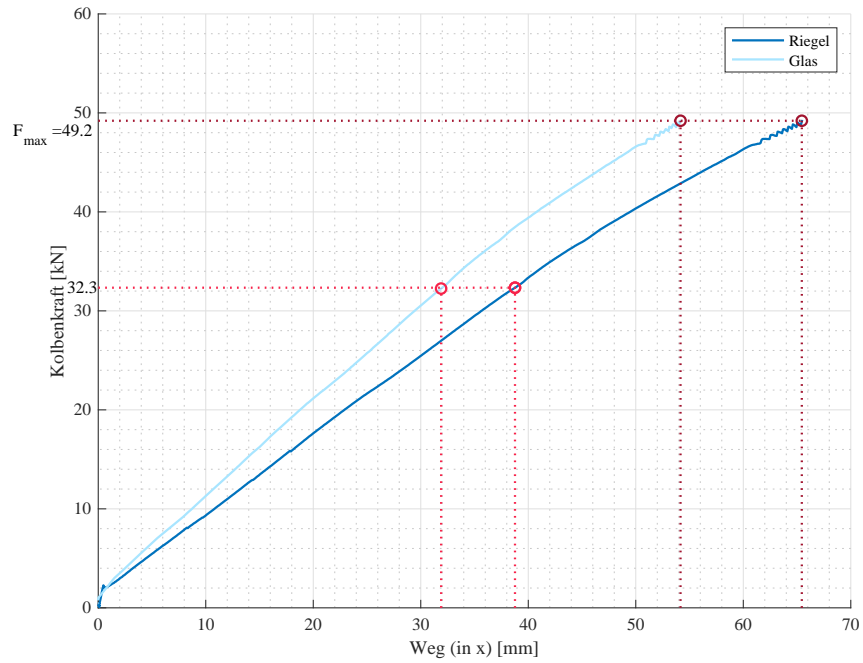


Abbildung 8.28: Großprüfkörper 2.1 / Verschiebung in x-Richtung am Lasteinleitungspunkt (5M)

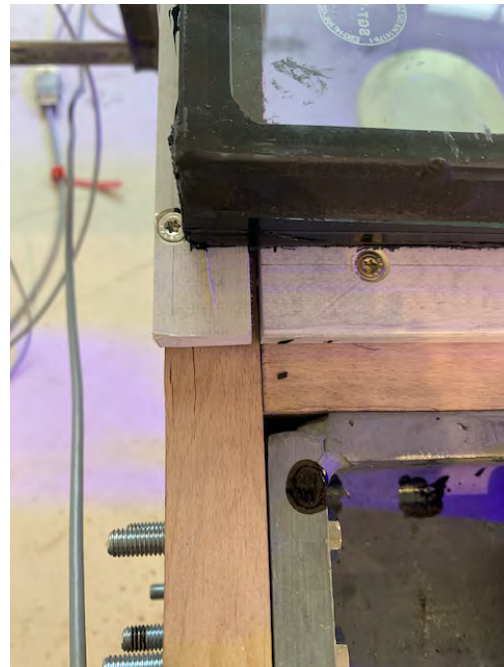


Abbildung 8.29: links: seitliches Ausreißen der Schrauben, rechts: Riss Druckpfosten

Für weitere statische Betrachtungen des Fassadenelements ist die Tragwirkung der Klebefuge von großer Bedeutung. Abbildung 8.30 zeigt die Schubverformung der Klebefuge zwischen Glas und oberem Riegel am Lasteinleitungspunkt (5M). Betrachtet werden die Schubverformung parallel zum Riegel, orthogonal zum Riegel und die Gesamtschubverformung der Klebefuge. Die Gesamtschubverformung steigt nahezu linear und beträgt zum Zeitpunkt der Lageränderung etwa 4,8 mm. Anschließend verformt sich die Klebefuge weiterhin nahezu linear. Beim Versuchsabbruch ist die maximale Schubverformung des Klebstoffes gemäß [15] mit einer Gesamtschubverformung von rund 8,0 mm erreicht. Es sind jedoch augenscheinlich noch keine Risse zu erkennen.

In den Abbildungen 8.31 und 8.32 ist die Schubverformung der Klebefuge zwischen Riegel und Glasscheibe und zwischen Pfosten und Glasscheibe am unverschieblichen Auflager zu sehen. Hier wird ebenfalls die Schubverformung parallel zum Glasrand, orthogonal zum Glasrand und die resultierende Gesamtschubverformung betrachtet. Die Schubverformung der Klebefuge am Riegel steigt hier deutlich schneller als am Lasteinleitungspunkt. So beträgt die Gesamtschubverformung zum Zeitpunkt der Lageränderung bereits etwa 8,2 mm. Die maximale Schubverformung des Klebstoffes wird überschritten und die Klebefuge beginnt im Eckbereich zu reißen. In der Klebefuge zum Pfosten wird die Grenzscherungsverformung etwas später bei etwa 38,0 kN erreicht. Nach dem Versuchsabbruch sind auch hier Risse erkennbar.

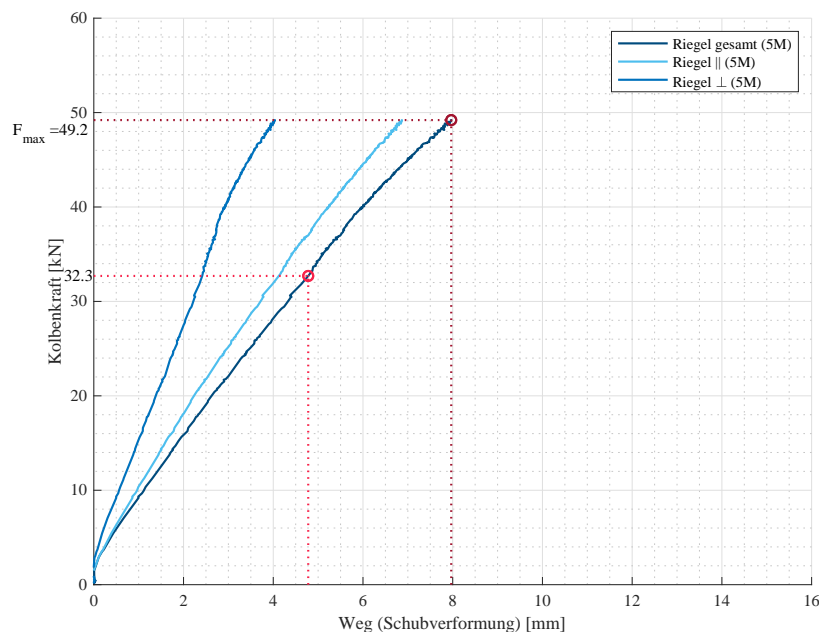


Abbildung 8.30: Großprüfkörper 2.1 / Schubverformung Klebefuge Riegel (5M)

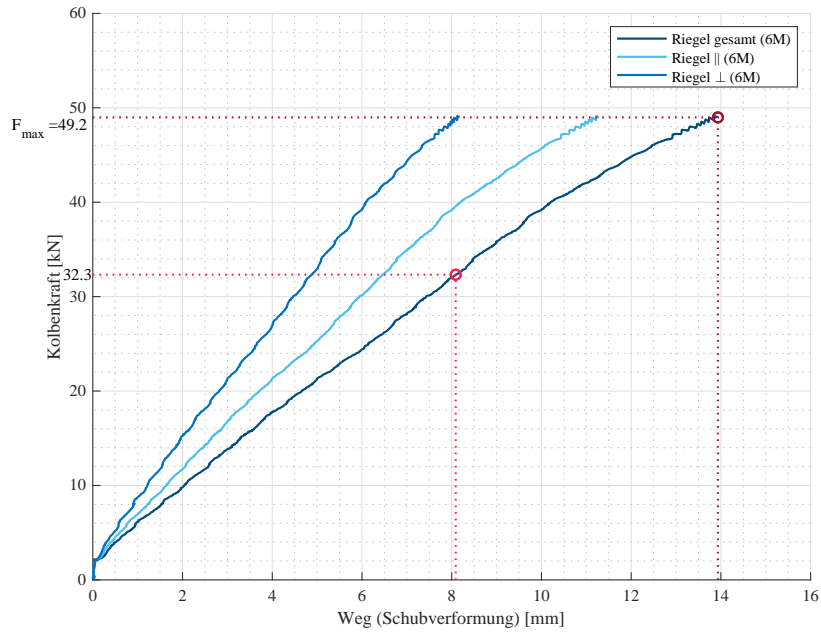


Abbildung 8.31: Großprüfkörper 2.1 / Schubverformung Klebefuge Riegel (6M)

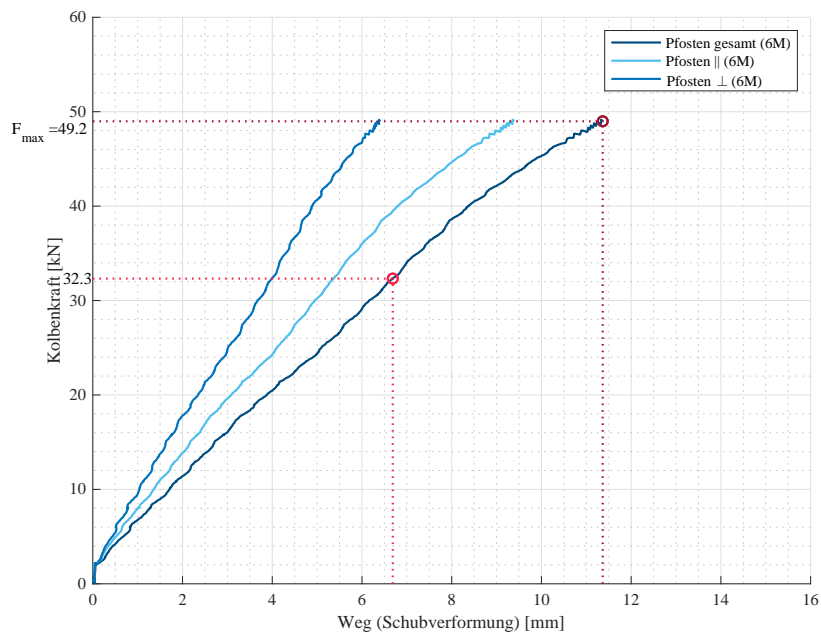


Abbildung 8.32: Großprüfkörper 2.1 / Schubverformung Klebefuge Pfosten (6M)

Vergleicht man die Schubverformungen der Klebefuge von Großprüfkörper 2 mit denen von Großprüfkörper 1, fällt auf, dass die Schubverformungen der Klebefugen von Großprüfkörper 2 bei gleicher Kraft im Pfosten deutlich größer sind (Tabelle 8.1). Die Klebefugegeometrie des Pfostens und die Steifigkeit des Klebstoffs sind jedoch in beiden Versuchen gleich, weshalb ähnliche Schubverformungen zu erwarten sind. Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Schubverformung und Schubspannung lässt sich mithilfe der Klebstoffkennwerte des Herstellers [15] vereinfacht die zu erwartende Schubverformung abschätzen. Hierfür wird zunächst ein Faktor ermittelt, welcher mit der Schubspannung multipliziert die Schubverformung ergibt. Die Schubspannung wird hierbei vereinfacht konstant über die Klebefugegeometrie angenommen.

$$f_{\tau,\parallel} = \frac{\gamma \cdot d_K}{\tau_{max}} \cdot \tau_{\parallel} = \frac{3,97 \cdot 2}{3,7} = 2,146 \quad (8.1)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F}{b_K \cdot l_K} \quad (8.2)$$

$$u_{\tau,\parallel} = f_{\tau,\parallel} \cdot \tau_{\parallel} \quad (8.3)$$

Die nach Gleichung 8.3 geschätzten Schubverformungen liegen eher in der Größenordnung der Schubverformungen von Großprüfkörper 1. Für ein kohäsives Versagen der Klebefuge, wie es nach der Belastung zu beobachten ist, sind die Schubspannungen unter Berücksichtigung der vollen Klebefugegeometrie zu gering. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Klebefuge im Versuch 2.1 bereits zu Beginn der Belastung teilweise adhäsiv löst, sodass nur ein Bruchteil der Klebefläche zur Kraftübertragung zur Verfügung steht.

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung Bruchkräfte Anschluss Pfosten-Eckversteifung

Kraft im Pfosten F [kN]	Schubverformung $\parallel$ zum Pfosten		Verhältnis GP2/GP1 [%]	Abschätzung $u_{\tau,exp}$ [mm]
	Großprüfkörper 1 $u_{\tau,1}$ [mm]	Großprüfkörper 2 $u_{\tau,2}$ [mm]		
10	0,25	0,6	240	0,50
20	0,6	1,5	250	0,99
30	0,9	2,4	267	1,49
40	1,3	3,5	269	1,99
50	1,7	4,5	265	2,48
60	2,4	5,5	229	2,98
70	3,3	6,4	194	3,48
80	4,0	7,8	195	3,97

### 8.3.3. Anpassung Versuchsaufbau

Um zu verhindern, dass der obere Riegel sich wieder senkrecht zur Glasebene nach oben bewegen kann, wird der Versuchsaufbau vor der Wiederbelastung des Prüfkörpers angepasst. Es werden größere Stahlwinkel am oberen Riegel vorgesehen, damit der Riegel auch bei größeren Verformungen in y-Richtung durch die Winkel gehalten werden kann. Der angepasste Versuchsaufbau ist in Abbildung 8.33 im Schnitt durch den oberen Riegel dargestellt.

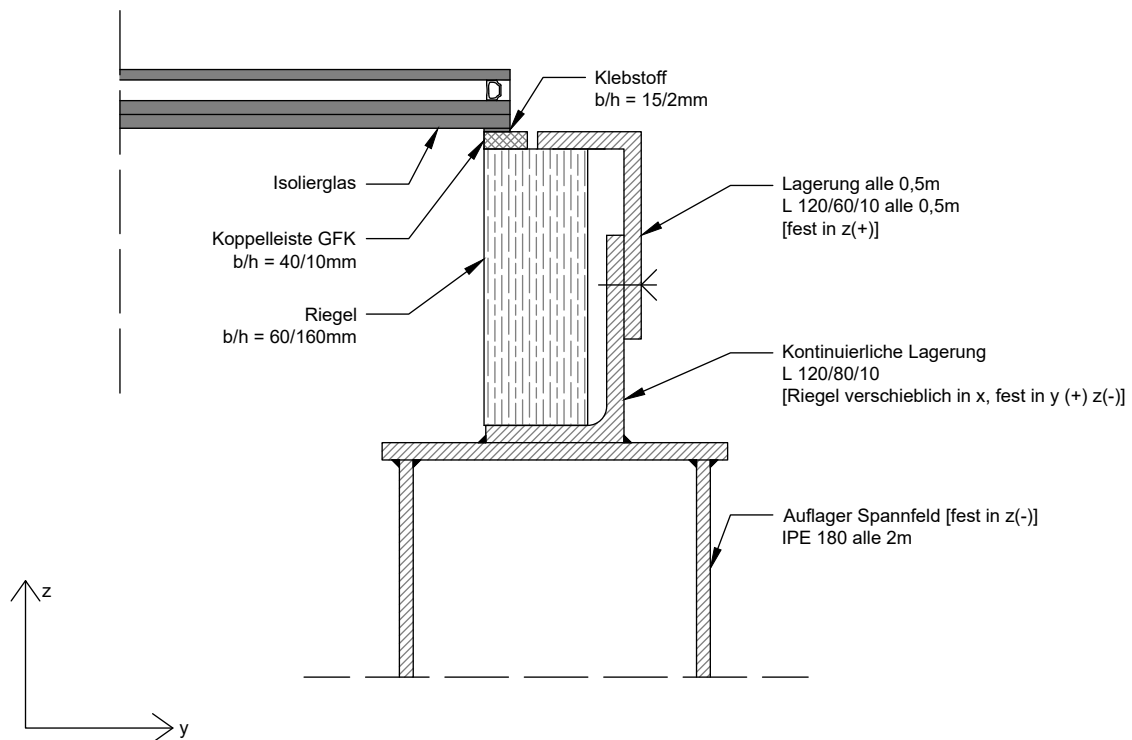


Abbildung 8.33: Großprüfkörper 2.2, Schnitt A-A, Anpassung Wiederbelastung

Abgesehen von dieser Anpassung ist der Versuchsaufbau identisch zu dem in Kapitel 8.3.1 vorgestellten Versuchsaufbau, da es sich lediglich um die Wiederbelastung des Prüfkörpers handelt. Das Fassadenelement weist bereits Beschädigungen aus der ersten Belastung auf. Zum einen ist die Klebefuge in der Ecke am unverschieblichen Auflager gerissen. Außerdem ist ein Riss im Druckpfosten in der Achse der GFK-Schrauben erkennbar (Abbildung 8.29).

### 8.3.4. Ergebnisse 2

Nach der Anpassung des Versuchsaufbaus wird das Fassadenelement erneut belastet. Bei einer maximalen Aussteifungslast von  $F_{\max}=33,6\text{ kN}$  und einer Kopfpunktverschiebung von etwa  $46,0\text{ mm}$  wird der Versuch vor dem Glasbruch beendet (Abbildung 8.34), da der Druckpfosten bereits starke Beschädigungen aufweist, welche für ein Fassadenelement nicht mehr zulässig sind. Wie bei der Erstbelastung beginnt der Pfosten zur Seite auszuknicken und sich zu verdrehen. Infolgedessen vergrößert sich der Riss im Druckpfosten, welcher bereits aus der Erstbelastung vorhanden ist (Abbildung 8.35).

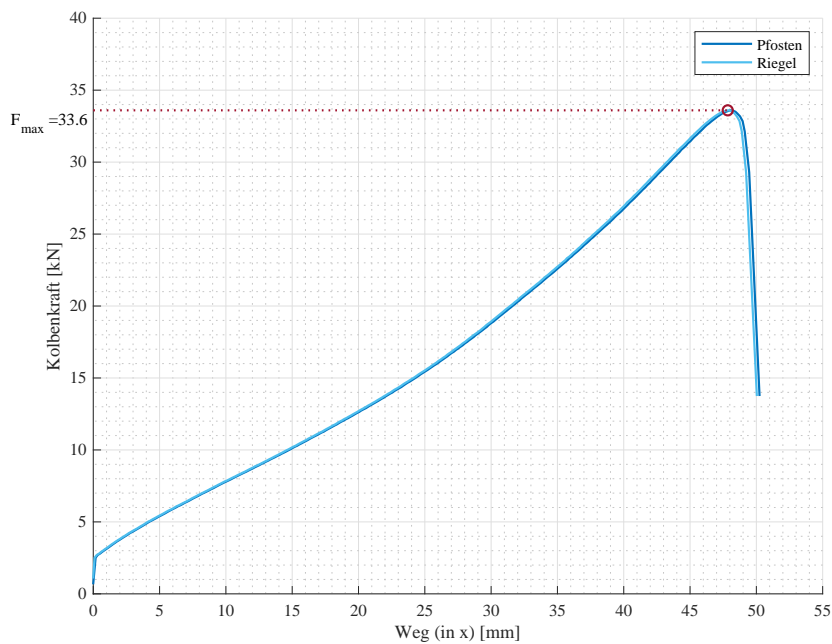


Abbildung 8.34: Großprüfkörper 2.2 / Verschiebung in x-Richtung am Lasteinleitungspunkt (5M)



Abbildung 8.35: Großprüfkörper 2.2 / Riss Druckpfosten nach Wiederbelastung

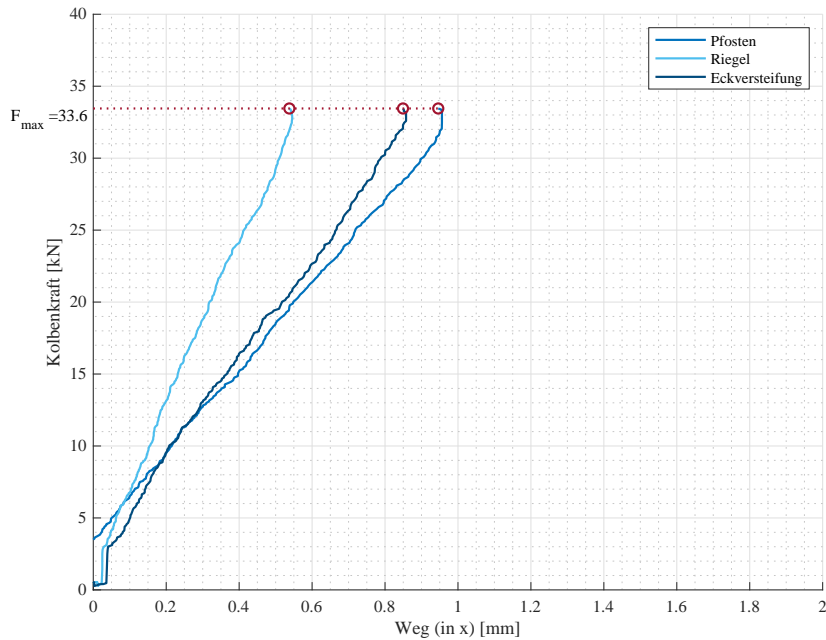


Abbildung 8.36: Großprüfkörper 2.2 / Verschiebung in x-Richtung am Auflager (6M)

Es wird davon ausgegangen, dass die Klebefugen zwischen Glas und Pfosten bzw. Riegel am Lasteinleitungspunkt (5M) zu Beginn der Wiederbelastung noch nicht gerissen sind. Die Klebefugen am unverschieblichen Auflager (6M) weisen bereits aus der Erstbelastung sichtbare Risse auf. Im Versuch 2.2 werden daher nur die Schubverformungen der Klebefugen am Lasteinleitungspunkt betrachtet, welche nachfolgend in den Abbildungen 8.37 und 8.38 dargestellt sind. Diese verlaufen nahezu identisch, was ähnliche Schubspannungen in den Klebefugen erwarten lässt. Beim Erreichen der maximalen Kraft beträgt die Gesamtschubverformung in der Klebefuge zum Riegel etwa 7,0 mm und in der Klebefuge zum Pfosten etwa 6,8 mm. Die maximale Schubverformung des Klebstoffes ist somit in beiden Klebefugen noch nicht erreicht. Es sind keine Risse in den Klebefugen erkennbar.

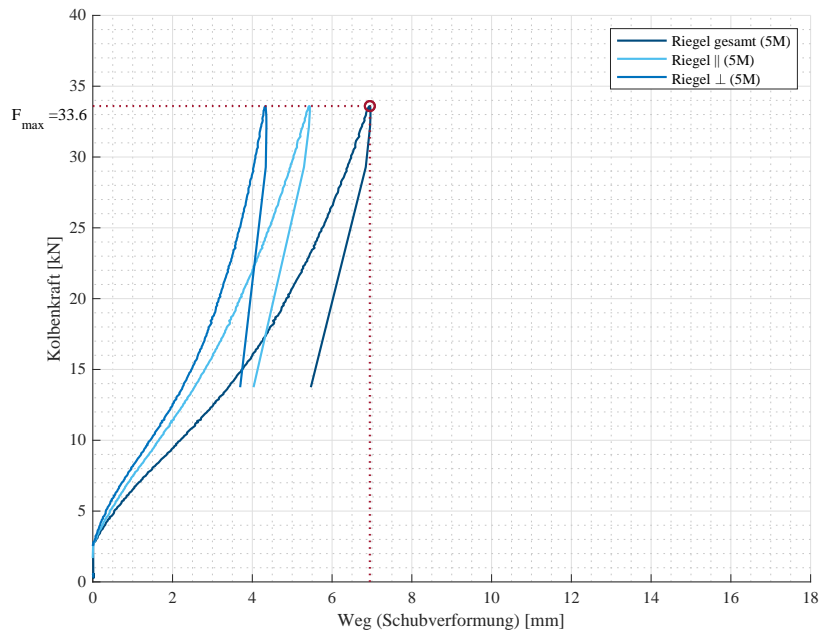


Abbildung 8.37: Großprüfkörper 2.2 / Schubverformung Klebefuge Riegel (5M)

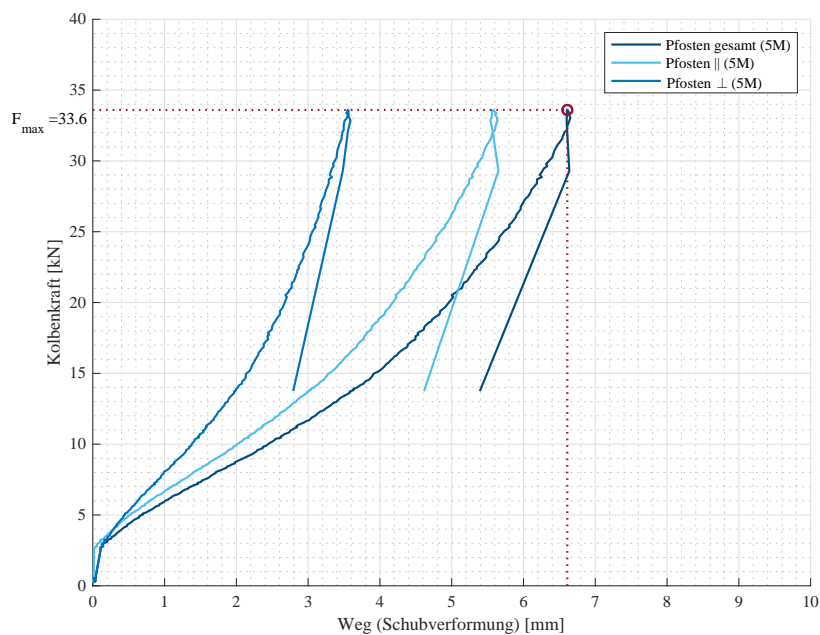


Abbildung 8.38: Großprüfkörper 2.2 / Schubverformung Klebefuge Pfosten (5M)

#### 8.4. Zusammenfassung und Ausblick

Die experimentelle Untersuchung der Großprüfkörper zeigt, dass die Aussteifung der Fassadenelemente in der Anwendung als Aufstockung grundsätzlich möglich ist. Dabei ist das große Fassadenelement deutlich steifer und weist bei gleicher Aussteifungslast wesentlich geringere Verformungen auf als das kleine Fassadenelement. Infolgedessen sind auch die Schubverformungen in der Klebefuge beim großen Fassadenelement geringer, weshalb eine höhere Aussteifungslast aufgenommen werden kann.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Fassadenelements haben die Bauteilanschlüsse:

- Klebeverbindung Glasscheibe / GFK-Koppelleiste
- Schraubverbindung GFK-Koppelleiste / Pfosten bzw. Riegel
- Schraubverbindung Pfosten bzw. Riegel / Eckversteifung
- Verbindung Eckversteifung / Dachdecke

Die Schraubverbindung zwischen Pfosten bzw. Riegel und Eckversteifung wurde vorher betrachtet und in Kleinversuchen getrennt und nur in axialer Richtung getestet (Kapitel 7). Im Versuch als Großprüfkörper haben sich jedoch zusätzliche Interaktionen gezeigt. So ist zu vermuten, dass Normalkräfte der Pfosten nicht ausschließlich direkt in die Eckversteifungen eingeleitet werden, sondern Kraftanteile zunächst in den Riegel geleitet werden und von diesem in die Eckversteifungen. Dies wurde so vorher nicht erwartet und führte zum Versagen des Großprüfkörpers. Es ist daher sinnvoll, die Fußpunkte noch einmal näher zu betrachten und dabei einen besonderen Augenmerk auf die Steifigkeitsverhältnisse der Komponenten und mögliche Lastkonzentrationen, welche zu Fehlbelastungen des Holzes führen können zu legen. Darüber hinaus sollte auch die Schraubverbindung zwischen GFK und Holz näher betrachtet werden, da in den Großversuchen zum einen das seitliche Ausreißen von Schrauben aus dem GFK (Versuch 1) und zum anderen das seitliche Ausreißen im Holz (Versuch 2.1) zu beobachten war. Dies kann wie im Versuch 1 ungeplante Spannungskomponenten zur Folge haben oder wie in Versuch 2.1 sogar zum Versagen des Fassadenelements führen.

## Literatur

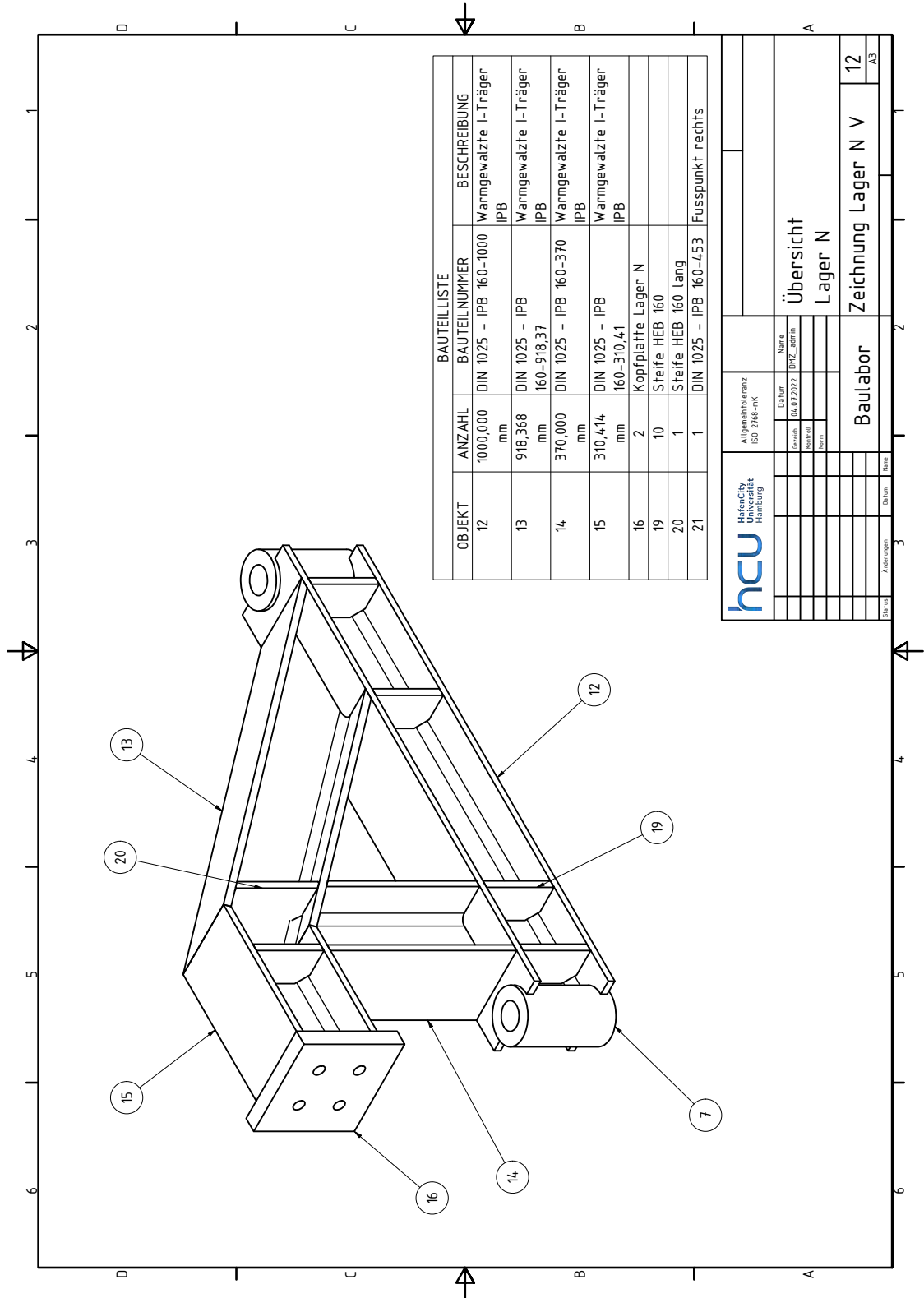
- [1] Enghardt, Oliver: *Flächentragwerke aus Glas : Tragverhalten und Stabilität*. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2007.
- [2] Luible, Andreas: *Stabilität von Tragelementen aus Glas*. Thèse EPFL 3014, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 2004.
- [3] Wellershoff, Frank: *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen*. Nummer 57 in *Schriftenreihe Stahlbau*. Shaker, Aachen, 2006, ISBN 978-3-8322-5046-1.
- [4] Wellershoff, Frank und Gerhard Sedlacek: *Wirtschaftliche Aussteifung von Stahlkonstruktionen mit Glas zur Schubübertragung und zur Erhöhung der Filigranität der Konstruktion*. Nummer 2003, 4 in *Forschungsbericht / Deutscher Ausschuss für Stahlbau*. Stahlbau-Verlags- u. Service GmbH, Düsseldorf, 2003, ISBN 978-3-923726-35-6.
- [5] Edl, Thomas: *Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe*. Thesis, Technische Universität Wien, Wien, 2008.
- [6] Hochhauser, Werner: *Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben*. Thesis, Technische Universität Wien, Wien, 2011.
- [7] Niedermaier, P.: *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken*. Dissertation, Technische Universität München, München, 2005.
- [8] Weinand, Yves und Klaus Kreher: *Holz-Glas-Verbund als großflächige Scheibensysteme zur Gebäudeaussteifung*. Technischer Bericht Final Report 06/07, Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [9] Nicklisch, Felix, Sebastian Hernandez, Maximilian Schlehlein und Bernhard Weller: *Development of load-bearing timber-glass composite shear wall elements*. Glass Performance Days 2015, Tampere, Finnland, Juni 2015.
- [10] Saleh Pascha, Khaled, Vitalija S. Pascha und Wolfgang Winter: *GEOMETRICAL ASPECTS FOR THE DESIGN OF PREFABRICATED LOAD-BEARING TIMBER-GLASS-FACADES*, August 2016.
- [11] Fa. Petschenig Glastec, Broschüre der: *UNIGLAS FACADE Timber-Glass-Composites*, 2016.
- [12] Fa. KNAPP Verbinder, Broschüre der: *Fasco-Fassadensystem: Verklebte Glaselemente für den modernen Holz- und Metallbau*, Januar 2013.
- [13] GUTMANN Bausysteme GmbH: *Woodaluminum unitised facade*, 2022. <https://www.gutmann.de/en/building-systems/unitisedfacade.html>.
- [14] Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG: *Kapitel 07: Wald. Forst. Holz*. In: *BauBuche Buchen-Furnierschichtholz*. Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Creuzburg, 2019.
- [15] AG, Sika Services: *Additional product information: Mechanical properties and repair Sikaflex-268*. Sika Services AG, Zürich, 3. Auflage, Oktober 2022.

- [16] Habenicht, Gerd: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-85264-3.
- [17] Niedermaier, Peter: *Schubaussteifende Glastafelelemente im statisch wirksamen Verbund mit Holzstabwerkskonstruktionen*. Technischer Bericht, Institut für Fenstertechnik e.V., Rosenheim, April 2003.
- [18] Neubauer, Georg: *Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich*. Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, Januar 2011.
- [19] Schleicher, Andreas: *Geklebte Holz-Glas-Fassaden - Anwendungsmöglichkeiten für mehrgeschosige Gebäude unter Berücksichtigung von Doppelfassaden und deren Verhalten im Brandfall*. Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, Februar 2018.
- [20] Schmid, Martin: *Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2002.
- [21] Scherer, Thomas: *Werkstoffspezifisches Spannungs-Dehnungs- Verhalten und Grenzen der Beanspruchbarkeit elastischer Klebungen*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2014.
- [22] Bues, Martin Dirk: *Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, April 2020.
- [23] Werkle, Horst: *Finite Elemente in der Baustatik: Statik und Dynamik der Stab- und Flächen-tragwerke*. Springer Vieweg, Wiesbaden [Heidelberg], 4., aktualisierte auflage Auflage, 2021, ISBN 978-3-8348-2262-8.
- [24] Blaß, Hans Joachim und Martin Schmid: *Spaltgefahr von Nadelhölzern*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2002.
- [25] Jorissen, André Johannes Maria: *Double shear timber connections with dowel type fasteners*. Delft Univ. Pr, Delft, 1998, ISBN 978-90-407-1783-3.
- [26] Krenn, Harald: *Der Einfluss der Gruppenwirkung von Schraubenverbindungen auf das Nachweisverfahren*. 16. Internationales Holzbau-Forum, Gamisch-Patenkirchen, 2010.
- [27] Blaß, Hans Joachim, Ireneusz Bejtka und Thomas Uibel: *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2006.
- [28] Niemz, Peter und Walter Sonderegger: *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, August 2017, ISBN 978-3-446-44526-0.
- [29] Fleischmann, Martin: *Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells*. Dissertation, Technische Universität Wien, März 2005.
- [30] Jockwer, Robert: *Tragverhalten von Schrauben in Buchenholz*. 25. Internationales Hozbauforum, Innsbruck, 2019.


- [31] Stuefer, Alfons: *Einflussparameter auf die Querkzugfestigkeit von BSH-Lamellen*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Graz, Juni 2011.
- [32] Schmidt, Michael, Peter Glos und Gerd Wegener: *Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile*. European Journal of Wood and Wood Products, 68(1):43–57, Februar 2010, ISSN 0018-3768, 1436-736X.
- [33] Bermbach, Tim: *Zum Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter kombinierter Luftstoß-Temperatur-Belastung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, München, Januar 2017.
- [34] Fachverband konstruktiver Glasbau: *Merkblatt FKG 01/2021 Tragende Silikonklebstoffe im Konstruktiven Glasbau*. Technischer Bericht, Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V., Köln, 2021.
- [35] Nicklisch, Felix: *Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, März 2016.
- [36] Schäpel, Reiner: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: Holz Schiller Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz*, April 2018.
- [37] Torno, Stefan, Axel Jentsch und Frank Lattke: *spezial: Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern*. Informationsdienst Holz e.V., Düsseldorf, November 2017.
- [38] Leviat: *Halfenschienen: Produktinformationen Technik*, 2021.
- [39] Lorenzen, Nico: *Entwurf und experimentelle Untersuchung von Verbindungen in Elementfassaden aus Laubholz*. Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Hamburg, Mai 2020.
- [40] Hunschok, Celina: *Elementierte Fassadensysteme aus Laubholz: Numerische Modellierung und statisch-konstruktive Optimierung von Holz-Glas-Verbundsystemen*. Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Hamburg, 2023.
- [41] BMEL, Referat 533: *Waldbericht der Bundesregierung 2017*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn, September 2017.
- [42] Hinkes, Franz Josef, Volker Schiermeyer und Sebastian Wörmann: *Bemessungshilfen für Holzbemessung im Brandfall nach DIN 4102-22:2004-11*, November 2009.
- [43] *DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Technischer Bericht, Beuth Verlag GmbH.
- [44] *DIN 4108-7:2011-01, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*. Technischer Bericht, Beuth Verlag GmbH.
- [45] *DIN 68800-2:2022-02, Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Technischer Bericht, Beuth Verlag GmbH.
- [46] *DIN 4109-5:2020-08, Schallschutz im Hochbau - Teil 5: Erhöhte Anforderungen*. Technischer Bericht, Beuth Verlag GmbH.

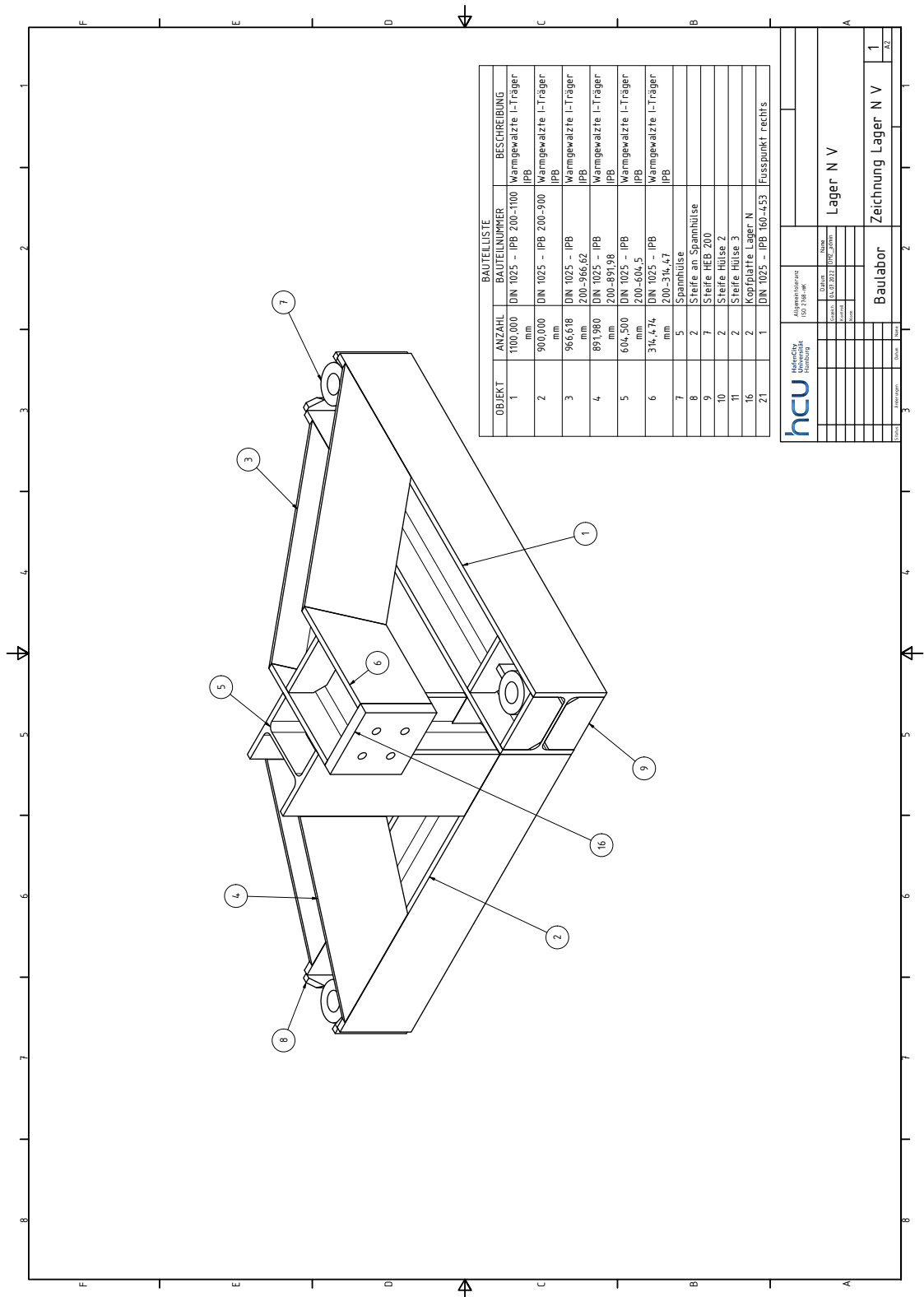
- [47] *HASSLACHER BauBuche: Glued laminated timber made of hardwood – Structural laminated veneer lumber made of beech*, Dezember 2018.
- [48] *ETAG 002 - Guideline for European technical approval for structural sealant glazing kits (SS-GK)*. Technischer Bericht, EOTA, Mai 2012.
- [49] Lieb, Karin: *Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme*. ift Rosenheim, Rosenheim, 4. Auflage, 2017, ISBN 978-3-86791-406-2.

## A. Konstruktionszeichnung der Lager für den Großversuch




OBJEKT	ANZAHL	BAUTEILNUMMER	BESCHREIBUNG
12	1000,000	DIN 1025 - IPB 160-1000	Warmgewälzte I-Träger IPB
13	918,368	DIN 1025 - IPB 160-918,37	Warmgewälzte I-Träger IPB
14	370,000	DIN 1025 - IPB 160-370	Warmgewälzte I-Träger IPB
15	310,414	DIN 1025 - IPB 160-310,41	Warmgewälzte I-Träger IPB
16	2	Kopfplatte Lager N	
19	10	Steife HEB 160	
20	1	Steife HEB 160 Lang	
21	1	DIN 1025 - IPB 160-453	Fusspunkt rechts

 <b>HafenCity Universität Hamburg</b>		Allgemeintoleranz ISO 2768-mK	
Gezeichnet	04.07.2022	Name	
Kontrolliert		DFZ_jalmb	
Norm			
		Übersicht Lager N	
		Baulabor	
		Zeichnung Lager N V	
		12	
		A3	



BAUTEILLISTE		
OBJEKT	ANZAHL	BESCHREIBUNG
1	1100,000 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
2	900,000 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
3	966,618 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
4	891,980 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
5	604,500 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
6	314,474 mm	Wärmegewälzte I-Träger IPB
7	5	Spannhülse
8	2	Streifen an Spannhülse
9	7	Streifen HEB 200
10	2	Steine Hülse 2
11	2	Steine Hülse 3
16	2	Kopfflatte Lager N
21	1	DN 1025 - IPB 160-453 Fußpunkt rechts

 HafenCity Universität Hamburg Altonaer Platz 100 7198-9K		Datum: 15.07.2022 DWG: 2011 Name:	
Lager N V		Zeichnung Lager N V	
Baulabor		1	
Blatt		1	

## Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens

<b>Förderkennzeichen:</b>	22009618
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	HafenCity Universität Hamburg
<b>Thema (Akronym):</b>	Holz-Glas-Fassaden Elementierte Fassadensysteme mit hybrider Laubholz-Glas-Verbundtragwirkung Teilvorhaben 1: Konstruktive und bauphysikalische Vorplanung sowie Fassadenelementanschluss und -prüfung

### Projektbeschreibung:

Die CO<sub>2</sub>-Effizienz nachwachsender Bauprodukte liegt auf der Hand. Das Projekt trägt dazu bei, den Anteil heimischer Laubhölzer im Fassadenbau zu erhöhen und eine hochwertige Nutzungsvariante für die wertvollen Hölzer zu schaffen.

Elementfassaden aus Holz müssen sich messen lassen an den Varianten aus Aluminium, die den Fassadenbau dominieren, aufgrund ihrer bekannten Stärken:

- Hohe Feuchte- und Witterungsbeständigkeit
- Geringe Gesamtansichtsbreiten der gestoßenen Pfosten
- Filigrane mechanische Verbindungen innerhalb der Elemente (Pfosten-Riegel-Verbindungen), vertikal von Element zu Element (Pfosten-Pfosten-Verbindungen), sowie vom Element zur Geschossdecke

Fassadenbauunternehmen, die bereits Pfosten-Riegel-Fassaden aus Holz anbieten, haben es schwer, aus eigener Kraft in den Markt für Holzelementfassaden einzusteigen. Die F&E-Schritte sind kostenintensiv und die Erfolgchancen nicht kalkulierbar. Daher wurden im Projekt die ersten F&E Schritte übergreifend durchgeführt und ohne Schutzrechte veröffentlicht, so dass Unternehmen auf dieser Basis marktreife Systeme weiterentwickeln und vertreiben können.

Laubhölzer bieten die werkstofflichen Voraussetzungen für filigrane, tragfähige Verbindungen. Im Projekt wurden die Laubholzprodukte Baubuche und Eichenbrettschichtholz eingesetzt. Die entwickelten Verbindungen sind auf andere Laubhölzer übertragbar.

Die erforderliche Breite der Fassadenpfosten wird maßgebend durch die Tragfähigkeit, insbesondere die Biegedrillknickstabilität bestimmt. Durch die kraftschlüssige Verklebung mit der Verglasung wird ein seitliches Ausweichen der Pfosten soweit behindert, dass die reine Biegezugtragfähigkeit maßgebend wird und sehr schmale Holzpfosten möglich sind.

Eine kraftschlüssige Verklebung zwischen den Holzprofilen und der Verglasung bietet zusätzlich die Möglichkeit, eine schubsteife Scheibe auszubilden, die zur Aufnahme von Aussteifungskräften in Fassadenebene genutzt werden kann.

### Projektergebnisse:

Es wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für die Weiterentwicklung von Elementfassaden aus hochfesten Laubholzprodukten und kraftschlüssig verbundenen, aber austauschbaren, Verglasungen geschaffen. Auf die Verglasung werden im Werk umlaufend GFK-Profile aufgeklebt, die wiederum mit den Holzprofilen (Pfosten und Riegel) verschraubt werden. Die Elemente sind geschosshoch und können in den üblichen Elementrastermaßen (1,2m bis 1,6m), aber auch in sehr langen Rastermaßen (z.B. 6,0 m) hergestellt werden.

Die kraftschlüssige Verbindung zwischen der Verglasung und den Pfosten bietet zwei wesentliche Vorteile:

- Der Pfosten kann sehr schmal ausgeführt werden, ohne dass es bei Biegebelastung infolge Windlasten zum Stabilitätsversagen (Biegedrillknicken) kommt.
- Das Fassadenelement kann zusätzlich als Schubfeld dienen.

Alle Verbindungspunkte im Gesamtsystem konnten so entwickelt werden, dass hinreichend tragfähige und steife Verbindungen gegeben sind:

- Verbindung zwischen Riegel und Pfosten mittels Holzschrauben.
- Verbindung von Pfosten zu Pfosten (vertikaler Elementstoß) mittels Stahldorn, Stahlwinkelprofilen und modifizierten Arbeitsplattenverbindern.
- Verbindung zwischen Holzprofil und GFK-Profil mittels Senkkopfschrauben.

- Verbindung zwischen Verglasung und GFK-Profil mittels Polyurethan-Klebstoff.
- Verbindung zwischen nicht aussteifendem Element und Geschossdecke mittels Bolzen oder modifiziertem Arbeitsplattenverbinder.
- Verbindung zwischen aussteifendem Element und Geschossdecke mittels Stahlknotenpunkt und Anbindung der Riegel und Pfosten mittels Gewindehülsen.

Die Elementstöße wurden bauphysikalisch so ausgebildet, dass kein Tauwasser auf den Holzoberflächen ausfällt und zu Schimmelpilzbildung führt. Die grundsätzlichen Bedingungen für Elementfugen im Fassadenbau werden selbstverständlich eingehalten. Die Fugen sind schlagregendicht und unvermeidbares Wasser in der Fuge wird über feuchtebeständige Oberflächen nach außen abgeführt.

## Short Project Description

<b>Project number:</b>	22009618
<b>Beneficiary:</b>	HafenCity Universität Hamburg
<b>Project title (Acronym):</b>	Wood-glass façades Element façade systems with hardwood-glass load-bearing effect Subproject 1: Preliminary design in terms of construction and building physics as well as façade element connection and testing

### Project objective:

The CO<sub>2</sub> efficiency of renewable building products is obvious. The project contributes to increasing the proportion of local hardwoods in façade construction and to creating a high-quality utilisation variant for the valuable woods.

Element facades made of wood have to measure up to the variants made of aluminium, which dominate facade construction, because of their known strengths:

- High resistance to moisture and weathering
- Small overall face widths of the butted mullions
- Filigree mechanical connections within the elements (mullion-transom connections), vertically from element to element (mullion-mullion connections), as well as from the element to the storey ceiling.

Façade construction companies that already offer mullion-transom façades made of wood have barriers to enter the market for timber element façades on their own. The R&D steps are cost-intensive and the chances of success cannot be calculated. Therefore, in the project, the first R&D steps were carried out across the board and published without property rights, so that companies can further develop and sell market-ready systems on this basis.

Hardwoods offer the material prerequisites for filigree, load-bearing connections. The hardwood products construction beech and oak laminated timber were used in the project. The developed connections are transferable to other hardwoods.

The required width of the façade mullions is largely determined by the load-bearing capacity, in particular the lateral torsional buckling stability. Due to the force-fit bonding with the glazing, lateral deflection of the mullions is hindered to such an extent that the pure bending tensile load-bearing capacity becomes decisive and very slender wooden mullions are possible.

Force-fit bonding between the timber profiles and the glazing also offers the possibility of forming a shear-resistant pane that can be used to absorb stiffening forces at façade level.

### Project results:

The scientific basis for the further development of element facades made of high-strength hardwood products and friction-locked, but exchangeable, glazing was created. GRP profiles are glued all around the glazing in the factory, which in turn are screwed to the wooden profiles (mullions and transoms). The elements are storey-high and can be produced in the usual element grid dimensions (1.2 m to 1.6 m), but also in very long grid dimensions (e.g. 6.0 m).

The load bearing connection between the glazing and the mullions offers two major advantages:

- The mullion can be made very slender without causing stability failure (lateral torsional buckling) when subjected to bending loads due to wind.
- The façade element can also serve as a shear field.

All connection points in the overall system could be developed in such a way that sufficiently load-bearing and rigid connections are given:

- Connection between transom and mullion by means of wood screws.
- Connection from mullion to mullion (vertical element joint) by means of steel splice, steel profiles and modified worktop connectors.
- Connection between timber profile and GRP profile using countersunk screws.
- Connection between glazing and GRP profile using polyurethane adhesive.
- Connection between non-bracing element and storey ceiling by means of bolts or modified worktop connectors.

- Connection between stiffening element and storey ceiling by means of steel node and connection of transoms and mullions by means of threaded sleeves.

The element joints were designed from a building physics point of view so that no condensation water precipitates on the timber surfaces and leads to mould formation. The basic conditions for element joints in façade construction are of course complied with. The joints are driving rain-proof and unavoidable water in the joint is drained to the outside via moisture-resistant surfaces.