

# Re-use im Ingenieurholzbau durch Standardisierung von Verbindungen mit Konusdübeln

Entwurf und Analyse  
reversibler Verbindungstechnik

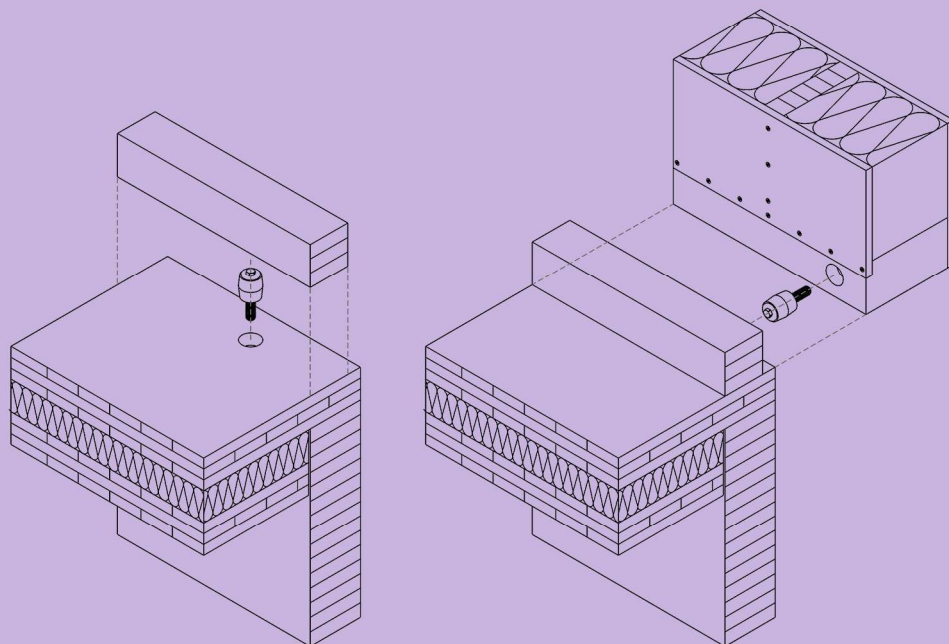
(ReStaKo, Az: 38598/01-25)

Wenchang Shi

Jürgen Graf

t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe

RPTU Kaiserslautern-Landau



Fachgebiet Tragwerk und Material der  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

**Re-use im Ingenieurholzbau durch Standardisierung  
von Verbindungen mit Konusdübeln - Entwurf und Analyse  
reversibler Verbindungstechnik**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 38598/01-25 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Wenchang Shi und Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf

Kaiserslautern, Dez. 2025

# Inhaltverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Hintergrund und Notwendigkeit .....	3
1.2	Anschlussvarianten der Holztafelbauelemente an Tragwerke von Skelettbauten .....	4
1.3	Reversible Verbindungskonzepte für nichttragende Holztafelbauelemente .....	5
1.4	Reversible Verbindungsmittel.....	6
1.5	Mock-Up in M 1:1 .....	6
<b>2</b>	<b>Hauptteil</b> .....	<b>7</b>
2.1	Konstruktive Grundlagen und Randbedingungen .....	7
2.2	Entwicklung der Verbindungskonzepte .....	14
2.3	Baupraktische Umsetzung und Systemintegration .....	19
2.4	Mock-Up und Nachweis der Reversibilität .....	28
2.5	Bewertung der Kreislauffähigkeit und Anwendungspotenzial .....	36
2.6	Methodik und technische Untersuchungen.....	41
<b>3</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Anhänge</b> .....	<b>49</b>
5.1	Eigengewicht.....	49
5.2	Windlasten .....	51
5.2.1	Außensog.....	51
5.2.2	Innendruck .....	52
5.2.3	Design-Wert der Windkraft .....	53
5.3	Bemessungen .....	54
5.3.1	Eigengewicht.....	54
5.3.2	Windlasten .....	54
5.4	Herleitung der Prüfkörpergeometrien für Zugscherversuche .....	56
5.5	Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern.....	58
5.6	Druckscherversuche mit Konusadaptern.....	65
5.7	Zugscherversuche mit Doppel-Konuverbindern.....	71

## Verzeichnis von Bildern

Abbildung 1: Wandelbarer Holzhybridbau mit differenzierten Ausbaustufen zur Ermöglichung nutzungsflexibler Gebäudestrukturen [1] .....	3
Abbildung 2: Demontierbare Außenwände in Brettspertholzbauweise (links) und Holztafelbauweise (rechts) mit reversibler Verbindung mittels Konusadaptern aus Kunstharzpressholz (KP). BT bezeichnet Bauteil, BE bezeichnet Bauelement. ....	4
Abbildung 3: Anschlussvarianten von Holztafelbauelementen an die Tragstruktur von Skelettbauten. Die Holztafelbauelemente sind beige dargestellt, die Anschlusspunkte rot markiert. ....	5
Abbildung 4: Prinzipielle Darstellung eines fertigungs- und montagefreundlichen Verbindungskonzepts mit Doppel-Konusverbinder. Schritt A: Werkseitige Integration des Doppel-Konusverbinders in das Deckenelement; das Kantholz wird anschließend entweder werkseitig oder auf der Baustelle montiert. Schritt B: Vormontage des Doppel-Konusverbinders in der Schwelle des Wandelements zur Reduktion der Montagezeit auf der Baustelle und zur Vermeidung von Nacharbeiten an den Bauelementen vor Ort.....	10
Abbildung 5: Reversibel demontierbares Verbindungskonzept mit Doppel-Konusverbinder und Rampa-Muffe zur kraftschlüssigen Befestigung nichttragender Holztafelbauelemente an der Tragstruktur.....	10
Abbildung 6: Weiterentwickeltes Verbindungskonzept für Außenwandelemente auf Basis bestehender Befestigungsvarianten zur Ermöglichung einer geschossweisen Umbaubarkeit. ....	14
Abbildung 7: Darstellung der Anschlussstellen in den Ständern aus BSH GL24 sowie in der Schwelle aus BSH GL24. ....	15
Abbildung 8: Schematische Darstellung der entwickelten Verbindungskonzepte. Links: Verbindungskonzept mit Doppel-Konusverbinder; rechts: Verbindungskonzept mit Schubverbinder (vgl. Abbildung 10).....	16
Abbildung 9: Prinzipielle Darstellung der Montage mit Doppel-Konusverbinder. Schritt A: Werkseitige Integration des Doppel-Konusverbinders in das Deckenelement; das Kantholz wird anschließend werkseitig oder auf der Baustelle montiert. Schritt B: Vormontage des Doppel-Konusverbinders in der Schwelle zur Reduktion der Montagezeit und zur Vermeidung von Nacharbeiten an den Bauelementen vor Ort. ....	17
Abbildung 10: Mock-Up mit Anwendung der Variante mit Schubverbinder .....	17
Abbildung 11: Anordnung des Schubverbinders im Tragwerk.....	18
Abbildung 12: Ausführung von Element- und Bauteilfugen – Zuordnung der brandschutztechnischen Maßnahmen nach Tabelle A 3.1 der MHolzBauRL 2024 [13]. Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13]. ....	20
Abbildung 13: Ausführung der Bohrungen an den Anschlussstellen zur Übertragung der Windlasten durch die Verbindungsmittel.....	21
Abbildung 14: Anordnung der Wärmedämmung vor dem Tragwerk zur Reduzierung von Wärmebrücken im Übergangsbereich zwischen Tragstruktur und Außenwandelement.....	22
Abbildung 15: Mindestanforderungen an die Baustoffe sowie Überstand der horizontalen Brandsperr gemäß Tabelle 6 der MHolzBauRL 2024 [13]. Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13]. ....	23

Abbildung 16: Überlappende Anordnung von Außenwandelementen im Bereich der Außendecke (schwarze Streifen = Dichtband).....	23
Abbildung 17: Ausbildung Außenwandbekleidung bei Außenecken (Horizontalschnitt). Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13] .....	23
Abbildung 18: Anordnung der Doppel-Konusverbinder sowie Festlegung der Geometrien von Kantholz und Schwelle unter Berücksichtigung der Mindestabstände gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12 [9].....	24
Abbildung 19: Transport der vorgefertigten Wandelemente auf Einzelfahrzeugen in liegender Position. ....	28
Abbildung 20: Eingebautes Mock-Up.....	29
Abbildung 21: Tragwerk mit der Nut-Feder-Konstruktion .....	29
Abbildung 22: Nebenträger aus GL 28h und Zangenträger aus BauBuche GI75 .....	30
Abbildung 23: Deckenelemente aus CLT Box .....	31
Abbildung 24: Querschnittsverstärkung im Ausklinkungsbereich .....	31
Abbildung 25: Alternatives Verbindungskonzept zwischen Deckenelementen und Trägern mittels Doppel-Konusverbindern.....	34
Abbildung 26: Hilfsmittel für die Demontage von Konusadaptern .....	35
Abbildung 27: Alternative Ausführung des Anschlusses zwischen übereinander angeordneten Stützen. Die exakte Positionierung der oberen Stütze erfolgt über Doppel-Konusverbinder, die im Hirnholz der unteren Stütze vormontiert sind.....	36
Abbildung 28: links: Nutzungsgruppen und Austauschzyklen nach dem Shearing-Layers-Prinzip; rechts: Gliederung eines Bauelements in einzelne Schichten gemäß dem Shearing-Layers-Prinzip. ....	37
Abbildung 29: Grundraster des Projekts HolzHybrid [1].....	38
Abbildung 30: Grundraster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ [17].....	39
Abbildung 31: Links: bestehender Raster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“, rechts: angepasster Raster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ (rot markiert die Innenwände) .....	39
Abbildung 32: prinzipielle Darstellung der wiederverwendeten Bauelemente .....	40
Abbildung 33: Standardisierung und Wiederverwendung von Bauelementen eines nutzungsflexiblen Gebäudes in kreislauffähiger Bauweise .....	40
Abbildung 34: Zwei Konstruktionsprinzipien zur Übertragung von Windlasten mittels zerstörungsfrei lösbarer Verbindungsmittel: links das Prinzip mit Doppel-Konusverbindern, rechts das Prinzip mit Konusadaptern. ....	41
Abbildung 35: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche: oben Konusadapter, unten Doppel-Konusadapter; die jeweiligen Randbedingungen der Versuchskörper sind in der Tabelle 5 angegeben.....	42
Abbildung 36: Kraft-Verschiebungskurve von Druckscherversuchen mit Doppel-Konusverbindern bei GL24.....	43
Abbildung 37: Kraft-Verschiebungskurve von Druckscherversuchen mit Konusadaptern bei GL24 .....	44

Abbildung 38: Kraft-Verschiebungskurve von Zugscherversuchen mit Konusadaptern bei GL24 .....	45
Abbildung 39: Das standardisierte Wandelement, deren Positionen in Tabelle 6 aufgelistet sind. ....	49
Abbildung 40: Bezugshöhe $z_e$ für vertikale Wände in Abhängigkeit von Baukörperhöhe $h$ und -breite $b$ .....	52
Abbildung 41: Schematische Darstellung des Zugscherversuchs mit Konusadapter in BSH GL24 .....	57
Abbildung 42: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern .....	58
Abbildung 43: Versuchsaufbau der Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern, Zustand nach dem Bruch Prf.-1 .....	59
Abbildung 44: Versagensverhalten der Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern ..	60
Abbildung 45: Spannungsverteilung in der Mittelebene in Z-Richtung .....	61
Abbildung 46: Vektordarstellung der Hauptspannungsrichtungen im MH .....	62
Abbildung 47: Kernschubversagensflächen, Bild aus DIN EN 1995-1-1 Entwurf [22] .....	63
Abbildung 48: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche mit Konusadaptern .....	65
Abbildung 49: Resultierende Kraft-Verschiebungskurve aus den Mittelwerten von allen sechs Versuchen .....	66
Abbildung 50: Versagen im MH (links) und SH (rechts) .....	68
Abbildung 51: Schematische Darstellung des Zugscherversuchs mit Konusadapter in BSH GL24 .....	71
Abbildung 52: Versagensverhalten in Zugscherversuchen mit Konusadaptern .....	71

## Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1: Statisches System von Außenwandelementen in Abhängigkeit der Anschlussvariante. Die Basisdaten wurden aus [4] übernommen.....	8
Tabelle 2: Vergleichende Bewertung der Reversibilität von Scheibendübeln und Konusadaptern.....	13
Tabelle 3: Grenzabweichungen für Wände nach DIN 18203-3 [11] .....	19
Tabelle 4: Anordnung der Verbindungsmittel. Die zugehörigen Bemessungen sind im Anhang 5.3 erläutert.....	25
Tabelle 5: Mindestabstände von Doppel-Konusverbindern und Konusadaptern in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter $dc$ beschreibt bei Doppel-Konusverbindern den Durchmesser des Verbinders zwischen den verbundenen Bauteilen. Bei Konusadaptern entspricht $dc$ dem größeren Durchmesser (72 mm, in Abbildung 35).....	41
Tabelle 6: Komponenten des standardisierten Wandelements .....	49
Tabelle 7: Parameter zur Ermittlung des Winddrucks (Außendruck).....	51
Tabelle 8: Parameter zur Ermittlung des Winddrucks (Innendruck) .....	52
Tabelle 9: Ermittlung des Design-Werts für den Winddruck (Außen- und Innendruck).....	53
Tabelle 10: Zugtragfähigkeit der Schraube M12, FK 8.8 und Ausziehtragfähigkeit der Rampa-Muffe D = 22 mm, L = 80 mm .....	54
Tabelle 11: Mindestabstände von Doppel-Konusverbindern nach DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter $dc$ beschreibt bei Doppel-Konusverbindern den Durchmesser des Verbinders zwischen den verbundenen Bauteilen. ....	58
Tabelle 12: Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit von Doppel-Konusverbindern in Druckscherversuchen mit BSH GL24 .....	59
Tabelle 13: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Doppel-Konusverbindern .....	64
Tabelle 14: Mindestabstände von Konusadaptern nach DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter $dc$ entspricht dem größeren Durchmesser (72 mm, in Abbildung 35).....	65
Tabelle 15: Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit des Verbinders .....	66
Tabelle 16: Zusammenhang zwischen Versagensverhalten und Bruchkraft, SH: Seitenholz, MH: Mittelholz, kein: kein ausgeprägtes Versagen festgelegt.....	67
Tabelle 17: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Konusadaptern .....	69
Tabelle 18: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Konusadaptern ohne Berücksichtigung von dem Rissfaktor $kcr$ .....	70

## Zusammenfassung

Ziel des Projekts war die Entwicklung kreislauffähiger Konstruktionen für den mehrgeschossigen Holzskelettbau mit besonderem Fokus auf nichttragende, großformatige Außenwandelemente. Aufgrund ihres hohen Materialanteils und ihrer funktionalen Bedeutung nehmen Außenwände eine zentrale Rolle für die Kreislauffektivität von Gebäuden ein. Entsprechend standen die einfache Austauschbarkeit sowie die Wiederverwendbarkeit dieser Bauteile im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens. Ziel war es, Planende und Ausführende durch einen Konstruktionskatalog demontierbarer Ausfachungswände zu unterstützen, der systematisch Informationen zu reversiblen Verbindungstechniken bereitstellt.

Im Projekt wurden reversible Verbindungskonzepte für Holztafelbauelemente entwickelt und experimentell untersucht. Die Arbeiten umfassten die Konzeption und rechnerische Auslegung von Anschlussvarianten für nichttragende Außenwände in Holzskelettbauweise. Für die Varianten „eingestellt“ und „angehängt“ wurde ein standardisiertes Montage- und Verbindungskonzept erarbeitet, das auf dem Einsatz des Doppel-Konusverbinders sowie des Konusadapters basiert.

Der Doppel-Konusverbinder und der Konusadapter aus Kunstharzpressholz (KP) wurden gezielt für Anforderungen an eine zerstörungsfreie (De-)Montage bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit entwickelt. Zur experimentellen Verifizierung ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit wurden Druckscherversuche durchgeführt. Für Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 erreicht der Konusadapter einen charakteristischen Schertragwert in Faserrichtung von 33,2 kN, während für den Doppel-Konusverbinder eine Tragfähigkeit von 21,8 kN ermittelt wurde.

Zur Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit der entwickelten Verbindungskonzepte wurde ein Mock-up im Maßstab 1:1 realisiert. Der Baukörper weist einen Grundriss von 3 × 3 m bei einer Gesamthöhe von 3 m auf. Die Wandelemente wurden ohne Fensteröffnungen ausgeführt und entsprechend den entwickelten Anschluss- und Verbindungskonzepten montiert. Nach einem vollständigen Auf- und Abbau in der Werkstatt zur Prüfung der Reversibilität wurde das Mock-up zur Forschungshalle in Diemerstein transportiert und dort erneut errichtet. Auf diese Weise konnte die Funktionsfähigkeit der Verbindungsmittel und Anschlussdetails unter praxisnahen Bedingungen verifiziert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten Verbindungskonzepte eine zerstörungsfreie Montage und Demontage ermöglichen und die Reversibilität der Außenwandelemente in der Praxis gewährleistet ist. Die experimentellen Untersuchungen bestätigen zudem, dass der Einsatz standardisierter Verbindungsmittel sowohl architektonische als auch konstruktive Freiheitsgrade bewahrt und die Anpassungsfähigkeit von Gebäuden an unterschiedliche Nutzungsanforderungen erhöht.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse empfiehlt das Projektteam die Anwendung der entwickelten Verbindungskonzepte in realen mehrgeschossigen Holzskelettbauten. Darüber hinaus wird eine Weiterentwicklung der Verbindungsmittel im Hinblick auf Fertigung, Standardisierung und Vorfertigung vorgeschlagen. Die erarbeiteten Lösungen sollten in Konstruktionskataloge für Planende und Ausführende integriert werden, um eine breite Anwendung in der Baupraxis zu ermöglichen.

Das Vorhaben wurde in enger Kooperation mit Industriepartnern (Gumpp & Maier GmbH, Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG, best wood SCHNEIDER® GmbH, RAMPA GmbH & Co. KG und Hilti Deutschland AG) durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 38598/01-25 gefördert. Der vollständige Abschlussbericht ist bei der Projektleitung sowie auf Anfrage bei der DBU einsehbar.

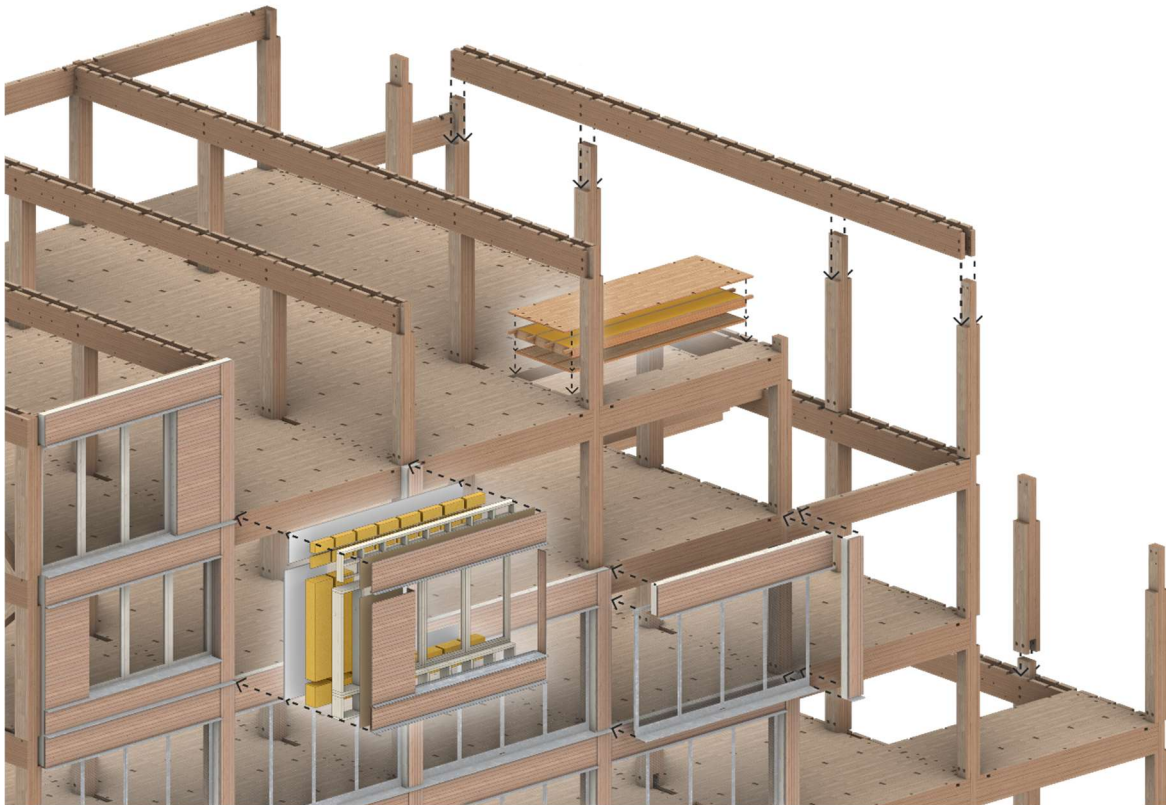
## 1 Einleitung

Angesichts der Klimakrise und der zunehmenden Erschöpfung natürlicher Ressourcen kommt dem Bauwesen eine besondere Verantwortung zu, da es einen erheblichen Anteil am globalen Ressourcenverbrauch und an den CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist. Vor diesem Hintergrund gewinnt das kreislaueffektive Bauen zunehmend an Bedeutung. Ziel ist es, Bauwerke so zu entwerfen und zu konstruieren, dass ihre Nutzungsdauer verlängert, der Materialeinsatz reduziert und Bauteile möglichst lange im Nutzungskreislauf gehalten werden können. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist die Nutzungsflexibilität von Gebäuden sowie die Wieder- und Weiterverwendbarkeit von Bauteilen und Bauelementen.

Der mehrgeschossige Holzskelettbau bietet hierfür besondere Potenziale. Durch die Trennung von Tragstruktur und Ausbau ermöglicht er flexible Grund- und Aufrissgestaltungen sowie eine nutzungsabhängige Anpassung der nichttragenden Bauteile. Die Aussteifung erfolgt in der Skelettebene, sodass Außen- und Innenwände unabhängig vom Tragwerk ausgeführt werden können (vgl. Abbildung 1). Insbesondere großformatige Außenwandelemente nehmen aufgrund ihres hohen Materialanteils eine zentrale Rolle für die Kreislaueffektivität eines Gebäudes ein. Ihre Austauschbarkeit und Wiederverwendbarkeit sind daher von besonderer umweltrelevanter Bedeutung.

Der Stand der Technik zeigt, dass Nutzungsflexibilität und Wiederverwendbarkeit im Holzbau bislang nur eingeschränkt umgesetzt werden. Zwar existieren vorgefertigte Außenwandsysteme in unterschiedlichen Bauweisen, diese sind jedoch häufig dauerhaft mit der Tragstruktur verbunden oder auf nicht reversible Verbindungsmittel angewiesen. Dies erschwert einen zerstörungsfreien Rückbau sowie eine geschossweise Anpassung der Gebäudehülle bei Nutzungsänderungen.

Vor diesem Hintergrund zielte das Forschungsvorhaben auf die Entwicklung kreislauffähiger Konstruktionen im mehrgeschossigen Holzskelettbau ab, mit besonderem Fokus auf nichttragende, großformatige Außenwandelemente. Ziel war es, Planenden und Ausführenden einen Konstruktionskatalog demontierbarer Ausfachungswände zur Verfügung zu stellen, der als praxisorientiertes Nachschlagewerk für reversible Verbindungstechniken dient. Die Zielsetzung entspricht den im bewilligten Antrag formulierten Vorgaben und umfasst die Entwicklung leicht lösbarer, wiederverwendbarer und standardisierter Verbindungslösungen für Holztafelbauelemente, die den Anforderungen des kreislaufgerechten Bauens gerecht werden.



**Abbildung 1: Wandelbarer Holzhybridbau mit differenzierten Ausbaustufen zur Ermöglichung nutzungsflexibler Gebäudestrukturen [1]**

## 1.1 Hintergrund und Notwendigkeit

Kreislaueffektives Bauen stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Transformation hin zu klimaneutralen und ressourcenschonenden Bauweisen dar. Durch ein gezieltes Entwerfen und Konstruieren im Sinne der Kreislaufwirtschaft kann die Nutzungsdauer von Bauwerken verlängert und der Ressourcenverbrauch reduziert werden. Zentrale Ansätze sind hierbei die nutzungsflexible Auslegung von Tragstrukturen sowie die Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen und Bauelementen.

Nutzungsflexibilität liegt vor, wenn unterschiedliche Nutzungen oder Ausbaustufen innerhalb eines Bauwerks mit minimalem baulichem Aufwand realisiert werden können. Dies setzt eine Tragstruktur voraus, die verschiedene Nutzungsanforderungen ohne konstruktive Änderungen aufnehmen kann. Ergänzend müssen Außenwandbauteile austauschbar ausgeführt und Innenwände als nichttragende Elemente konzipiert werden.

Die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen wird insbesondere durch Elementierung, Standardisierung und Reversibilität erreicht (Abbildung 2). Standardisierte Verbindungsmittel, beispielsweise Konusadapter, ermöglichen die Kombination unterschiedlicher Bauteile und Bauelemente. Dadurch bleiben architektonische und konstruktive Freiheitsgrade erhalten, während gleichzeitig Anpassungen bei Nutzungsänderungen ohne Eingriffe in die Tragstruktur möglich werden.

## Einleitung

BT1: Außenwand: Brettsperrholzbauweise

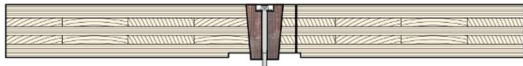
BE1.1: äußere Bekleidung



BE1.2: Dämmebene



BE1.3: Konstruktionsebene

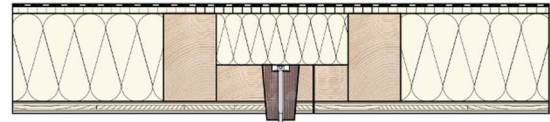


BT3: Außenwand: Holztafelbauweise

BE3.1: äußere Bekleidung



BE3.2: Konstruktions- und Dämmebene



BT2:  
Haupttragwerk



BT2:  
Haupttragwerk

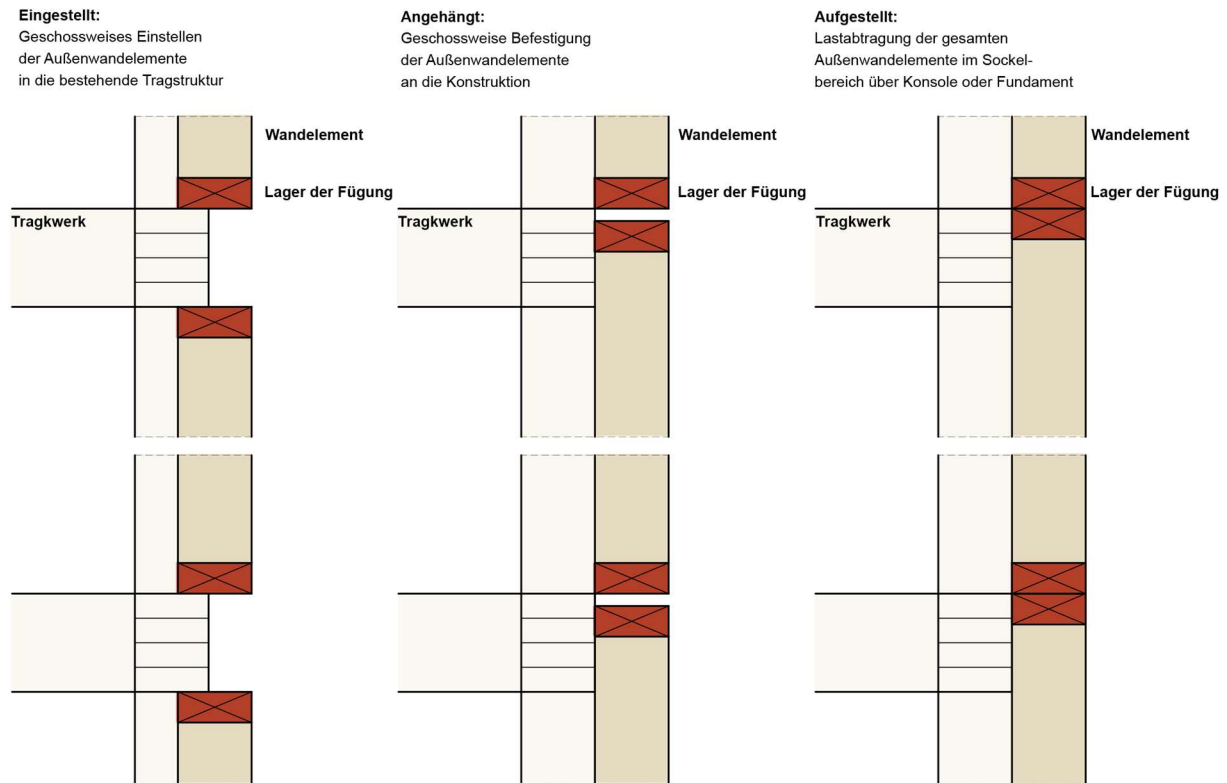


**Abbildung 2: Demontierbare Außenwände in Brettsperrholzbauweise (links) und Holztafelbauweise (rechts) mit reversibler Verbindung mittels Konusadaptern aus Kunstharzpressholz (KP). BT bezeichnet Bauteil, BE bezeichnet Bauelement.**

Graf et al. [2] zeigen, dass durch konsequente Nutzungsflexibilität sowie Wieder- und Weiterverwendung langfristig Einsparungen von bis zu 80 % bei CO<sub>2</sub>-Emissionen und Ressourcenverbrauch erzielt werden können. Daraus ergibt sich für Planende die Herausforderung, bereits in der frühen Entwurfs- und Konstruktionsphase Tragstrukturen zu entwickeln, die unterschiedliche Nutzungsanforderungen unterstützen. Gleichzeitig sind Bauteile und Bauelemente erforderlich, die reversibel und leicht demontierbar sind. Dies bedingt die Entwicklung geeigneter Verbindungsmittel für eine zerstörungsfreie Montage und Demontage im Holzbau.

### 1.2 Anschlussvarianten der Holztafelbauelemente an Tragwerke von Skelettbauten

Um eine geschossweise Anpassung der Fassadengestaltung bei Nutzungsänderungen zu ermöglichen, müssen Außenwandelemente als nichttragende Bauelemente ausgelegt sein. Diese übernehmen ausschließlich Eigengewicht und Windlasten, wodurch ein Austausch einzelner Geschosse unabhängig voneinander möglich wird. Für diese Anwendungsfälle eignen sich insbesondere die Anschlussvarianten „eingestellt“ und „angehängt“ (Abbildung 3). Bei der Variante „aufgestellt“ hingegen werden die Lasten über gestapelte Wandelemente direkt in das Fundament abgetragen, sodass eine geschossweise Demontage nicht möglich ist.



**Abbildung 3:** Anschlussvarianten von Holztafelbauelementen an die Tragstruktur von Skelettbauten. Die Holztafelbauelemente sind beige dargestellt, die Anschlusspunkte rot markiert.

Zwischen den Außenwandelementen als Konstruktionsebene und der Tragstruktur des Skelettbaus sind reversible Verbindungskonzepte mit ausreichender Tragfähigkeit erforderlich. Die Verbindungsmittel werden überwiegend durch Windsogbeanspruchung auf Zug- und Scherkräfte belastet, während das Eigengewicht der Wandelemente vom Haupttragwerk aufgenommen wird. Für die Varianten „eingestellt“ und „angehängt“ wird daher ein standardisiertes Montage- und Verbindungskonzept angestrebt, das sowohl auf neu entwickelten Verbindungsmitteln als auch auf konventionellen Holzbauverbindern basiert.

### 1.3 Reversible Verbindungskonzepte für nichttragende Holztafelbauelemente

Nichttragende Außenwandelemente sind Bestandteile der Gebäudehülle, die keine tragende Funktion im statischen System übernehmen und lediglich Eigengewicht sowie Windlasten abtragen. Sie erfüllen Funktionen wie Witterungs-, Wärme- und Schallschutz, Brandschutz sowie gegebenenfalls gestalterische Aufgaben der Fassadengestaltung.

Diese Eigenschaften ermöglichen eine nachträgliche Anpassung oder den Austausch der Bauteile, ohne die Gesamtstandsicherheit des Bauwerks zu beeinträchtigen. Voraussetzung hierfür sind reversible Verbindungskonzepte und Verbindungsmittel, die eine einfache Montage und Demontage erlauben, ohne dass die mechanischen Eigenschaften der Verbindung dauerhaft beeinträchtigt werden.

Die einfache (De-)Montage erfordert zudem, dass auf der Baustelle keine nachträglichen Eingriffe an den Bauelementen notwendig sind. Die Verbindungsmittel sollen daher bereits während der Vorfertigung in die Wandelemente integriert werden und eine Montage sowie Demontage von der Innenseite des Gebäudes ermöglichen.

#### **1.4 Reversible Verbindungsmittel**

Zur Umsetzung der reversiblen Verbindungskonzepte wurde ein Verbindungsmittel aus Kunstharzpressholz (KP) entwickelt: der Doppel-Konusverbinder. Ergänzend wurde die Tragfähigkeit eines Konusadapters untersucht, um das Verbindungskonzept auch für alternative Einsatzszenarien zu validieren. Die mechanische Leistungsfähigkeit der Verbindungsmittel wurde experimentell überprüft und bildet die Grundlage für ihre Anwendung in den entwickelten Anschlussvarianten.

#### **1.5 Mock-Up in M 1:1**

Zur Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit der reversiblen Verbindungskonzepte wurde ein Mock-Up im Maßstab 1:1 realisiert. Das Tragwerk wurde in Originalquerschnitten ausgeführt, während Grundriss und Höhe unter Berücksichtigung der Montage- und Transportbedingungen angepasst wurden. Der Grundriss des Mock-Ups beträgt  $3 \times 3$  m bei einer Gesamthöhe von 3 m.

Die Wandelemente wurden ohne Fensteröffnungen gefertigt und entsprechend den entwickelten Verbindungskonzepten montiert. Zur Verifizierung der Reversibilität wurde das Mock-Up zunächst in der Werkstatt vollständig auf- und abgebaut und anschließend in der Forschungshalle in Diemerstein erneut errichtet.

## 2 Hauptteil

Das folgende Kapitel behandelt die zentralen Arbeitsschritte zur Entwicklung, konstruktiven Ausarbeitung und Bewertung zirkulärer Außenwandelemente in Holztafelbauweise. Im Mittelpunkt steht die Erarbeitung eines Konstruktionsansatzes, der die Wiederverwendung von Bauelementen ermöglicht und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung sowie zur Reduktion grauer Emissionen im Bauwesen leistet. Hierzu werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Konstruktion – insbesondere Transportierbarkeit, Vorfertigungsgrad, geometrische Abmessungen und Montagetypologien – systematisch analysiert und in den Entwurfsprozess integriert. Ergänzend zur konstruktiven Betrachtung werden herstellungs-, montage- und rückbauorientierte Aspekte berücksichtigt, um die technischen Voraussetzungen für eine zerstörungsfreie Demontage und Wiederverwendung der Bauelemente sicherzustellen.

### 2.1 Konstruktive Grundlagen und Randbedingungen

#### – Anforderungen an Außenwände im Holzskelettbau

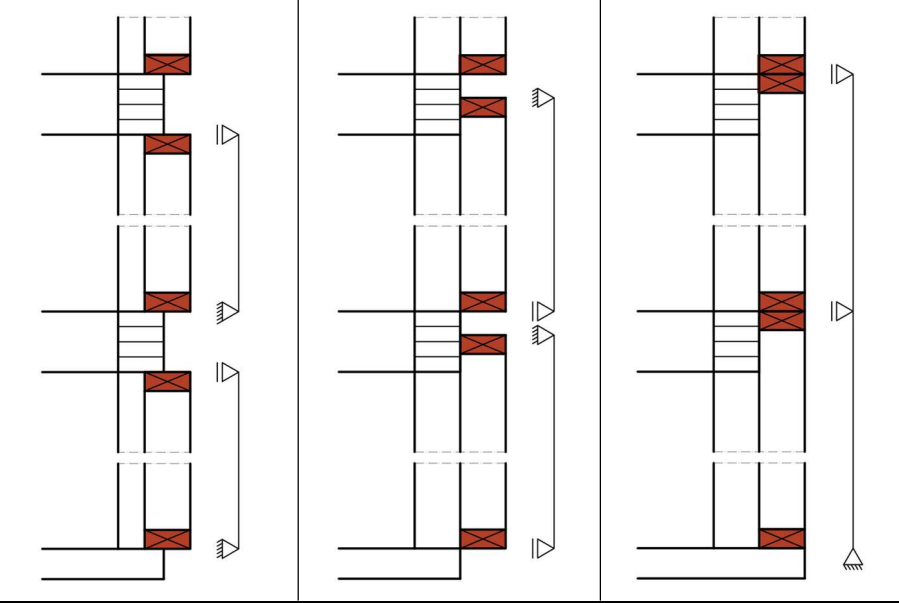
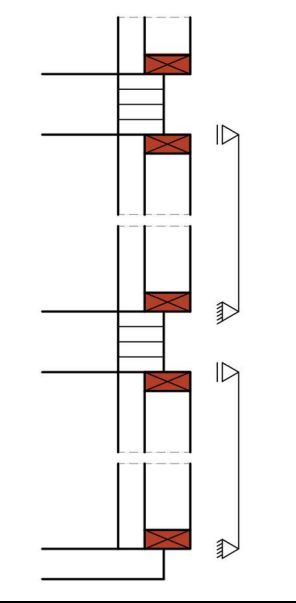
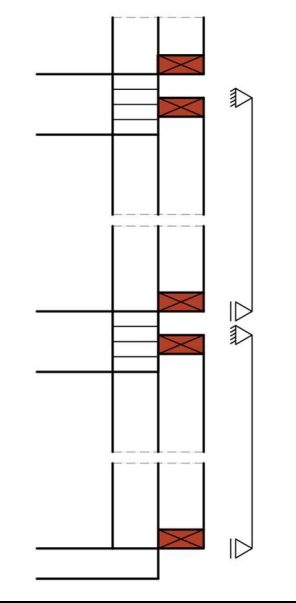
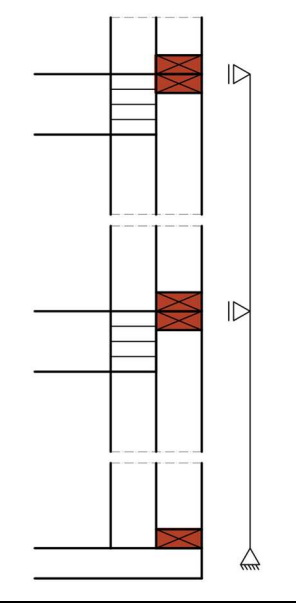
Die Verlängerung der Lebensdauer mehrgeschossiger Holzgebäude stellt eine zentrale Maßnahme zur Reduktion grauer Emissionen im Bauwesen dar. Voraussetzung hierfür ist, dass bereits in der Planungsphase unterschiedliche Nutzungen berücksichtigt werden, die innerhalb eines Gebäudes kombiniert oder im Laufe der Nutzungsdauer verändert werden können. Eine hohe Nutzungsflexibilität im Holzbau kann insbesondere durch die Standardisierung der Tragstruktur erreicht werden. Dabei sind wesentliche Randbedingungen wie das Tragwerksraster, die Geschosshöhen sowie die lichten Höhen der einzelnen Nutzungen frühzeitig zu definieren und aufeinander abzustimmen [2].

Unabhängig von einer standardisierten Tragstruktur ist es jedoch nicht möglich, Außenwände zu entwickeln, die für sämtliche Nutzungen gleichermaßen geeignet sind. Bauphysikalische und funktionale Anforderungen, beispielsweise an den Wärmeschutz, die Anordnung und Höhe von Fensteröffnungen oder die Installationsebenen, unterscheiden sich deutlich zwischen Wohn-, Arbeits- und Parknutzungen. Aus diesem Grund müssen Außenwände nutzungsspezifisch konstruiert werden. Gleichzeitig ist anzustreben, dass ein geschossweiser Austausch der Außenwandelemente möglich bleibt. In diesem Zusammenhang werden Außenwände als nichttragende Bauelemente definiert, die ausschließlich ihr Eigengewicht sowie die auf sie einwirkenden Windlasten aufnehmen [3].

Für die reversible Montage und Demontage der Außenwandelemente werden zwei Befestigungstypen an der Tragstruktur betrachtet: die Varianten „eingestellt“ und „vorgehängt“ [4]. Bei der aufgestellten Befestigung wird die vertikale Eigenlast der Außenwände über die gestapelten Wandelemente in das Fundament abgeleitet, wodurch ein geschossweiser Austausch der Elemente erheblich eingeschränkt wird. Die vorgehängte sowie die eingestellte Befestigung ermöglichen hingegen eine reversible Montage und Demontage der Außenwandelemente, ohne die Tragstruktur zusätzlich zu beanspruchen, und unterstützen damit die Wiederverwendbarkeit der Bauelemente (siehe Tabelle 1).

Neben der Möglichkeit zur geschossweisen Montage und Demontage bieten nichttragende Außenwände Vorteile in Bezug auf den Brandschutz. Sie müssen lediglich feuerhemmend ausgeführt werden (F30-D), wodurch der Einsatz biogener Dämmstoffe erleichtert wird [5]. Für die Beplankung sind einlagige Gips- oder Holzwerkstoffplatten mit einer Dicke von etwa zehn bis fünfzehn Millimetern ausreichend, abhängig vom eingesetzten Plattenmaterial und den jeweiligen bauaufsichtlichen Nachweisen [3].

**Tabelle 1: Statisches System von Außenwandelementen in Abhängigkeit der Anschlussvariante. Die Basisdaten wurden aus [4] übernommen.**

Anschlussvariante	Eingestelltes Außenwandelement	Vorgehängtes Außenwandelement	Aufgestelltes Außenwandelement
<p><b>Beispiel</b></p> 			
<p><b>Statisches System</b></p>	<p>Einfeldsystem, geschossweise innerhalb des Tragwerks</p>	<p>Einfeldsystem, geschossweise außerhalb des Tragwerks</p>	<p>Eigenständiges statisches System in einer Ebene außerhalb des Tragwerks</p>

**– Kriterien für Demontierbarkeit und Wiederverwendung**

Wiederverwendung bezeichnet den erneuten Einsatz eines Bauelements in einer weiteren Nutzungsphase unter Beibehaltung seiner stofflichen Zusammensetzung, seiner geometrischen Gestalt und seiner ursprünglichen Funktion [6]. Voraussetzung hierfür ist, dass während der Montage und insbesondere bei der Demontage keine Beschädigungen auftreten, die die Funktionalität oder die strukturelle Integrität des Elements beeinträchtigen. Die Demontage muss daher mittels geeigneter Verbindungstechniken zerstörungsfrei erfolgen, sodass die Bauelemente ohne Nacharbeit in einem anderen Gebäude erneut eingesetzt werden können.

Für eine effektive Wiederverwendung sind sowohl konstruktive als auch praktische Kriterien zu erfüllen. Die Bauelemente müssen handhabbar und transportierbar sein, sowohl manuell als auch unter Einsatz üblicher Hebe- und Transportmittel, und ihre Eignung für Transport und Zwischenlagerung zwischen Rückbau und Wiederverwendung behalten. Einheitliche geometrische Abmessungen sowie standardisierte Anschlussdetails erleichtern die Montage auf unterschiedlichen Baustellen und stellen die Kompatibilität der Verbindungssysteme sicher. Darüber hinaus tragen eine eindeutige Kennzeichnung der Bauelemente sowie eine begleitende Dokumentation zur korrekten Zuordnung, Montage und Wiederverwendung bei. Um eine zeitlich versetzte Wiederverwendung zu ermöglichen, müssen abgebaute Bauelemente zudem eine ausreichende Witterungsbeständigkeit aufweisen. Sicherheitsaspekte sind dabei stets zu berücksichtigen, sodass Demontage, Transport und erneute Montage keine Gefährdung für beteiligte Personen darstellen [7].

Besondere Anforderungen ergeben sich für das Verbindungskonzept, das die Wiederverwendbarkeit der Bauelemente maßgeblich beeinflusst. Die Verbindungen müssen eine zerstörungsfreie Fügung ermöglichen, mehrere Montage- und Demontagezyklen ohne Funktionsverlust überstehen und eine einfache Handhabung mit geringem Werkzeugaufwand erlauben. Sie sollen eine eindeutige Orientierung und Positionierung der Bauelemente sicherstellen, Fertigungstoleranzen oder geringfügige Maßabweichungen ausgleichen und standardisiert ausgeführt sein, um den Einsatz in unterschiedlichen Gebäuden zu ermöglichen. Darüber hinaus ist eine schnelle Montage und Demontage bei gleichzeitig sicherem Gebrauch anzustreben. Schließlich ist auch die Rückbaubarkeit beziehungsweise Wiederverwendbarkeit der Verbindungsmittel selbst zu berücksichtigen, insbesondere für den Fall, dass ein Bauelement nicht erneut eingesetzt werden kann.

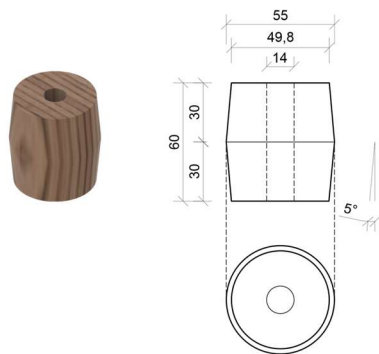
Insgesamt sollte ein geeignetes Verbindungskonzept die Montage und Demontage einfach, effizient und praxisgerecht gestalten, den Funktionsverlust der Bauelemente vermeiden und deren Wiederverwendung im Sinne einer kreislauffähigen Bauweise gewährleisten.

### – Fertigungs- und montagetechnische Anforderungen

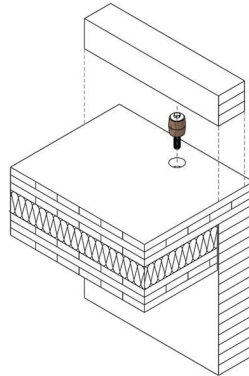
Die Vormontage der Verbindungsmittel in den Wandelementen stellt eine zentrale Voraussetzung für einen effizienten Bau- und Rückbauprozess sowie für die Wiederverwendbarkeit von Holztafelbauelementen dar. Sämtliche Verbindungsmittel sollten bereits werkseitig in die Wandelemente integriert werden, sodass die Elemente vollständig geschlossen auf die Baustelle transportiert werden können. Nachträgliche Bearbeitungen auf der Baustelle, etwa das Einbringen von Verbindungsmitteln vor Ort, sind möglichst zu vermeiden, da sie mit erhöhtem Zeitaufwand verbunden sind und die Bauelemente zusätzlichen Witterungseinflüssen aussetzen. Offene Stellen für Verbindungsmittel müssten andernfalls auf der Baustelle gegen Feuchtigkeit geschützt werden, was den Montageaufwand weiter erhöht.

Bereits in der Entwurfsphase sind daher Verbindungsmittel und Verbindungstechniken unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit der Verbindungsstellen sowie der Anforderungen an Demontage und Wiederverwendung zu planen. Im Rahmen des Projekts wurde zu diesem Zweck der Doppel-Konusverbinder entwickelt (siehe Abbildung 4), der sowohl eine Vormontage im Tragwerk als auch in den Wandelementen ermöglicht und eine zerstörungsfreie Montage und Demontage unterstützt. Die werkseitige Vormontage schützt die Verbindungsmittel während Transport und Lagerung, reduziert die Montagezeit auf der Baustelle und minimiert den Bedarf an Nacharbeiten.

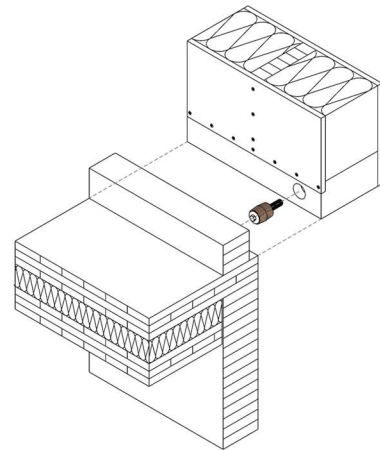
Doppel-Konusverbinder



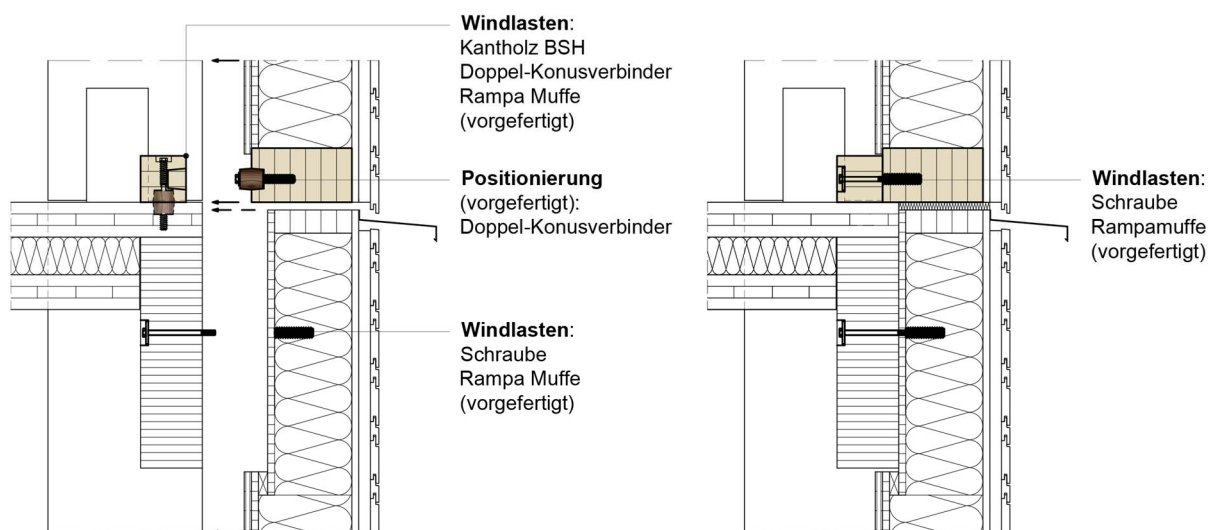
Schritt A



Schritt B



**Abbildung 4: Prinzipielle Darstellung eines fertigungs- und montagefreundlichen Verbindungskonzepts mit Doppel-Konusverbinder. Schritt A: Werkseitige Integration des Doppel-Konusverbinders in das Deckenelement; das Kantholz wird anschließend entweder werkseitig oder auf der Baustelle montiert. Schritt B: Vormontage des Doppel-Konusverbinders in der Schwelle des Wandelements zur Reduktion der Montagezeit auf der Baustelle und zur Vermeidung von Nacharbeiten an den Bauelementen vor Ort.**



**Abbildung 5: Reversibel demontierbares Verbindungskonzept mit Doppel-Konusverbinder und Rampa-Muffe zur kraftschlüssigen Befestigung nichttragender Holztafelbauelemente an der Tragstruktur.**

Die Abmessungen vorgefertigter Wandelemente werden maßgeblich durch Transport- und Montagebedingungen bestimmt. Für das Projekt [1] (siehe Abbildung 1) wurden Außenwandelemente für ein mehrgeschossiges Gebäude mit einem Tragwerksraster von 5,4 m und einer Geschosshöhe von 3,6 m entwickelt. Grundsätzlich wäre auch die Auslegung von Elementen mit doppelter Rasterweite (10,8 m Breite bei 3,6 m Höhe) möglich. Aufgrund des damit verbundenen erhöhten Eigengewichts sowie der handhabungstechnischen Herausforderungen bei Montage und Demontage wurde die Elementbreite jedoch auf 5,4 m begrenzt.

Bei der Festlegung der Abmessungen der Außenwandelemente wird die Herstellungsgenauigkeit besonders berücksichtigt. Die großen Elementformate führen zu erhöhten Toleranzanforderungen und erhöhen den Aufwand für Fertigung und Qualitätskontrolle. Da Holz als Naturmaterial maßliche Abweichungen aufweist, müssen diese bereits in der Planung

berücksichtigt werden. Insbesondere die Bauteile Schwelle und Rähm, in die die Verbindungsmittel integriert werden, werden in ihrer Länge begrenzt, um Maßabweichungen zu minimieren und eine präzise sowie reibungslose Montage der Wandelemente sicherzustellen.

### – Überblick über bestehende reversible Verbindungstechniken

Im Rahmen des Projekts beschränkt sich die Untersuchung reversibler Verbindungstechniken auf die am t-lab Holzarchitektur und Holzwerkstoffe der RPTU Kaiserslautern-Landau entwickelten Verbindungsmittel. Auf Grundlage der bisherigen Forschungsergebnisse konnten zwei formschlüssige Systeme identifiziert werden, die eine zerstörungsfreie Demontage und Wiederverwendung von Holzelementen ermöglichen: Scheibendübel [8] und Konusadapter (siehe Tabelle 2).

Die am t-lab entwickelten Scheibendübel orientieren sich konstruktiv am Einlassdübel Typ A [9] und erreichen in Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 eine charakteristische Schertragfähigkeit von bis zu 28,70 N/mm<sup>2</sup> [8]. Damit verfügen sie über eine hohe Tragfähigkeit für verbindungstechnische Anwendungen, bei denen die Kraftübertragung überwiegend durch Scherbeanspruchung erfolgt. Aufgrund ihrer geringen Einlasstiefe von lediglich 15 mm ist ihr Einsatz jedoch auf horizontale oder geneigte Montageebenen beschränkt. Bei vertikaler Einbaulage besteht die Gefahr eines Herausfallens vor dem Fügen der Gegenseite, was den Montageprozess erschwert.

Als Weiterentwicklung steht am t-lab der Konusadapter zur Verfügung, dessen konische Geometrie sowohl Scher- als auch Zugbeanspruchungen aufnehmen kann. Durch den Formschluss des Konusprofils ergeben sich mehrere funktionale Vorteile, darunter eine Selbstzentrierung beim Zusammenführen der Bauelemente, eine erhöhte Montagesicherheit auch in vertikaler Einbaulage sowie eine präzise Positionierung der Verbindungsmittel ohne zusätzliche Hilfselemente.

Die Anwendung des Konusadapters bei vorgefertigten Außenwandelementen ist jedoch mit Einschränkungen verbunden. Da seine Montage offene Fügungsstellen erfordert, die erst nachträglich geschlossen werden können, verlängert sich der Montageaufwand auf der Baustelle. Zudem steigen die Anforderungen an den Witterungs- und Feuchteschutz der Bauteile während Transport, Lagerung und Montage. Diese Aspekte wurden bereits im Abschnitt „Fertigungs- und montagetechnische Anforderungen“ vertieft behandelt.

Sowohl Scheibendübel als auch Konusadapter weisen in der Grenzfläche der Bauelemente einen Durchmesser von 65 mm auf. Unter Berücksichtigung der Mindestabstände zu Hirnholzenden und Bauteilrändern gemäß DIN EN 1995-1-1 [9] erfordert der Einsatz beider Verbindungsmittel entsprechend große Querschnitte der Baukomponenten. Diese normativen Randbedingungen beeinflussen die konstruktive Ausbildung der Außenwandelemente maßgeblich.

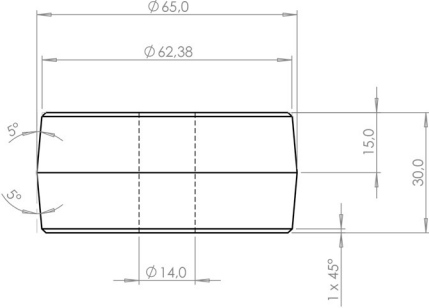
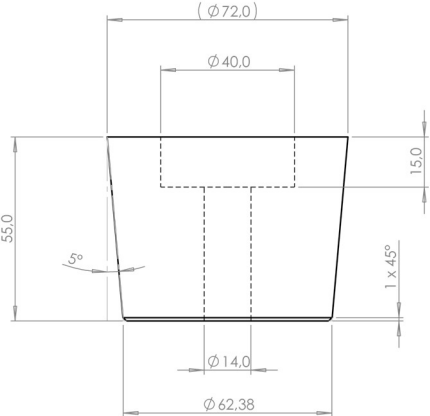
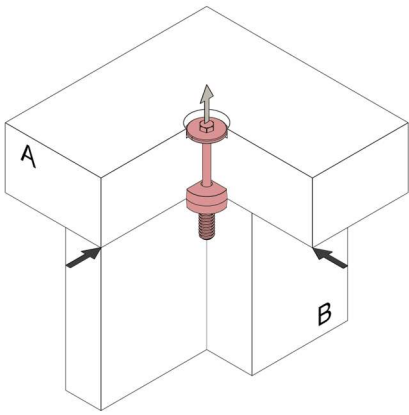
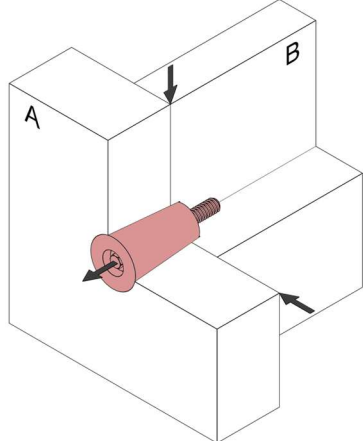
Insgesamt zeigen die bisherigen Untersuchungen, dass sowohl Scheibendübel als auch Konusadapter ein hohes Potenzial für reversible Verbindungssysteme im Holzbau besitzen. Während Scheibendübel eine effiziente Übertragung von Scherkräften bei vergleichsweise einfacher Geometrie ermöglichen, bietet der Konusadapter eine erweiterte Funktionalität hinsichtlich der Aufnahme kombinierter Beanspruchungen und der Montagesicherheit. Für den Einsatz im vorgefertigten Außenwandbau besteht jedoch weiterer Entwicklungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf die konstruktive Integration und den Schutz der Fügungsstellen.

Die Weiterentwicklung reversibler Verbindungssysteme sollte daher insbesondere darauf abzielen, eine vollständige werkseitige Vormontage der Verbindungsmittel zu ermöglichen

sowie die erforderlichen Querschnitte der Baukomponenten unter Einhaltung der Mindestabstände gemäß DIN EN 1995-1-1 [9] zu reduzieren.

Zusammenfassend ergeben sich aus den dargestellten konstruktiven, fertigungstechnischen und normativen Randbedingungen klare Anforderungen an reversible Verbindungssysteme für vorgefertigte Außenwandelemente im Holzskelettbau. Diese bilden die Grundlage für die im folgenden Kapitel dargestellte Entwicklung und Ausarbeitung eines angepassten Verbindungskonzepts.

**Tabelle 2: Vergleichende Bewertung der Reversibilität von Scheibendübeln und Konusadaptern.**

Verbindungs- mittel	Scheibendübel	Konusadapter
<p><b>Technische Zeichnung</b></p>		
<p><b>Anwendungs- szenarium</b></p>		
<p><b>Vorteile</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Tragfähigkeit für Scherbeanspruchung [8]</li> <li>- zerstörungsfreie Demontage</li> <li>- reversible Verbindung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufnahme von Scher- und Zugbeanspruchungen</li> <li>- Selbstzentrierung der Fügung</li> <li>- Präzise Positionierung ohne zusätzliche Hilfselemente</li> <li>- zerstörungsfreie Demontage</li> <li>- reversible Verbindung</li> </ul>
<p><b>Nachteile</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einsatz auf horizontale oder geneigte Montageebenen beschränkt</li> <li>- Gefahr des Herausfallens bei vertikaler Montage vor dem Fügen der Gegenseite</li> <li>- großer Querschnitt der Baukomponenten zur Einhaltung der Mindestabstände erforderlich</li> <li>- Vormontage in großformatigen Wandelementen nur eingeschränkt möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Offene Fügungsstellen erforderlich</li> <li>- Vormontage in geschlossenen Wandelementen nicht möglich</li> <li>- großer Querschnitt der Baukomponenten zur Einhaltung der Mindestabstände erforderlich</li> </ul>

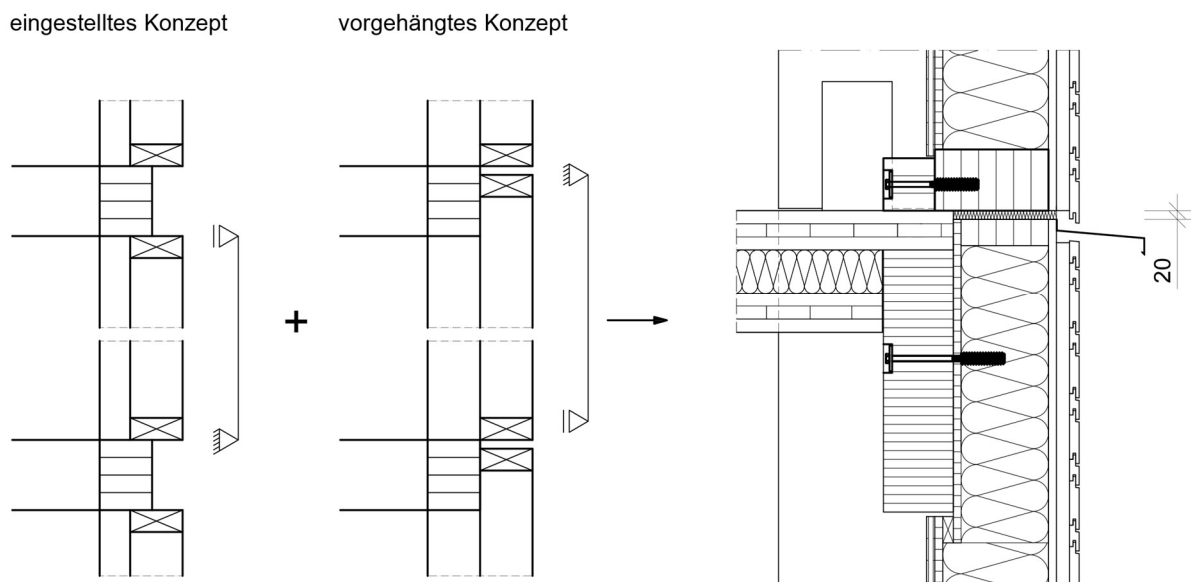
## 2.2 Entwicklung der Verbindungskonzepte

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt definierten Anforderungen an nichttragende Außenwände sowie der Analyse bestehender reversibler Verbindungstechniken werden im Folgenden die entwickelten Verbindungskonzepte und Verbindungsmittel vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der konstruktiven Ausgestaltung der Verbindungstechniken, ihrer Integration in vorgefertigte Wandelemente sowie der Sicherstellung einer zerstörungsfreien Montage und Demontage.

### – Konstruktive Varianten

In Abschnitt 2.1 wurden drei unterschiedliche Befestigungsmöglichkeiten von Außenwandelementen an der Tragstruktur beschrieben und im Hinblick auf ihre Eignung für eine geschossweise Demontage bewertet (siehe Tabelle 1). Voraussetzung für eine solche Demontage ist, dass die Wandelemente als nichttragende Bauelemente ausgeführt werden und die Befestigung einer der dort beschriebenen Varianten entspricht.

Die Vor- und Nachteile der Befestigungsvarianten „eingestellt“ und „vorgehängt“ sind in [4] beschrieben. Bei der eingestellten Befestigung entstehen durch montagebedingte Fugen größere Abstände zwischen Wandelement und Tragstruktur, was das Risiko von Wärmebrücken erhöhen kann. Um die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren, wurden im Projekt diese beiden Varianten konstruktiv zusammengeführt. Die entwickelten Wandelemente schließen nicht bis zur Unterkante des Tragwerks ab, sondern reichen bis zur Unterkante des darüberstehenden Elements. Zur Ermöglichung einer geschossweisen Demontage wird eine Fuge mit einer Breite von 2 cm vorgesehen, die nachträglich mit Dämmstoff gefüllt wird, um Wärmeverluste zu minimieren und gleichzeitig die erforderliche Montageflexibilität sicherzustellen (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6: Weiterentwickeltes Verbindungskonzept für Außenwandelemente auf Basis bestehender Befestigungsvarianten zur Ermöglichung einer geschossweisen Umbaubarkeit.**

Die Anschlussstellen der Wandelemente sind in Schwelle und Rähm angeordnet. Im Rähm werden Einschraubmuffen eingesetzt, während im Tragwerk entsprechende Bohrungen für die Verbindungsschrauben vorgesehen sind. Diese Bohrungen werden im Vergleich zu den Mindestanforderungen nach DIN EN 1995-1-1 [9] bewusst größer dimensioniert, um Bautoleranzen sowie Fertigungsungenauigkeiten auszugleichen. Für die entwickelten Varianten kommen Schrauben der Größe M12 zum Einsatz, wobei die Bohrungen mit einem

## Hauptteil

Durchmesser von 16 mm ausgeführt werden. Zur sicheren Ableitung des Eigengewichts werden die Wandelemente mit einer Auflagerbreite von 4 cm auf das Tragwerk gestellt, sodass die vertikalen Lasten zuverlässig in die Tragstruktur eingeleitet werden.

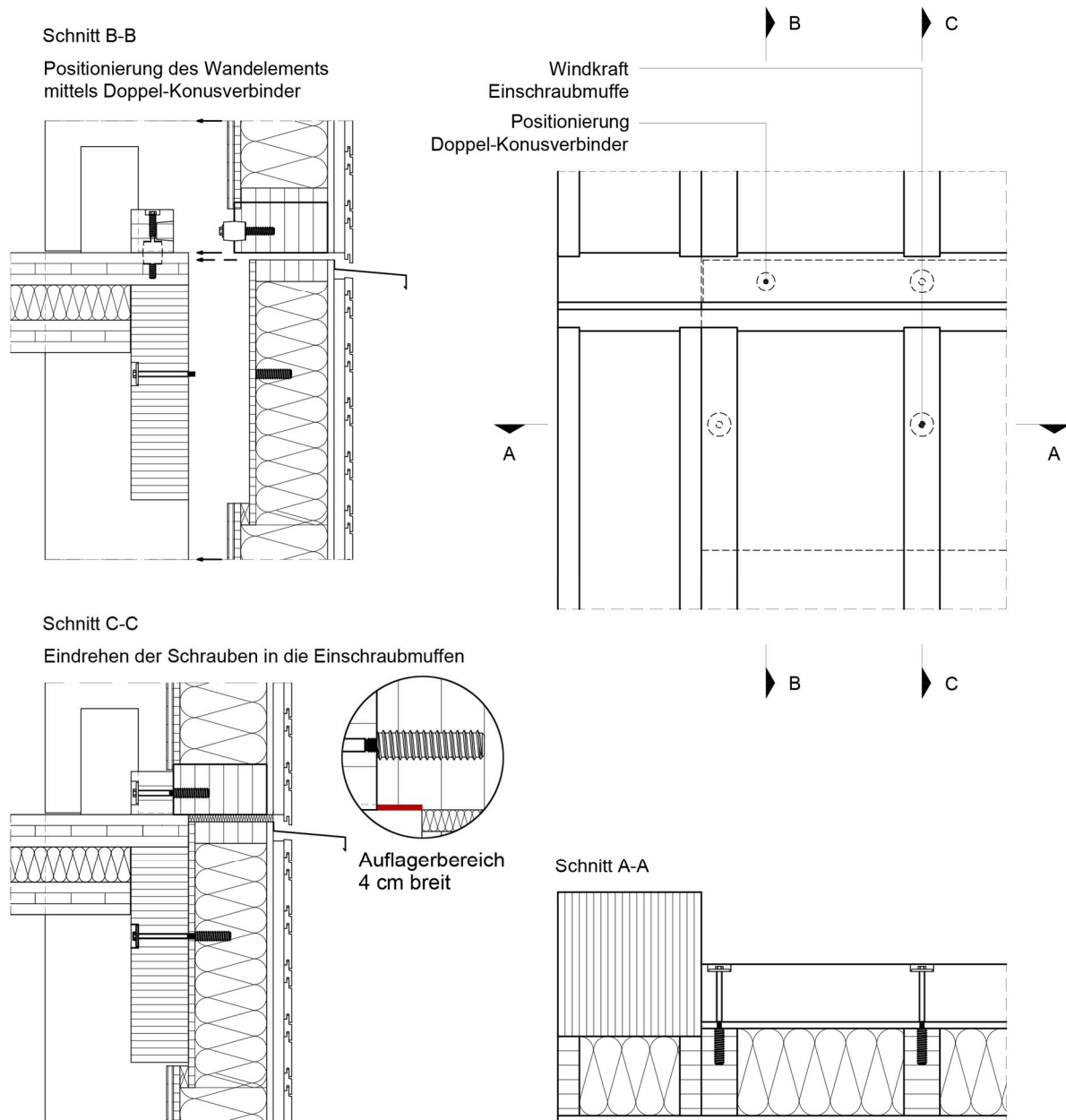
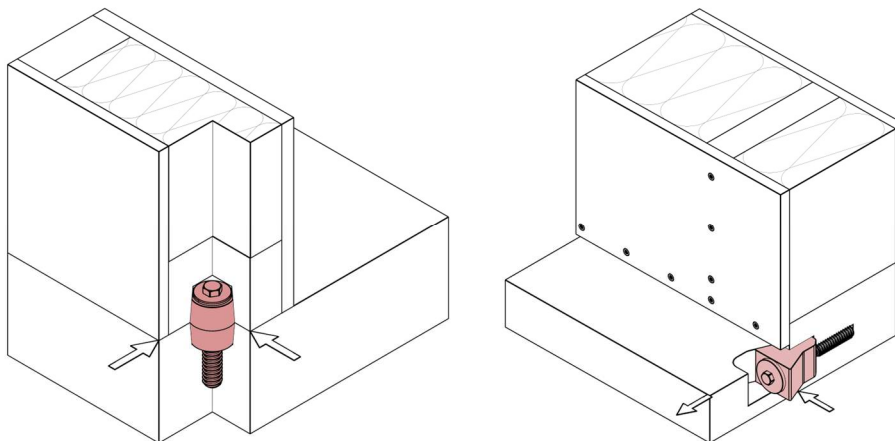


Abbildung 7: Darstellung der Anschlussstellen in den Ständern aus BSH GL24 sowie in der Schwelle aus BSH GL24.

In der folgenden Abbildung werden zwei entwickelte Varianten prinzipiell dargestellt.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der entwickelten Verbindungskonzepte. Links: Verbindungskonzept mit Doppel-Konusverbinder; rechts: Verbindungskonzept mit Schubverbinder (vgl. Abbildung 10).

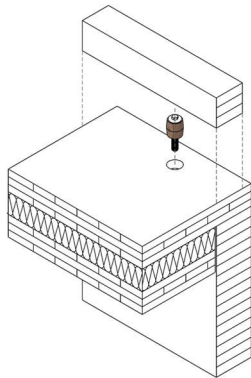
#### **Variante mit Doppel-Konusverbindern:**

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Doppel-Konusverbinder (siehe Abbildung 4) werden werkseitig in der Schwelle vormontiert und dienen der exakten Positionierung der Wandelemente im Tragwerk (siehe Schritt B in Abbildung 9). Da in der Ebene der Außenwand keine maßgebliche Scherbeanspruchung auftritt, sind zwei Doppel-Konusverbinder ausreichend, um die entstehenden Schubkräfte aufzunehmen. Die reduzierte Anzahl der Verbindungsmittel verkürzt die Bearbeitungszeit für die konischen Bohrungen und erhöht die Wirtschaftlichkeit des Systems. Alternativ kann die Positionierung über einen zentral in der Schwelle angeordneten Doppel-Konusverbinder erfolgen, wodurch der Einfluss von Fertigungs- und Maßabweichungen auf den Montageprozess weiter reduziert wird. Zur Aufnahme der Windlasten werden ergänzend Einschraubmuffen in der Schwelle eingesetzt.

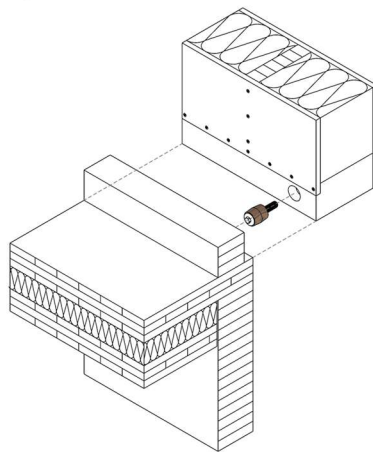
Im Tragwerk ist ein entsprechendes Gegenbauteil erforderlich, das sowohl die Windlasten aufnimmt als auch die präzise Positionierung der Wandelemente sicherstellt. Hierfür wird Kantholz aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 verwendet, da dieses gegenüber KVH C24 eine höhere Formstabilität aufweist und Fertigungsungenauigkeiten reduziert. Das Kantholz wird über Konusadapter oder Doppel-Konusverbinder mit dem Tragwerk verbunden. Die Montage kann weitgehend werkseitig vorbereitet werden, wobei großzügig dimensionierte Bohrungen die Montage auf der Baustelle erleichtern (siehe Schritt A in Abbildung 9).

Im Tragwerk wird ein entsprechendes Gegenstück benötigt, das sowohl die Windlasten aufnimmt als auch die Wandelemente korrekt positioniert. Hierfür wird Kantholz aus BSH GL24 verwendet, da es gegenüber KVH C24 formstabiler ist und Fertigungsungenauigkeiten reduziert. Das Kantholz wird entweder über Konusadapter oder Doppel-Konusverbinder mit dem Tragwerk verbunden. Die Montage kann werkstattseitig vorbereitet werden (siehe Abbildung 9).

Schritt A



Schritt B



**Abbildung 9: Prinzipielle Darstellung der Montage mit Doppel-Konusverbinder. Schritt A: Werkseitige Integration des Doppel-Konusverbinders in das Deckenelement; das Kantholz wird anschließend werkseitig oder auf der Baustelle montiert. Schritt B: Vormontage des Doppel-Konusverbinders in der Schwelle zur Reduktion der Montagezeit und zur Vermeidung von Nacharbeiten an den Bauelementen vor Ort.**

## Variante mit Schubverbindern:

In der zuvor beschriebenen Variante ist ein Kantholz im Tragwerk erforderlich, um das Wandelement zu positionieren und die Windlasten aufzunehmen. Dieses zusätzliche Bauteil erhöht den Materialeinsatz und kann bei Fertigungstoleranzen oder Rohmaterialverformungen die Einhaltung der Bautoleranzen erschweren, was den Montageprozess beeinträchtigen kann.

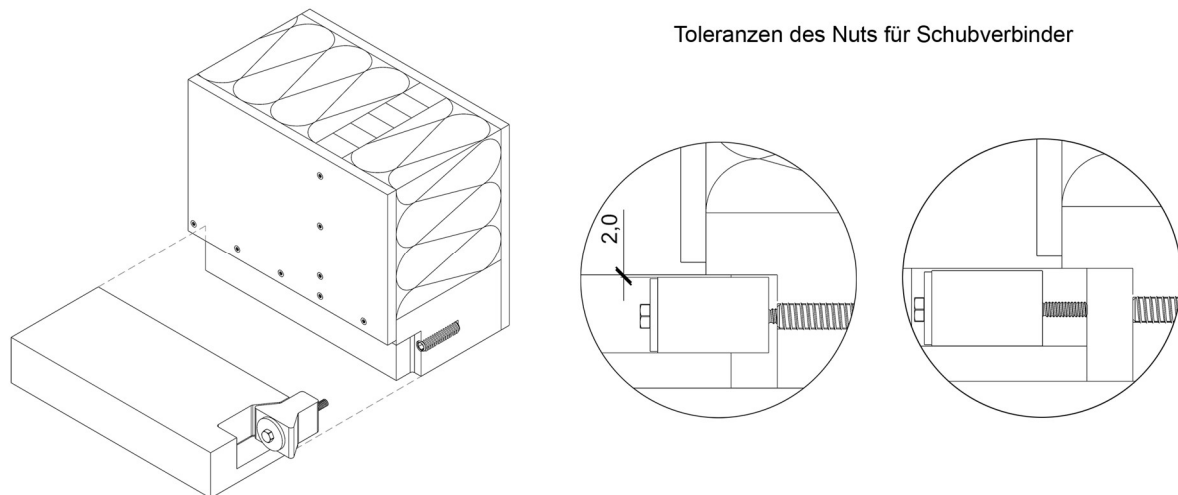
Zur Ermöglichung einer zerstörungsfreien Demontage kommen in dieser Variante ebenfalls Konusadapter oder Doppel-Konusverbinder zum Einsatz. Diese Verbindungsmittel erfordern jedoch aufgrund ihrer Geometrie zusätzliche Fräsvorgänge, die den Fertigungsaufwand erhöhen. Vor diesem Hintergrund wurde eine alternative Lösung mit einem Schubverbinder entwickelt. Im Projekt wurde hierfür ein Schubverbinder in Anlehnung an das HTC-P2P-System der Firma Hilti eingesetzt [10]. Durch den Einsatz des Schubverbinders kann auf das Kantholz verzichtet werden. Im Tragwerk wird mittels Fingerfräser eine Tasche ausgearbeitet, in die der Schubverbinder eingesetzt wird, der neben Scherkräften auch Zugkräfte infolge von Windlasten aufnehmen kann.



**Abbildung 10: Mock-Up mit Anwendung der Variante mit Schubverbinder**

Für die Montage der Schwelle mit Schubverbinder wird ein Falz mit einer Breite von 4 cm und einer Tiefe von 9 cm gefräst. An der Position des Schubverbinders wird zusätzlich eine durchgehende Nut von der Unterseite bis zur Oberkante des Tragwerks ausgearbeitet. Die Einschraubmuffen werden zuvor werkseitig in die Schwelle integriert. Die durchgehende Nut erleichtert die Montage, da das Wandelement von oben auf den Schubverbinder aufgesetzt werden kann und die Fuge während des Einbaus sichtbar bleibt. Dadurch kann die Position der Wandelemente bei Bedarf rechtzeitig angepasst werden.

Der Einsatz des Schubverbinders reduziert die Anzahl der für statische und montagebedingte Anforderungen erforderlichen Bauteile, insbesondere den Entfall des Kantholzes, und vereinfacht den Herstellungs- und Montageprozess insgesamt deutlich.



**Abbildung 11: Anordnung des Schubverbinders im Tragwerk**

### – Reversible Verbindungstechnik

Für die Wiederverwendung von Wandelementen und eine flexible Gebäudenutzung müssen die Außenwandelemente reversibel, das heißt lösbar und zerstörungsfrei demontierbar, mit dem Tragwerk verbunden werden.

Bei der Auslegung der Verbindungstechnik ist die Elementierung der Bauteile so zu wählen, dass einerseits die Anzahl der Elemente begrenzt bleibt und andererseits die Integration der Verbindungsmittel bereits in der Vorfertigung möglich ist. Eine zu kleinteilige Elementierung führt zu einem erhöhten Herstellungs- und Montageaufwand sowie zu einer unnötig komplexen Ausbildung der Verbindungen.

Die zuvor beschriebenen Varianten verdeutlichen zwei grundlegende Prinzipien reversibler Verbindungstechniken. Bei der ersten Variante wird zur Verbindung der Wandelemente ein zusätzliches Kantholz als Zwischenbauteil vorgesehen. Obwohl die Verbindungsmittel werkseitig in die Wandelemente integriert werden können, müssen sie zusätzlich in das Kantholz eingebaut werden, was zu einem erhöhten Materialeinsatz führt. Ein wesentlicher Vorteil dieser Variante liegt jedoch in der hohen Tragfähigkeit der Verbindung. Darüber hinaus ermöglicht die konische Geometrie des Doppel-Konusverbinders eine selbsttätige Positionierung der Bauelemente während der Montage, wodurch Bautoleranzen ausgeglichen werden können.

Die zweite Variante reduziert den Materialaufwand, indem auf ein zusätzliches Kantholz verzichtet wird. In der Schwelle werden von unten durchlaufende Nuten eingefräst, die der Positionierung der Wandelemente dienen. Diese Nuten ermöglichen eine Montage und

Demontage in zwei Richtungen: Die Wandelemente können entweder von oben auf das Tragwerk aufgesetzt oder von der Vorderseite eingeschoben werden. Die kraftschlüssige Verbindung mit dem Tragwerk erfolgt über metrische Schrauben.

Auf den Einsatz von Holzschrauben wird bewusst verzichtet, da deren Ausziehtragfähigkeit nach mehrfachem Ein- und Ausschrauben um etwa 10 % abnimmt [1]. Eine sichere statische Bemessung bei mehrfacher Nutzung solcher Schraubenkanäle ist daher nicht gewährleistet. Stattdessen werden metrische Schrauben eingesetzt, die ihre Tragfähigkeit im elastischen Verformungsbereich auch nach wiederholtem Ein- und Ausschrauben beibehalten.

Zur Verankerung der Schrauben im Gegenbauteil kommen Einschraubmuffen zum Einsatz, die dauerhaft im Bauteil verbleiben und über die gesamte Lebensdauer der Wandelemente wiederverwendet werden können. Damit wird die Grundlage für eine langlebige, reversible Verbindungstechnik geschaffen, die sowohl statisch zuverlässig als auch montagefreundlich ist.

Zusammenfassend beschreibt dieser Abschnitt die Entwicklung konstruktiver Varianten und Verbindungstechniken für vorgefertigte, nichttragende Außenwandelemente. Die vorgestellten Konzepte ermöglichen eine einfache, sichere und zerstörungsfreie Montage sowie eine geschossweise Demontage. Durch den gezielten Einsatz von Doppel-Konusverbindern, Konusadaptern und Schubverbindern werden die Wandelemente präzise positioniert, Windlasten zuverlässig aufgenommen und Bautoleranzen ausgeglichen.

Aufbauend auf der konstruktiven Entwicklung der Verbindungskonzepte in Kapitel 2.2 wird im folgenden Kapitel deren baupraktische Umsetzung betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Integration der Verbindungstechniken in vorgefertigte Wandelemente sowie auf der Montage und Demontage unter praxisnahen Bedingungen.

## 2.3 Baupraktische Umsetzung und Systemintegration

Die baupraktische Umsetzung des entwickelten Konstruktionssystems erfordert eine sorgfältige Abstimmung zwischen Entwurf, Fertigung, Montage und Demontage. Ziel ist es, die technische Realisierbarkeit der Wand- und Verbindungskonzepte unter realen Randbedingungen sicherzustellen und den hohen Vorfertigungsgrad so zu nutzen, dass Präzision, Effizienz und Reversibilität gleichermaßen gewährleistet werden.

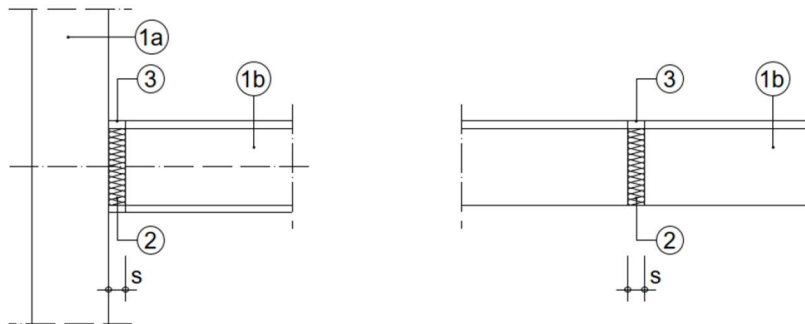
### – Fertigungstoleranzen und Zugänglichkeit der Anschlussstellen

Die Montage der entwickelten Wandelemente setzt die systematische Berücksichtigung von Fertigungs- und Montagetoleranzen sowie eine gute Zugänglichkeit der Anschlussstellen voraus, um eine sichere, präzise und zerstörungsfreie Montage und Demontage zu ermöglichen. Die zulässigen Maßabweichungen orientieren sich an den Fertigungstoleranzen für Holzbauteile gemäß DIN 18203-3 [11] sowie an den baustoffunabhängigen Toleranzen nach DIN 18202 [12].

**Tabelle 3: Grenzabweichungen für Wände nach DIN 18203-3 [11]**

	Nennmaße [m]	Grenzabweichungen [mm]
Breite, Höhe (Kantenlänge), Öffnung	bis 1,00 m	± 2 mm
	über 1,00 m	± 0,2 % des Nennmaßes maximal ± 5 mm

Die vertikale Fuge zwischen benachbarten Wandelementen wird mit 5 mm ausgelegt. Dieser Wert entspricht den zulässigen Grenzabweichungen für Wandtafeln mit einer Breite über 1 m nach DIN 18203-3 [11] (vgl. Tabelle 3). Zur brandschutztechnischen Abschottung werden die vertikalen Fugen mit Dichtungseinlagen aus mindestens normalentflammbaren Dämmstoffen ( $\rho \geq 50 \text{ kg/m}^3$ ) im unkomprimierten Zustand ausgefüllt (siehe Tabelle A 3.1 in [13]). Die horizontale Fuge zwischen übereinanderliegenden Wandelementen beträgt 20 mm und wird mit Dichtstreifen aus Mineralwollgedämmstoffen mit einem Schmelzpunkt  $\geq 1.000 \text{ °C}$  nach DIN 4102-17:2017-12 ( $\rho \geq 30 \text{ kg/m}^3$ ) versehen (siehe Tabelle A 3.1 in [13]).



a) Bauteilfuge

b) Elementfuge

1a raumabschließendes Bauteil Wand / Decke

1b raumabschließendes Bauteil Wand / Decke

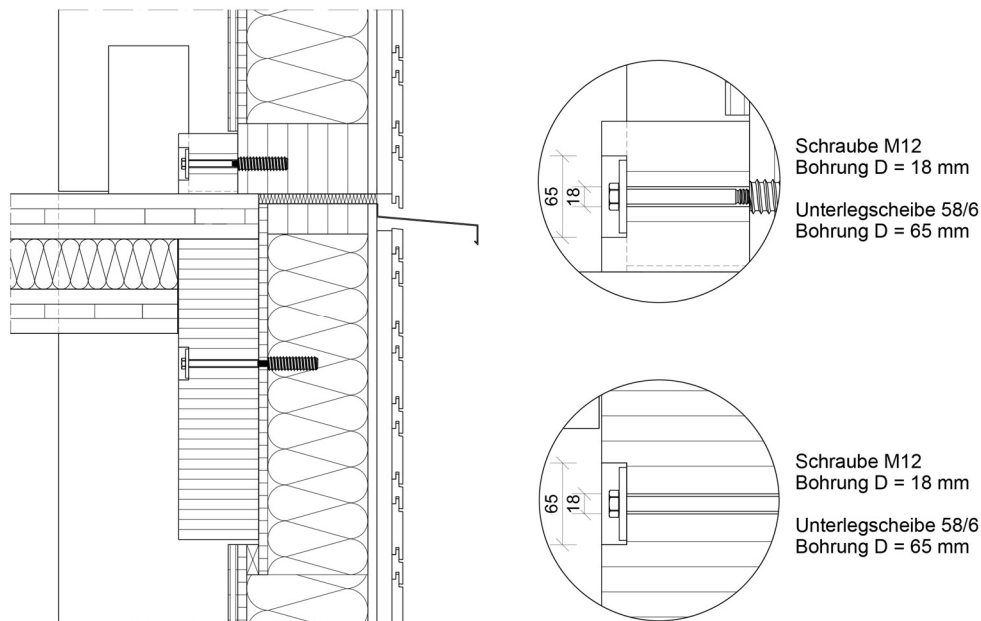
2 Maßnahme / Ausführung Kontaktfläche nach Tabelle A3.1

3 Maßnahme äußere Abdichtung (brandzugewandte bzw. brandabgewandte Seite) nach Tabelle A3.1

**Abbildung 12: Ausführung von Element- und Bauteilfugen – Zuordnung der brandschutztechnischen Maßnahmen nach Tabelle A 3.1 der MHolzBauRL 2024 [13]. Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13].**

Bei der Auslegung der Bohrungen für die formschlüssigen Verbindungsmittel, insbesondere für Doppel-Konusverbinder und Schubverbinder, werden die Fertigungs- und Montagetoleranzen gezielt berücksichtigt. Die Wandelemente werden so auf das Tragwerk aufgesetzt, dass das Eigengewicht vollständig über die Auflagerflächen eingeleitet wird, während die Verbindungsmittel ausschließlich zur Aufnahme der Windlasten dienen.

Die Bohrungen für Schrauben und Unterlegscheiben werden daher – im Vergleich zu konventionellen Ausführungen – unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen gemäß Tabelle 3 größer dimensioniert (siehe Abbildung 13). Dadurch wird sichergestellt, dass die Wandelemente vollflächig auf dem Tragwerk aufliegen und die Schrauben infolge unvermeidbarer Fertigungsabweichungen nicht zusätzlich durch ungewollte Scherbeanspruchungen belastet werden.



**Abbildung 13: Ausführung der Bohrungen an den Anschlussstellen zur Übertragung der Windlasten durch die Verbindungsmittel.**

Bei der Variante mit Schubverbindern wird in der Schwelle eine von unten umlaufende Nut ausgebildet, die ein präzises Einführen der Wandelemente ermöglicht (siehe Abbildung 11). Diese Ausbildung stellt sicher, dass die Elemente vollständig und lastgerecht auf dem Tragwerk aufliegen, sodass vertikale Lasten nicht über die Verbindungsmittel übertragen werden. Gleichzeitig trägt die nicht vollständig durchlaufende Nut zur Reduzierung von Luft- und Wärmeverlusten im Fugenbereich bei. Der Schubverbinder wird zusätzlich um 2 mm tiefer in die Deckenplatte eingelassen, um sicherzustellen, dass das Wandelement auch bei Fertigungstoleranzen auf dem Tragwerk und nicht auf dem Verbinder aufsetzt (siehe Abbildung 11).

Die eingesetzten formschlüssigen Verbindungsmittel weisen zudem eine selbstzentrierende Wirkung auf, sodass kleinere Montageabweichungen aufgenommen werden können, ohne die Funktionsfähigkeit oder die tragende Wirkung der Verbindung zu beeinträchtigen.

Für eine einfache Montage und eine zerstörungsfreie Demontage ist die Zugänglichkeit der Anschlussstellen von entscheidender Bedeutung. Nach dem Entfernen von Deckenaufbauten oder Installationsschichten müssen die Verbindungspunkte sichtbar und mit handelsüblichen Werkzeugen erreichbar sein. Bei der Variante mit Doppel-Konusverbindern sind die Schrauben mit Unterlegscheiben von der Innenseite zugänglich. Bei der Variante mit Schubverbindern ermöglicht die Nutgeometrie das Entfernen der Schrauben sowie des Schubverbinders, ohne das Wandelement bewegen zu müssen (siehe Abbildung 11).

Auch alle weiteren Verbindungspunkte bleiben von der Gebäudeinnenseite zugänglich. Dadurch ist gewährleistet, dass Montage, Kontrolle und Rückbau effizient und materialsparend erfolgen können und sämtliche Verbindungsmittel wiederverwendbar bleiben.

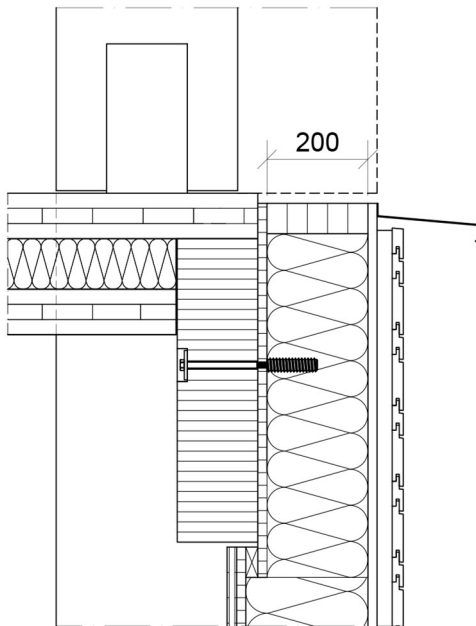
#### - Fertigungsdetails

Die Konstruktion der Wandelemente berücksichtigt die gewählte Konstruktionstypologie, brandschutztechnische Anforderungen, die Formstabilität der Baukomponenten sowie statische und fertigungstechnische Randbedingungen.

Wie in den Abschnitten 1.3 und 1.4 dargestellt, wurden unterschiedliche Befestigungsvarianten analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für eine geschossweise Demontage bewertet.

Für diesen Anwendungsfall werden die Außenwandelemente als nichttragende Bauelemente ausgeführt. Bestehende Verbindungstechniken werden übernommen und im Hinblick auf Montierbarkeit, Passgenauigkeit und Reversibilität weiterentwickelt.

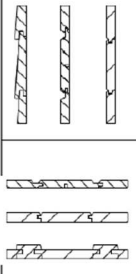
Im Übergangsbereich zwischen Tragwerk und Wandelement besteht ein erhöhtes Risiko der Ausbildung von Wärmebrücken. Zur Reduzierung dieses Effekts wird eine durchgehende Dämmschicht vor dem Tragwerk angeordnet, die fest in den Aufbau des Wandelements integriert ist. Dadurch kann sowohl die Anzahl der Einzelbauteile als auch der Montageaufwand reduziert werden. Auf Grundlage der Ergebnisse aus [1] wird die Dämmdicke auf 200 mm festgelegt.



**Abbildung 14:** Anordnung der Wärmedämmung vor dem Tragwerk zur Reduzierung von Wärmebrücken im Übergangsbereich zwischen Tragstruktur und Außenwandelement.

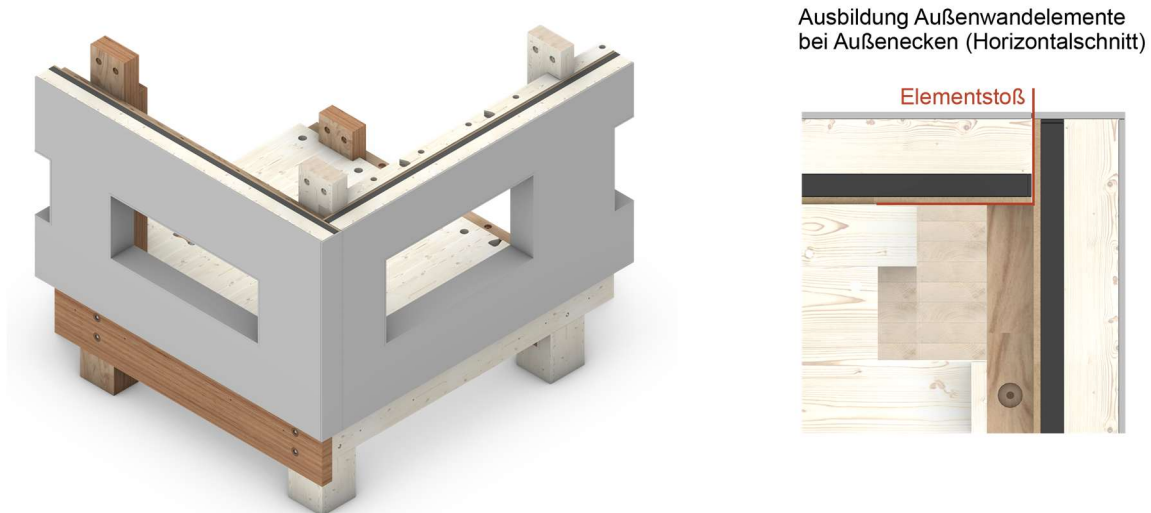
Da die betrachteten Außenwände nichttragend sind, lässt sich der brandschutztechnische Aufbau nach den Vorgaben aus [5] richten. Auf der Innenseite wird eine Holzwerkstoffplatte mit einer Dicke von 18 mm vorgesehen, auf der Außenseite eine Gipsplatte mit einer Dicke von 15 mm. Die Ausführung der Holzfaserdämmung erfolgt entsprechend den Vorgaben in Abschnitt 4.5 von [5].

Die Außenwandbekleidung folgt einem gestalterischen Prinzip: Im Bereich der Fensteröffnungen wird eine horizontale Bekleidung vorgesehen, während vor den Stützen eine vertikale Ausrichtung gewählt wird. Die Bekleidung wird als formschlüssige Schalung aus Fichte ausgeführt. Gemäß MHolzBauRL 2024 [13] beträgt der Mindestüberstand der horizontalen Brandsperre 100 mm zur Bekleidung.

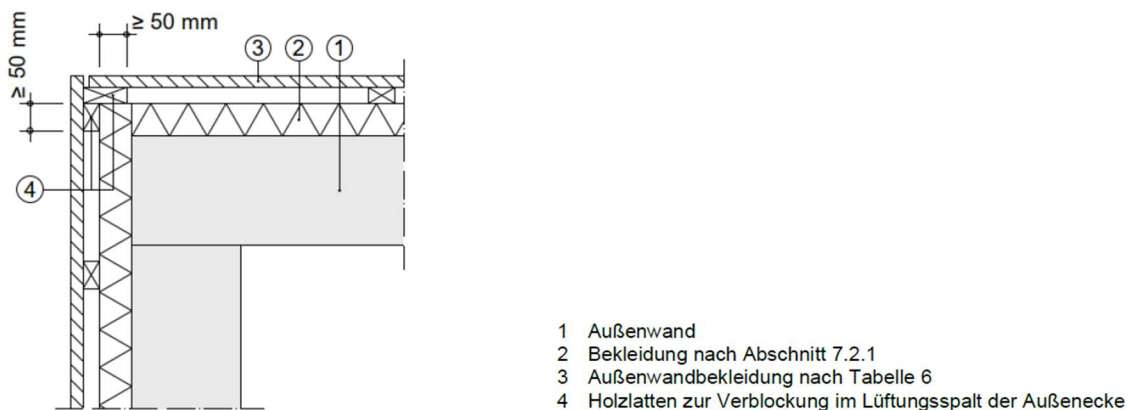
Form-schlüssige Schalung	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Rohdichte <math>\geq 350 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>■ Beplankungsdicke <math>\geq 20 \text{ mm}</math></li> <li>■ Brettbreite: kernfrei <math>\leq 160 \text{ mm}</math></li> <li>■ Entlastungs- und Schattennuten:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Restdicke <math>\geq 14 \text{ mm}</math></li> <li>■ Breite <math>\leq 5 \text{ mm}</math></li> <li>■ Achsabstand <math>\geq 30 \text{ mm}</math></li> </ul> </li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Deckleistenschalung mit Profil</li> <li>■ Nut und Feder</li> </ul>	horizontal	$\geq 50 \text{ mm}$
				vertikal	$\geq 100 \text{ mm}$

**Abbildung 15: Mindestanforderungen an die Baustoffe sowie Überstand der horizontalen Brandsperre gemäß Tabelle 6 der MHolzBauRL 2024 [13]. Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13].**

Im Bereich der Außendecken wird ein Wandelement bis zur Außenkante der Stütze geführt, während das benachbarte Element über die Stütze hinweg überlappt (Abbildung 16). Diese Überlappung stellt einen durchgängigen Schichtenaufbau sicher und trägt zur Reduzierung von Wärmebrücken im Eck- und Anschlussbereich bei. Die Ausbildung der Außenwandbekleidung im Außeneckenbereich erfolgt ebenfalls gemäß den Vorgaben der MHolzBauRL 2024 [13] (siehe Abbildung 17).



**Abbildung 16: Überlappende Anordnung von Außenwandelementen im Bereich der Außendecke (schwarze Streifen = Dichtband)**



**Abbildung 17: Ausbildung Außenwandbekleidung bei Außenecken (Horizontalschnitt). Abbildung übernommen aus der MHolzBauRL 2024 [13]**

Bei der Werkstoffauswahl für Schwellen, Rähme und Ständer wird die Formstabilität besonders berücksichtigt, da sie die Herstellungsgenauigkeit sowie den zuverlässigen Einsatz reversibler, formschlüssiger Verbindungsmittel maßgeblich beeinflusst. Brettschichtholz (BSH) weist hierbei eine deutlich höhere Dimensionsstabilität als Konstruktionsvollholz (KVH) auf, das empfindlicher auf Feuchteänderungen reagiert.

Die Schwelle übernimmt eine zentrale konstruktive Funktion im Übergangsbereich zwischen Tragwerk und Außenwandelement. Sie dient sowohl der sicheren Ableitung des Eigengewichts der Wandelemente und der Windlasten als auch der Integration der reversiblen Verbindungsmittel. Aus diesem Grund wird die Schwelle gegenüber konventionellen Abmessungen, beispielsweise einer Breite von 80 mm, stärker dimensioniert.

Zur Einleitung der Windlasten in die Tragstruktur wird ein Kantholz als Anschlussbauteil vorgesehen. Unter Einhaltung des Mindestabstands zum zugbeanspruchten Rand  $a_{4,t} = 0,8 d_c$  gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12 [9] ergibt sich eine erforderliche Mindestbreite von 88 mm ( $2a_{4,t}$ ). Entsprechend wird das Kantholz zunächst mit  $100 \times 120$  mm angesetzt und unter Berücksichtigung gängiger Querschnittsabmessungen schließlich mit  $120 \times 120$  mm festgelegt.

Für die Verbindung der inneren Beplankung aus OSB- und Dreischichtplatten werden Holzschrauben mit einem Durchmesser von 6 mm eingesetzt. Der Mindestabstand zum unbeanspruchten Rand beträgt gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12 [9] mindestens 30 mm ( $= 5d$ ). Daraus ergibt sich ein Abstand zwischen der Unterkante der inneren Beplankung und der Oberkante der Schwelle von insgesamt 60 mm (Parameter  $b$  in Abbildung 18). Zur Kompensation von Fertigungsungenauigkeiten wird zusätzlich ein 2 mm (Parameter  $d$  in Abbildung 18) breiter Spalt zwischen der inneren Beplankung und der Oberkante des Kantholzes vorgesehen.

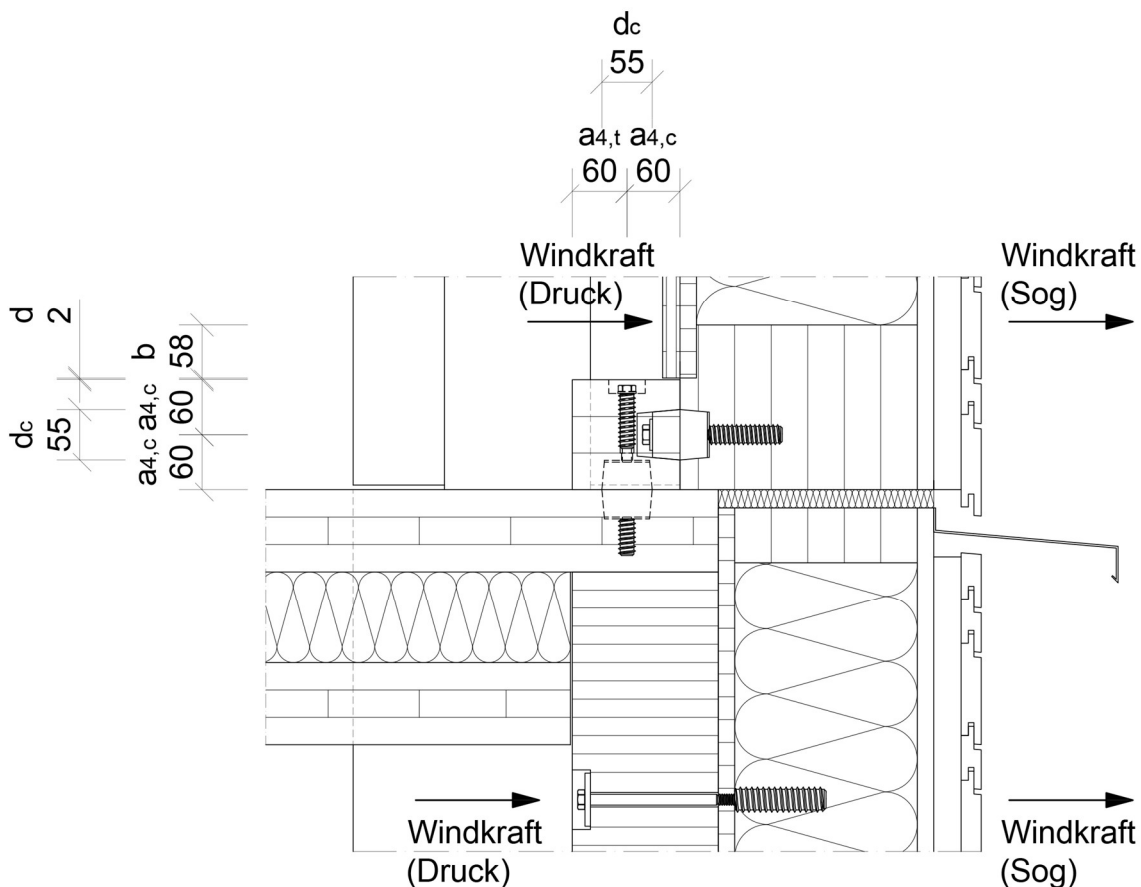


Abbildung 18: Anordnung der Doppel-Konusverbinder sowie Festlegung der Geometrien von Kantholz und Schwelle unter Berücksichtigung der Mindestabstände gemäß DIN EN 1995-1-1:2010-12 [9]

Die Breite der Ständer richtet sich nach den eingesetzten Einschraubmuffen ( $D = 22 \text{ mm}$ ,  $L = 80 \text{ mm}$ ). Der nach ETA 12/0481 [14] erforderliche Mindestabstand  $a_{4,c}$  beträgt  $1,5 \times D = 33 \text{ mm}$ , sofern die Muffen ausschließlich durch axiale Beanspruchung belastet werden. Daraus ergibt sich eine erforderliche Mindestbreite von  $66 \text{ mm}$ , die unter Berücksichtigung marktüblicher Querschnittsabmessungen mit  $80 \text{ mm}$  festgelegt wird.

Bei den nichttragenden Wandelementen sind Windlasten (siehe Anhang 5.2) und Eigengewicht (siehe Anhang 5.1) die maßgebenden Einwirkungen. Das Verbindungskonzept ist entsprechend bemessen und im Anhang 5.3 dokumentiert.

Für die Windlasten werden Einschraubmuffen (Außendurchmesser  $D = 22 \text{ mm}$ , Länge  $L = 80 \text{ mm}$ ) sowie Schrauben M12, FK 8.8 eingesetzt. Zusätzlich werden Doppel-Konusverbinder zur Übertragung der Windlasten in das Tragwerk verwendet. In Druckscherversuchen (siehe Kapitel 2.6) wurde für die Doppel-Konusverbinder eine charakteristische Schertragfähigkeit von  $21,8 \text{ kN}$  (siehe Anhang 5.5) ermittelt. Die Zugtragfähigkeit der eingesetzten Rampa-Muffen wurde gemäß ETA 12/0481 [14] ermittelt.

Auf Grundlage dieser Kennwerte werden die Anzahl und Abstände der Verbindungsmittel in Schwelle und Ständer festgelegt.

**Tabelle 4: Anordnung der Verbindungsmittel. Die zugehörigen Bemessungen sind im Anhang 5.3 erläutert.**

Verbindungsmittel	Stelle	Abstand
Muffe+Schraube	Schwelle	1,05 m
Doppel-Konusverbinder	Kantholz	1,585 m

Die Fertigungstoleranz der Bohrungen für die Doppel-Konusverbinder kann auf Grundlage des experimentell ermittelten Verschiebungsmoduls bestimmt werden. Dieses beträgt gemäß den Untersuchungsergebnissen  $16,3 \text{ kN/mm}$  (siehe Tabelle 15 im Anhang 5.5). Ein einzelner Doppel-Konusverbinder kann eine maximale Kraft von  $21,8 \text{ kN}$  übertragen. Unter der ungünstigsten Annahme, dass infolge von Fertigungsungenauigkeiten zunächst nur ein Verbinder an der Kraftübertragung beteiligt ist, ergibt sich bei Erreichen der Tragfähigkeit eine Verschiebung von  $1,33 \text{ mm}$ . Wird dieser Verschiebungswert überschritten, bevor benachbarte Verbinder ihre Tragwirkung aktivieren, kann ein lokales Versagen auftreten. Daher wird die zulässige Fertigungstoleranz der Bohrungen in den Anschlussbereichen auf  $1 \text{ mm}$  begrenzt.

Die Tragfähigkeit im Auflagerbereich wird unter Ansatz des angenommenen Eigengewichts der Wandelemente (siehe Abbildung 39 und Tabelle 6 im Kapitel 5.1) überprüft. Der Nachweis der Durchtragfähigkeit quer zur Faser ist für den  $4 \text{ cm}$  breiten Auflagerbereich erbracht (siehe Kapitel 5.3.1).

Abschließend wird das Dichtungskonzept für vertikale und horizontale Fugen festgelegt. Hierbei kommt ein Multifunktionsband zum Einsatz, das eine luftdichte Verbindung zwischen den einzelnen Wandelementen gewährleistet (siehe Abbildung 16).

#### - Entwicklung der Montage- und Demontagelogik

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Wandelemente sind für den Einsatz in mehrgeschossigen Gebäuden konzipiert. Bei der Entwicklung der Montage- und Demontagelogik stand insbesondere die einfache, sichere und reversible Handhabung der Elemente im Vordergrund. Durch die konstruktive Vereinfachung der Verbindungstechnik konnte der Montageprozess grundlegend erleichtert werden. Diese Vorgehensweise wurde durch den Aufbau

eines Mock-Ups im Maßstab 1:1 nachvollzogen und im Hinblick auf die praktische Umsetzbarkeit überprüft.

Die Montage der Wandelemente erfolgt geschossweise über Schwelle und Rähm (siehe Abbildung 18). Die präzise Positionierung und das Verschrauben sind so ausgelegt, dass die Bauteile auch unter Baustellenbedingungen mit üblichen Fertigungs- und Montagetoleranzen sicher gefügt werden können. Die vergrößerten Bohrungen ermöglichen dabei den Ausgleich kleiner Maßabweichungen, ohne die Tragfähigkeit der Verbindung zu beeinträchtigen (siehe Abbildung 13).

Zur Sicherstellung der Nutzungsflexibilität eines Gebäudes sowie der geschossweisen Rückbaubarkeit der Außenwandelemente wurde ergänzend ein Demontagekonzept entwickelt. Dieses beschreibt eine schrittweise Demontalogik, die den vollständigen Rückbau einzelner Wandelemente von der Gebäudeinnenseite aus ermöglicht. Sämtliche Verbindungsmittel sind dabei von innen zugänglich, sodass keine Eingriffe in die äußere Fassadenebene erforderlich sind.

Der Rückbau eines Wandelements erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitsschritten:

### 1. Lösen der Verbindungen

Der Rückbau beginnt mit dem Lösen der von der Innenseite zugänglichen Verbindungselemente. Hierzu werden die in Schwelle und Rähm angeordneten Schrauben systematisch entfernt. Das Lösen erfolgt mithilfe handelsüblicher Akkuschrauber oder Drehmomentschlüssel. Um eine geordnete Demontage sicherzustellen, werden die Schrauben nach einem definierten Schema – von der Mitte nach außen – gelöst, wodurch unkontrollierte Spannungen oder Verdrehungen in Wandelementen vermieden werden. In diesem Arbeitsschritt ist darauf zu achten, dass die Lastabtragung des Wandelements bis zur endgültigen Entkopplung durch temporäre Sicherungspunkte gewährleistet bleibt.

### 2. Temporäre Sicherung des Wandelements

Nach dem Lösen der Hauptverbindungen wird das Wandelement im oberen Rähmbereich durch temporäre Sicherungselemente gegen unbeabsichtigtes Kippen oder Ausfallen gesichert. Diese Sicherungen übernehmen eine Haltefunktion, bis das Element kontrolliert angehoben werden kann, und ermöglichen ein sicheres Arbeiten während des Demontageprozesses.

### 3. Anheben und Verschieben des Elements

Im nächsten Schritt wird das Wandelement mithilfe eines Hebezeugs leicht angehoben, sodass eine Trennung zwischen Schwelle und Tragwerk entsteht. Anschließend wird das Element vorsichtig nach außen verschoben, wodurch der Zugang zu den äußeren Verankerungspunkten ermöglicht wird. Für das Anheben werden in der Schwelle zuvor vorgesehene Nuten genutzt, in die die Gabelzinken des Hebezeugs eingeführt werden können.

### 4. Lösen der temporäre Sicherung

Nachdem das Wandelement angehoben und die äußeren Verankerungspunkte zugänglich sind, werden die temporären Sicherungselemente schrittweise entfernt. Dabei ist sicherzustellen, dass das Wandelement weiterhin durch das Hebezeug gehalten wird, um ein plötzliches Kippen oder Verdrehen zu vermeiden. In diesem Schritt wird überprüft, ob alle Verbindungsstellen spannungsfrei gelöst sind und keine verbleibenden Anhaftungen

zwischen Wandelement und Tragwerk bestehen. Erst nach erfolgreicher Kontrolle kann das Element vollständig aus der Fassadenebene herausgehoben werden.

### 5. Zwischenlagerung

Die Zwischenlagerung der demontierten Wandelemente erfolgt auf weichen, ebenen Unterlagen, um die Kontaktflächen zu schonen und Verformungen zu vermeiden. Durch diese Maßnahmen bleiben sowohl die Oberflächen als auch die Verbindungspunkte der Elemente unbeschädigt, sodass eine Wiederverwendung in einem späteren Bauprozess möglich ist.

Dieses Demontageprinzip stellt sicher, dass die Verbindungsmittel wiederverwendbar bleiben und die Bauelemente zerstörungsfrei rückgebaut werden können. Obwohl der vollständige Rückbauprozess im Maßstab 1:1 nicht praktisch durchgeführt wurde, bildet das entwickelte Konzept eine fundierte Grundlage für die Umsetzung in zukünftigen Bauprojekten. Die Erkenntnisse aus dem Mock-Up sowie aus der Entwicklung der Verbindungstechnik fließen unmittelbar in diese Logik ein und sichern deren technische Plausibilität.

Die entwickelten Arbeitsschritte für Montage und Rückbau gewährleisten die Wiederverwendbarkeit der Bauelemente und minimieren zusätzlichen Materialaufwand. Die technische Plausibilität wird durch den Aufbau und die Untersuchung eines Mock-Ups im Maßstab 1:1 gestützt.

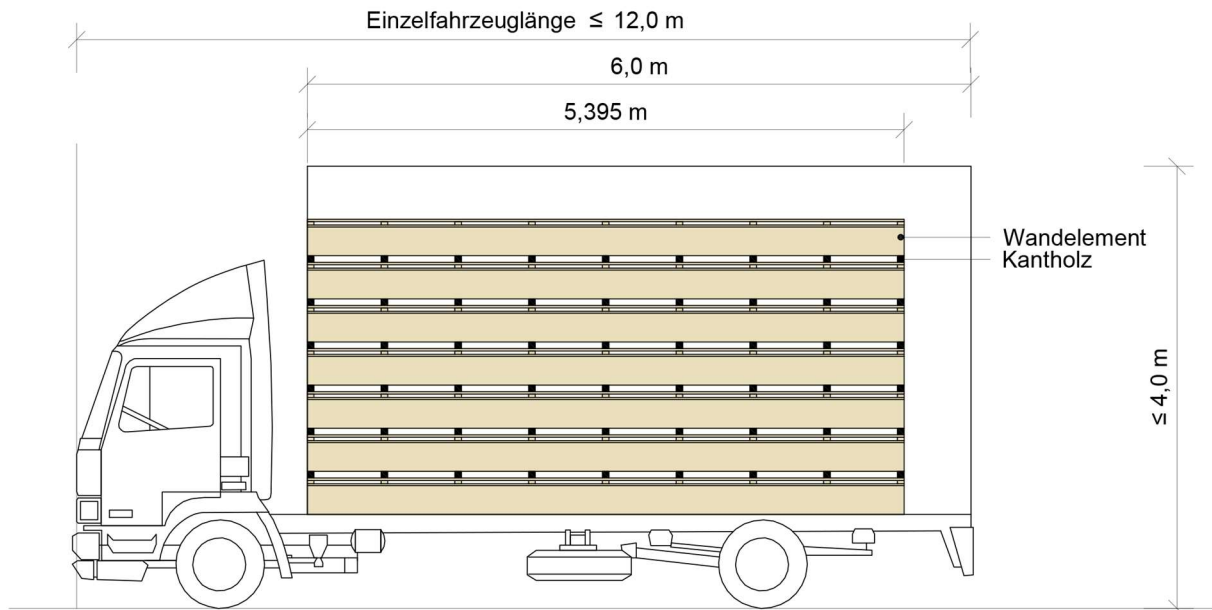
#### - **Transportierbarkeit**

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Wandelemente weisen Abmessungen von 5,40 m Breite und 3,60 m Höhe auf. Diese entsprechen einem typischen Tragwerkstraster mit einer Grundrasterweite von 1,35 m bei einer Geschosshöhe von 3,60 m [1].

Grundsätzlich könnten auch Wandelemente mit doppelter Rasterweite (10,80 m × 3,60 m) gefertigt werden. Aufgrund des damit deutlich erhöhten Eigengewichts sowie der erschwerten Handhabung bei Montage und Demontage wurde die maximale Elementbreite jedoch bewusst auf 5,40 m begrenzt. Diese Abmessung stellt einen ausgewogenen Kompromiss zwischen hohem Vorfertigungsgrad, Transportierbarkeit und Montagefreundlichkeit dar.

Gemäß der Straßenverkehrsordnung (StVO) § 22 [15] dürfen Fahrzeuge einschließlich Ladung eine maximale Breite von 2,55 m, eine Höhe von 4,00 m sowie eine Gesamtlänge von 20,75 m nicht überschreiten. In [4] wird empfohlen, Holztafelbauelemente mit einer maximalen Höhe von 3,70 m und einer Breite von bis zu 15,00 m auszulegen, um einen reibungslosen Transport und eine wirtschaftliche Montage sicherzustellen. Die im Projekt vorgesehenen Elementabmessungen liegen deutlich innerhalb dieser Grenzen, sodass die Anlieferung der Wandelemente ohne Sondergenehmigung erfolgen kann.

Für den Transport werden die Wandelemente liegend auf dem Lkw verladen. Zwischen den einzelnen Elementen sind Sicherungselemente und Abstandshalter vorzusehen, um Beschädigungen infolge von Reibung oder Schwingungen während des Transports zu vermeiden (siehe Abbildung 19). Diese Transportstrategie ermöglicht eine sichere und effiziente Lieferung der vorgefertigten Wandelemente von der Werkstatt zur Baustelle.



**Abbildung 19: Transport der vorgefertigten Wandelemente auf Einzelfahrzeugen in liegender Position.**

Auf Grundlage der beschriebenen baupraktischen Umsetzung und der entwickelten Verbindungstechnik bildet das Mock-Up im Maßstab 1:1 im nächsten Kapitel die Basis für den Nachweis der Reversibilität der Wandelemente. Kapitel 2.4 beschreibt die Umsetzung des Mock-Ups, die Erprobung der Montage- und Demontageabläufe sowie die Bewertung der Reversibilität und Wiederverwendbarkeit der Elemente unter realen Bedingungen.

## **2.4 Mock-Up und Nachweis der Reversibilität**

Zur Überprüfung der praktischen Umsetzbarkeit und der Reversibilität der entwickelten Wandelemente wurde ein Mock-Up im Maßstab 1:1 mit den Abmessungen  $3 \times 3$  m und einer Höhe von 3 m errichtet. Ziel war es, Montage, Demontage und Wiederaufbau unter realen Bedingungen zu erproben, die Wiederverwendbarkeit der Verbindungsmittel und Bauteile zu überprüfen sowie die konstruktive Funktionsfähigkeit unter praxisnahen Randbedingungen zu bewerten.

### **– Beschreibung des Mock-Ups**

Das Mock-Up wurde auf Basis der bisherigen Forschungsergebnisse aus [1] konzipiert. Dabei wurde insbesondere die Schnittstelle zwischen zwei Geschossen an den Außenecken eines Gebäudes nachgebildet, um die Verbindungssituation in konstruktiv kritischen Bereichen zu untersuchen. Unter Berücksichtigung der räumlichen Möglichkeiten wurden sowohl die Geschosshöhe als auch das Tragwerksraster für das Mock-Up skaliert. Fensterelemente in den Wandelementen wurden aufgrund der reduzierten Abmessungen bewusst nicht vorgehen.



**Abbildung 20: Eingebautes Mock-Up**

Die Stützen weisen einen quadratischen Querschnitt von  $40 \times 40$  cm auf. Ihre Verbindung untereinander erfolgt über eine Nut-Feder-Konstruktion [1], die zusätzlich mit Konusadaptern gekoppelt wird.



**Abbildung 21: Tragwerk mit der Nut-Feder-Konstruktion**

## Hauptteil

Die Hauptträger sind als Zangenkonstruktion aus BauBuche ausgeführt und ebenfalls mithilfe von Konusadaptern mit den Stützen verbunden. Die Randträger in Fassadenrichtung bestehen aus Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL28, da sie ausschließlich als Auflager für die Wandelemente dienen.



**Abbildung 22: Nebenträger aus GL 28h und Zangenträger aus BauBuche GL75**

Für die Deckenelemente kommen CLT-Box-Elemente der Firma best wood SCHNEIDER® zum Einsatz, die in einem anderen Projekt am t-lab weiterentwickelt wurden (siehe Abbildung 23). Zur Sicherstellung der erforderlichen lichten Höhe wird die obere BSP-Platte ausgeklinkt auf den Trägern gelagert.

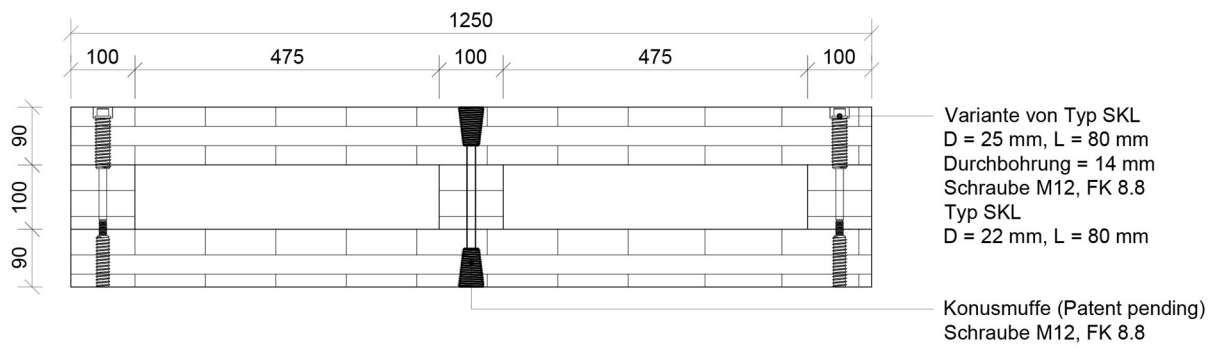
Die Verstärkung der Ausklinkungsbereiche erfolgt mithilfe einer am t-lab entwickelten Technik auf Basis von Rampa-Muffen und Konusmuffen (Patent pending). Zur Ausbildung der Aussteifungswirkung in der Deckenebene werden Holzverbinder des Typs HTC-P2P der Firma Hilti eingesetzt (siehe Abbildung 23).

Im Mock-Up wird die Verbindungstechnik nach der Variante der Doppel-Konusverbinder ausgeführt (siehe Abbildung 18). Die Variante mit Schubverbindern wird in diesem Mock-Up nicht realisiert, da sie erst auf Grundlage der Ergebnisse dieses Versuchsaufbaus weiterentwickelt wird. Für die Schubverbinder-Variante wurde ein separates, kleineres Mock-Up gebaut (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

# Hauptteil



**Abbildung 23: Deckenelemente aus CLT Box**



**Abbildung 24: Querkzugverstärkung im Ausklinkungsbereich**

## – Ablauf von Montage, Demontage und Wiederaufbau

Zur Realisierung der Wiederverwendbarkeit der Wandelemente ist nicht nur eine reversible, zerstörungsfreie Demontage erforderlich, sondern auch ein anschließender Wiederaufbau mit den wiederverwendeten Elementen. Im Sinne dieses Ansatzes wurde das Mock-Up zunächst bei einem Industriepartner aufgebaut und anschließend demontiert. Der gesamte Prozess wurde dokumentiert und veröffentlicht [16]. Die demontierten Bauelemente wurden anschließend zur Werk- und Forschungshalle Diemerstein des t-lab transportiert und dort erneut aufgebaut.

### **Montage:**

Die Montage des Mock-Ups orientiert sich an der realistischen Abfolge auf einer Baustelle. Zunächst werden die vier unteren Stützen positioniert. Anschließend werden die Haupt- und Nebenträger mithilfe der Konusadapter an den Stützen montiert. Darauf folgen die Deckenelemente, die auf die Träger aufgelegt werden. Durch die enge Abstimmung zwischen t-lab und Industriepartner sowie die hoch standardisierte Tragwerksauslegung können die Deckenelemente zunächst grob positioniert werden. Die finale millimetergenaue Ausrichtung erfolgt durch die Geometrie der Konusadapter, die die Bauteile selbsttätig korrekt fügen.

Nach der Montage der Träger werden die oberen Stützen eingesetzt. Dabei traten Montageerschwerisse auf: Die Nut-Feder-Verbindung ist sehr präzise gefertigt, sodass die oberen Stützen aufgrund des hohen Reibungswiderstands nicht allein durch ihr Eigengewicht in die Nut gleiten. Stattdessen mussten sie vorsichtig eingeschwenkt werden, um die korrekte Position zu erreichen.

An dieser Stelle werden die aufgetretenen Probleme und Montageerschwerisse ausschließlich beschrieben. Eine Bewertung der konstruktiven Funktionsfähigkeit erfolgt gesondert im Abschnitt „Bewertung der konstruktiven Funktionsfähigkeit unter Praxisbedingungen“ (Kapitel 2.5).

Im Anschluss werden die Wandelemente montiert. Die Doppel-Konusverbinder erleichtern die Positionierung erheblich. Es zeigte sich jedoch, dass die kreisförmigen Bohrungen im Kantholz lediglich eine horizontale Montagerichtung zulassen. Die Wandelemente müssen daher zunächst auf das Tragwerk aufgelegt und anschließend in Richtung des Kantholzes verschoben werden. Selbst bei den skalierten Abmessungen des Mock-Ups erwies sich dieser Arbeitsschritt aufgrund des Eigengewichts der Elemente als anspruchsvoll.

Nach dem Einsetzen der Wandelemente passen die meisten Anschlussstellen infolge der selbstzentrierenden Wirkung der konischen Verbinder exakt zusammen. Lediglich an einer Stelle war eine Einschraubmuffe leicht versetzt. Dies wurde dokumentiert und beim Wiederaufbau korrigiert.

### **Demontage:**

Die Demontage des Mock-Ups erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Montage und orientiert sich an der zuvor entwickelten reversiblen Logik. Zunächst werden die Verbindungselemente der Wandelemente von der Gebäudeinnenseite aus gelöst. Hierbei kommen handelsübliche Akkuschrauber oder Drehmomentschlüssel zum Einsatz.

Anschließend werden die Wandelemente vorsichtig angehoben und vom Tragwerk getrennt. Die konischen Doppel-Konusverbinder erleichtern dabei das Lösen der Verbindungen sowie die sichere Handhabung der Elemente. Kleinere Versatzstellen, wie im Fall der leicht versetzten Muffe, wurden dokumentiert und beim Wiederaufbau korrigiert.

Im nächsten Schritt werden die oberen Stützen demontiert. Auch hier ist aufgrund der eng tolerierten Nut-Feder-Verbindung ein sorgfältiges Vorgehen erforderlich. Die Stützen werden vorsichtig aus der Nut geschwenkt, um Beschädigungen zu vermeiden. Danach folgen die Demontage der Deckenelemente sowie der Haupt- und Nebenträger.

Die unteren Stützen werden zuletzt entfernt. Während des gesamten Demontageprozesses werden die Bauteile auf weichen, ebenen Unterlagen zwischengelagert, um Kontaktflächen zu schonen und Verformungen zu vermeiden. Die sorgfältige Vorgehensweise stellt sicher, dass alle Bauteile unbeschädigt bleiben und für einen späteren Wiederaufbau wiederverwendet werden können.

Der Wiederaufbau in der Werk- und Forschungshalle Diemerstein wird im März 2026 durchgeführt.

### **– Bewertung der konstruktiven Funktionsfähigkeit unter Praxisbedingungen**

Die Bewertung der konstruktiven Funktionsfähigkeit erfolgt unter Berücksichtigung der Beschädigungsfreiheit und der Wiederverwendbarkeit der einzelnen Bauteile: Wandelemente, Deckenelemente, Träger und Stützen.

#### **Wandelemente:**

Die Verbindungstechnik berücksichtigt bereits in der Konstruktionsphase sowohl Bauleranzen als auch die Zugänglichkeit der Anschlussstellen. Entsprechend traten bei der Demontage der Wandelemente keine wesentlichen Schwierigkeiten auf. Sämtliche Verbindungsmittel – Schrauben und Doppel-Konusverbinder – konnten reibungslos und zerstörungsfrei gelöst und anschließend wiederverwendet werden.

Obwohl die Doppel-Konusverbinder formschlüssig ausgeführt sind, übertragen die beiden im Wandelement angeordneten Verbinder im eingebauten Zustand keine Scherkräfte, sondern dienen ausschließlich der Positionierung. Sie befinden sich somit dauerhaft in einem unbelasteten Zustand und lassen sich entsprechend leicht lösen. Erst unter Windlasten werden die im Kantholz angeordneten Verbinder beansprucht. Nach der Demontage der Wandelemente liegen sie automatisch wieder spannungsfrei vor. Insgesamt bleiben alle Anschlussstellen unbeschädigt, sodass sowohl die Wandelemente als auch die Verbindungsmittel unmittelbar wiederverwendet werden können.

Die Verbindungstechnik ist in ihrer derzeitigen Ausführung jedoch weder besonders montagefreundlich noch ressourcenschonend. Die Position der Verbinder muss mit hoher Präzision hergestellt werden, damit das Wandelement korrekt auf dem Tragwerk aufliegt und das Eigengewicht direkt in die Tragstruktur eingeleitet wird, ohne zusätzliche Beanspruchung der Verbindungsmittel. Zudem erlauben die Doppel-Konusverbinder konstruktiv nur eine Montageichtung, was die exakte Positionierung großformatiger Wandelemente erschwert. Darüber hinaus ist eine zusätzliche Komponente erforderlich, um die Windlasten zuverlässig in das Tragwerk einzuleiten (siehe Abbildung 9 und Abbildung 18).

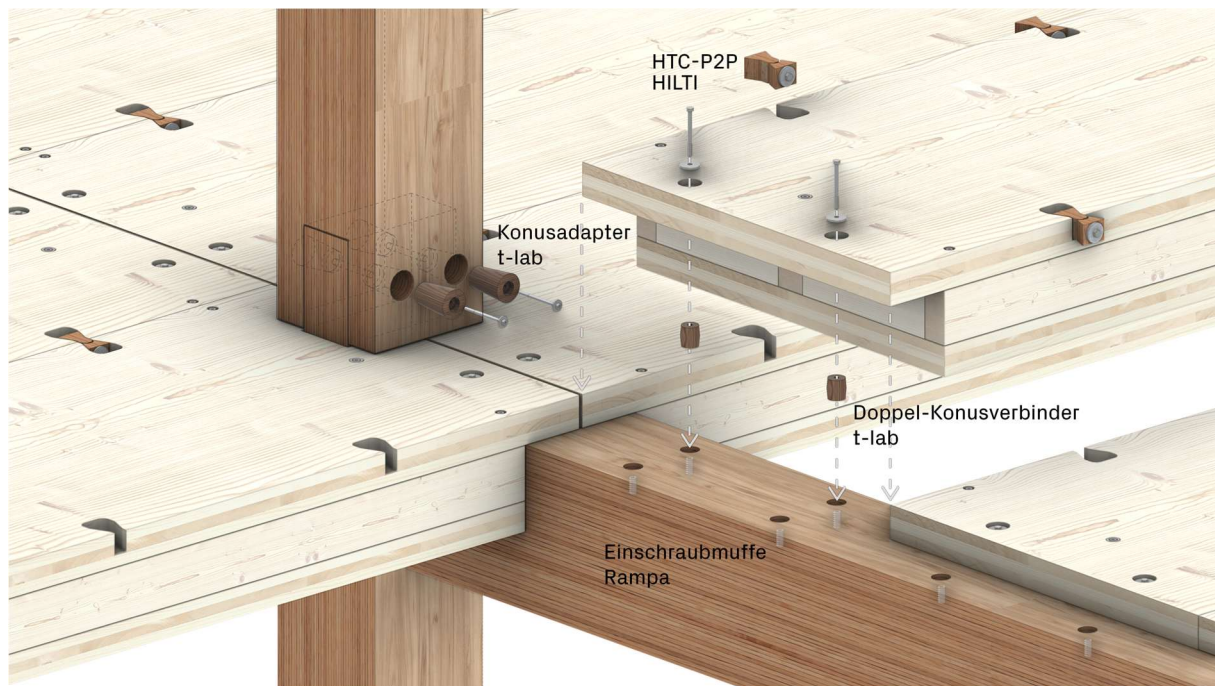
Zur Behebung dieser drei identifizierten Nachteile wird derzeit eine alternative Verbindungstechnik entwickelt, die sich an das HTC-P2P-System anlehnt (siehe Abbildung 8 und Abbildung 10). Dabei übernimmt das Bauteil mit der formschlüssigen Nase die Funktion des Schubverbinders, während in der Schwelle Einschraubmuffen integriert werden. An den Anschlussstellen werden von unten durchlaufende Nuten bis zur Oberkante der Deckenplatte oder des Trägers in die Schwelle eingefräst. Dadurch wird zunächst eine sichere Positionierung der Wandelemente über den Schubverbinder ermöglicht.

Zusätzlich erlaubt diese Lösung eine Montage in vertikaler Richtung, was die Positionierung der Wandelemente deutlich erleichtert. Durch das Eindrehen der Schrauben in die Muffen wird anschließend eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Wandelement und Tragwerk hergestellt. Diese Variante reduziert den Materialeinsatz durch den Wegfall zusätzlicher Bauteile und erhöht zugleich den Standardisierungsgrad, da die Taschen für die Schubverbinder direkt im Tragwerk ausgeführt werden und prinzipiell auch in anderen Projekten wiederverwendbar sind.

### Deckenplatten:

Die Deckenelemente sind mit zwei unterschiedlichen Verbindungsmitteln ausgestattet: Konusadaptern und Verbindern des Typs HTC-P2P [10]. Nach dem Lösen der HTC-P2P-Verbindungen werden die Deckenelemente vollständig voneinander entkoppelt. Die Konusadapter können anschließend gemeinsam mit den Deckenelementen angehoben werden, ohne dass Beschädigungen auftreten.

Alternativ können für die Verbindung der Deckenelemente mit den Trägern auch Doppel-Konusverbinder eingesetzt werden. Darüber hinaus können die Träger sowohl als Zangenkonstruktion als auch als Vollquerschnittsträger ausgeführt werden.



**Abbildung 25: Alternatives Verbindungskonzept zwischen Deckenelementen und Trägern mittels Doppel-Konusverbindern.**

### Träger:

Die an den Trägern eingesetzten Konusadapter dienen primär der Lagesicherung. Aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten können sie jedoch bereits während der Montage geringfügig beansprucht werden, obwohl die zulässigen Herstellungstoleranzen gemäß DIN 18203-3:2008-08 [11] eingehalten sind. Druck-Scherversuche zeigen, dass bereits eine Verschiebung von etwa 0,1 mm – entsprechend der typischen Genauigkeit von CNC-Maschinen – zu einer mittleren Kraft von rund 6,0 kN auf den Konusadapter führen kann (siehe Abbildung 49 in Anhang 5.6).

Um eine zerstörungsfreie Demontage der Deckenelemente sicherzustellen, ist daher ein ergänzender konstruktiver Ansatz erforderlich. Eine mögliche Lösung stellt der Einsatz eines

## Hauptteil

Spreizdübels dar. Durch das Ausdrehen der Schraube kann sich der Dübel in der Bohrung des Konusadapters verankern, sodass der Adapter beim anschließenden Herausziehen der Schraube gelöst werden kann. Die technische Machbarkeit dieses Ansatzes wird derzeit untersucht (z. B. Hilti HST3, Fischer FAZ II).

Die Verformungen in den Bohrungen infolge des Eindrehens der Konusadapter liegen im elastischen Bereich. Nach der Demontage weisen die Träger keine plastischen Schäden auf und können wiederverwendet werden.



z.B. Hilti HST3, Fischer FAZ II

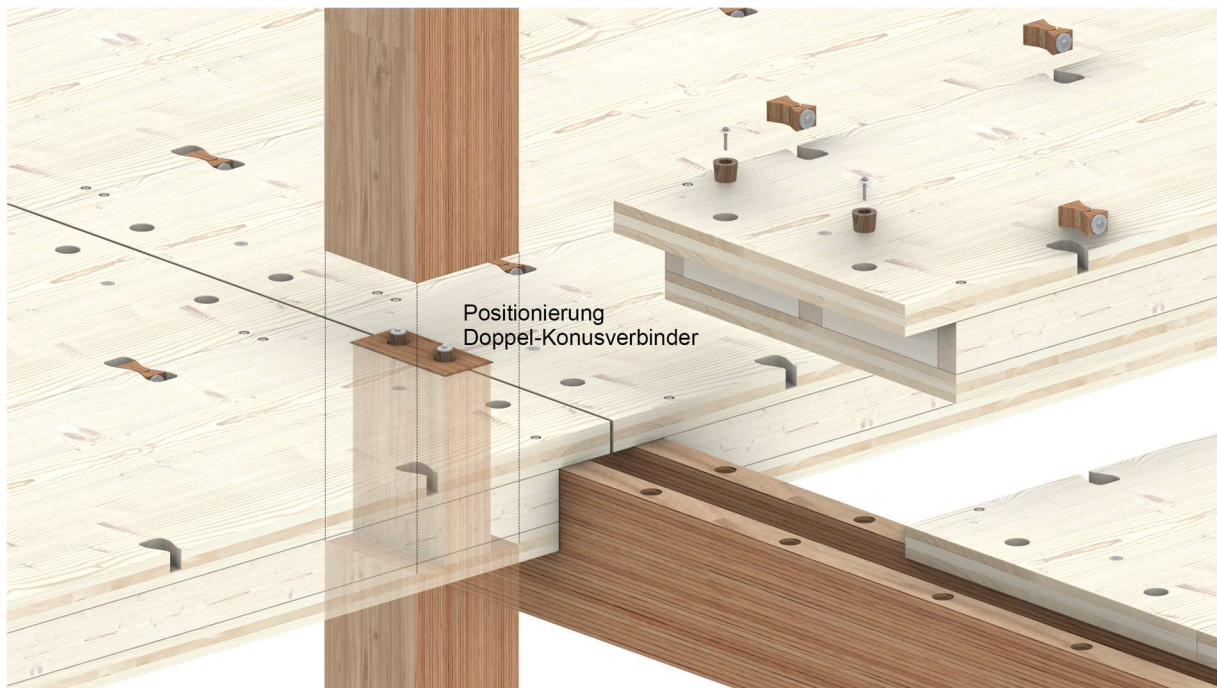
**Abbildung 26:** Hilfsmittel für die Demontage von Konusadaptern

### **Stütze:**

Die Nut-Feder-Verbindung der Stützen erfordert eine sehr hohe Maßhaltigkeit und Formstabilität. Bereits geringfügige Formänderungen im Millimeterbereich können die Demontage und den Wiederaufbau erheblich erschweren. Während der Demontage des Mock-Ups zeigte sich, dass die Stützen trotz gelöster Konusadapter nur mit erhöhtem Aufwand voneinander getrennt werden konnten.

Eine konstruktive Verbesserung besteht darin, auf die Ausbildung einer Nut im Fußpunkt der Stütze zu verzichten. Stattdessen kann die obere Stütze mit einem Vollquerschnitt direkt auf der darunterliegenden Stütze aufliegen (siehe Abbildung 27). Diese alternative Ausführung wurde bereits erfolgreich im Projekt „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ [17] umgesetzt und hat sich dort als funktionsfähig und montagefreundlich erwiesen.

Zur präzisen Positionierung werden werkstattseitig zwei Doppel-Konusverbinder im Hirnholz der oberen Stütze vormontiert, während im Hirnholz der unteren Stütze entsprechende konische Bohrungen eingefräst werden.



**Abbildung 27:** Alternative Ausführung des Anschlusses zwischen übereinander angeordneten Stützen. Die exakte Positionierung der oberen Stütze erfolgt über Doppel-Konusverbinder, die im Hirnholz der unteren Stütze vormontiert sind.

### **Schlussfolgerung:**

Die Projektergebnisse zeigen, dass die erfolgreiche Umsetzung reversibler Konstruktionen im (Holz-)Bau eine frühzeitige und kontinuierliche interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten erfordert. Bereits in der Planungsphase müssen architektonische, statische und fertigungstechnische Aspekte gemeinsam abgestimmt werden, um eine konsistente und praxisgerechte Gesamtlösung zu entwickeln. Spätere Änderungen führen andernfalls häufig zu umfangreichen Anpassungen in Planung und Ausführung.

Die konstruktive Entwicklung sollte daher von Beginn an in enger Abstimmung mit den Industriepartnern erfolgen, um die Anforderungen der Fertigungstechnik frühzeitig in die Konstruktion zu integrieren. Insbesondere bei reversiblen Systemen ist eine präzise Koordination der Verbindungsdetails erforderlich, damit die tatsächliche Herstellungsgenauigkeit mit den geplanten Toleranzen übereinstimmt. Nur durch die enge Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure kann eine reversible und zugleich wirtschaftliche (Holz-)Bauweise erfolgreich realisiert werden.

## **2.5 Bewertung der Kreislauffähigkeit und Anwendungspotenzial**

Die im Rahmen des Projekts entwickelten und erprobten Konstruktionen werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit und ihres Anwendungspotenzials bewertet. Ziel ist es, die Eignung der entwickelten Verbindungstechniken und Bauteilaufbauten für eine reversible und ressourcenschonende Bauweise zu beurteilen. Hierzu werden systematische Kriterien zur Wiederverwendung und Austauschbarkeit herangezogen sowie das Potenzial zur Standardisierung und Übertragbarkeit auf reale Bauvorhaben analysiert.

### **– Systematische Kriterien für Wiederverwendung**

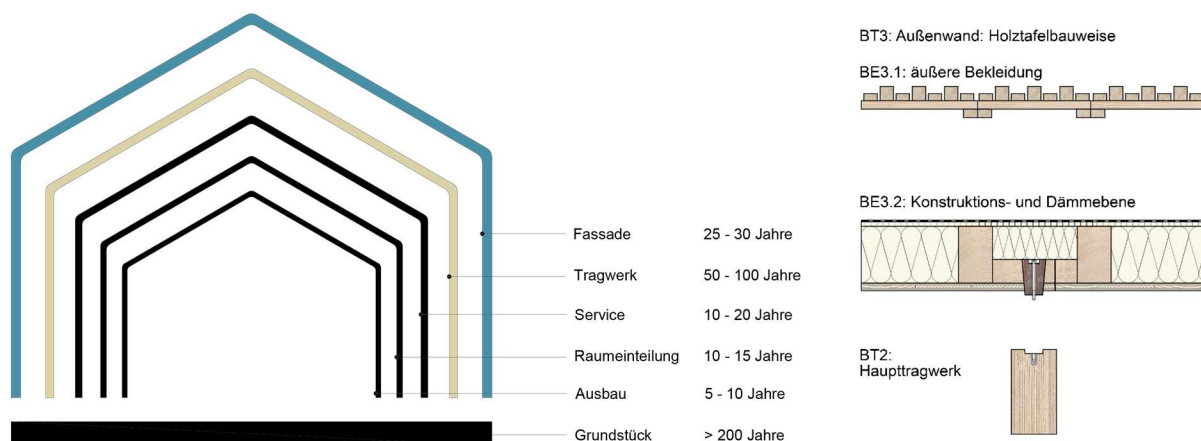
Die Bewertung der Kreislauffähigkeit erfolgt auf Basis eines Kriterienrahmens, der zentrale Anforderungen an wiederverwendbare Bauelemente und Bauteile definiert. Ein wesentliches

Kriterium ist die zerstörungsfreie Demontierbarkeit der Elemente. Konstruktionen, die mechanisch oder formschlüssig gefügt sind, ermöglichen eine Demontage ohne Beschädigung der Bauteile und bilden damit die grundlegende Voraussetzung für deren Wiederverwendung.

Darüber hinaus ist die Wiederverwendbarkeit der Bauteile selbst von zentraler Bedeutung. Nach der Demontage sollten die Elemente ohne Nachbearbeitung erneut eingesetzt werden können. Maßhaltigkeit sowie die Erhaltung der ursprünglichen mechanischen Eigenschaften sind hierbei entscheidend, um einen erneuten Einbau ohne Qualitäts- oder Funktionsverlust zu gewährleisten.

Ebenso relevant ist die Austauschbarkeit einzelner Bauelemente, insbesondere im Hinblick auf Wartung, Instandhaltung und nutzungsbedingte Anpassungen. Konstruktionen, bei denen einzelne Elemente unabhängig voneinander gelöst und ersetzt werden können, reduzieren den Aufwand beim Rückbau und erhöhen die Lebensdauer des Gesamtsystems.

Ein anschauliches Beispiel stellt das Außenwandelement dar. Nach dem Shearing-Layers-Prinzip besitzen die unterschiedlichen Schichten eines Bauteils – hier der Außenwand – jeweils unterschiedliche Lebensdauern. Die tragende Mittelschicht in Form der Holztafelwand weist typischerweise eine Lebensdauer von etwa 50 Jahren auf, während Bekleidungs- oder Installationsschichten in der Regel nur eine Nutzungsdauer von etwa 25 Jahren erreichen. Um einen gezielten Austausch einzelner Schichten zu ermöglichen, müssen diese daher reversibel miteinander verbunden sein (siehe Abbildung 28).



**Abbildung 28:** links: Nutzungsgruppen und Austauschzyklen nach dem Shearing-Layers-Prinzip; rechts: Gliederung eines Bauelements in einzelne Schichten gemäß dem Shearing-Layers-Prinzip.

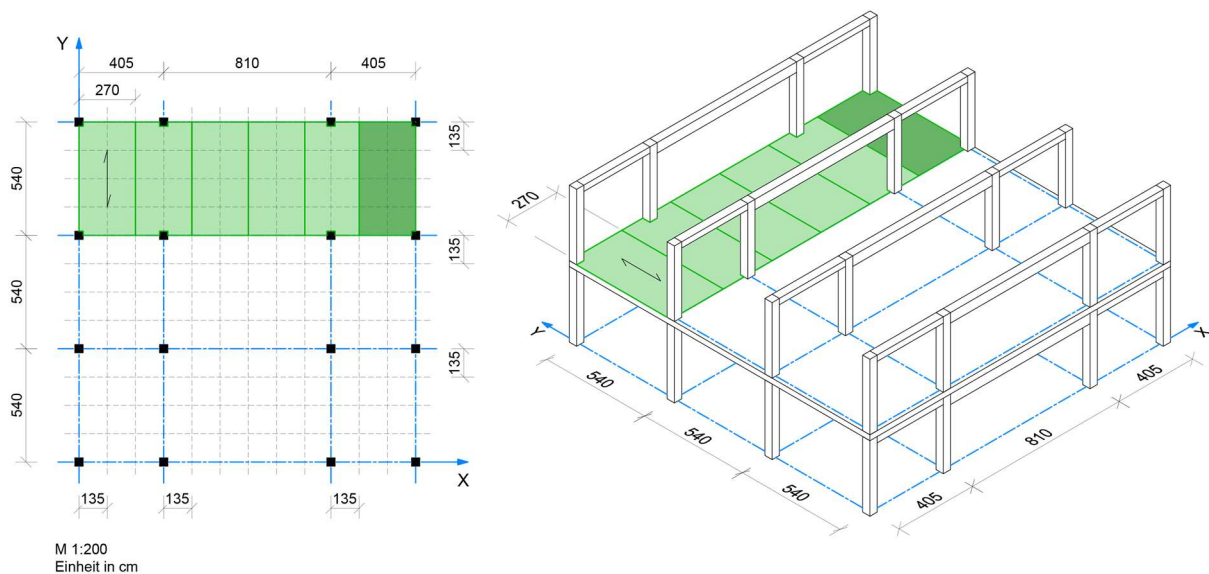
Ein weiteres zentrales Bewertungskriterium ist die Standardisierung. Einheitliche Geometrien der Bauteile, eine durchdachte Elementierung sowie klar definierte Toleranzen fördern die Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Bauelementen. Dies erleichtert nicht nur die Wiederverwendung, sondern unterstützt zugleich eine industrielle Serienfertigung.

Schließlich ist die Dokumentation und Rückverfolgbarkeit der Bauteile ein integraler Bestandteil der Kreislauffähigkeit. Eine eindeutige Kennzeichnung der Elemente, beispielsweise über digitale Bauteil- oder Elementpässe, ermöglicht eine lückenlose Nachverfolgung über den gesamten Lebenszyklus hinweg und erleichtert Planung, Demontage und Wiederverwendung in zukünftigen Projekten.

### – Potenzial für Standardisierung und Übertragung auf reale Bauvorhaben

Untersuchungen des t-lab zu realisierten Arbeitsbauten zeigen, dass sich ein Grundraster von etwa 1,35 m in der Praxis als besonders häufiges und funktionales Maß etabliert hat. Dieses Raster wurde auch im Projekt „Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte

Ausbaustufen (HolzHybrid)“ [1] angewendet, in dem ein nutzungsflexibles Tragwerk mit einem Trägerabstand von 5,40 m entwickelt wurde.



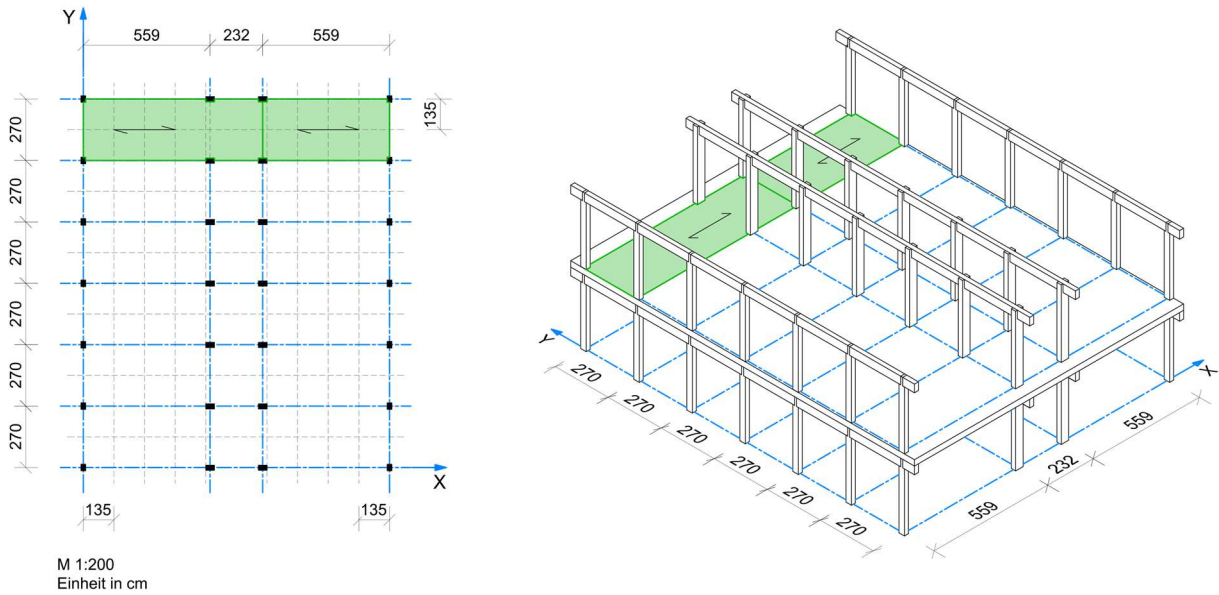
**Abbildung 29: Grundraster des Projekts HolzHybrid [1]**

Aus Sicht des zirkulären Bauens ist die Standardisierung von Grundrastern aus zwei zentralen Gründen notwendig:

1. Geometrische Kompatibilität für die Wiederverwendung von Bauelementen:  
Vorfertigte Decken- und Außenwandelemente können nur dann projektübergreifend wiederverwendet werden, wenn ihre Abmessungen und Anschlussdetails mit den Rastermaßen neuer Gebäude kompatibel sind. Projektindividuelle Raster verhindern diese Übertragbarkeit häufig und führen dazu, dass Bauteile nach dem Rückbau nicht erneut eingesetzt werden können. Ein standardisiertes Raster schafft dagegen eine geometrische Grundlage für die Wiederverwendung über mehrere Bauvorhaben hinweg.
2. Skaleneffekte in Planung, Produktion und Montage:  
Einheitliche Raster ermöglichen eine wiederholbare Planung und Fertigung, reduzieren den Planungsaufwand sowie die Produktions- und Montagekosten und unterstützen eine wirtschaftliche Umsetzung. Gleichzeitig können Verbindungsmittel, Anschlussdetails und Ausführungsprinzipien vereinheitlicht werden, was die Demontierbarkeit und spätere Wiederverwendung zusätzlich verbessert.

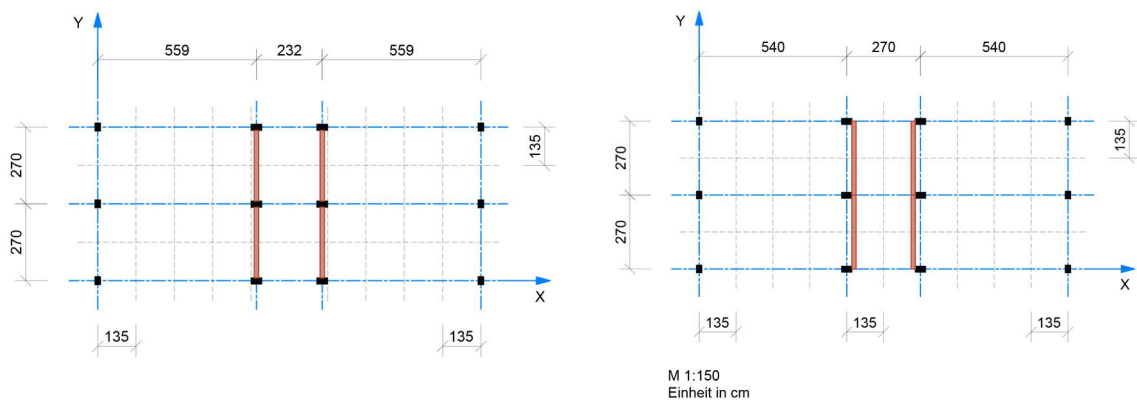
Das Projekt „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ [17] veranschaulicht das Potenzial einer solchen Standardisierung. Dort beträgt der Grundraster quer zur Trägersrichtung ebenfalls 1,35 m.

## Hauptteil



**Abbildung 30: Grundraster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ [17]**

Die bestehenden Trägerabstände von 5,59 m und 2,32 m könnten durch eine gezielte Verschiebung der Stützen auf 5,40 m und 2,70 m angepasst werden, sodass eine Kompatibilität mit den im Projekt HolzHybrid [1] entwickelten Deckenelementen erreicht wird.



**Abbildung 31: Links: bestehender Raster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“, rechts: angepasster Raster des Projekts „Dienstgebäude für den Landkreis Mainz-Bingen“ (rot markiert die Innenwände)**

Unter dieser Annahme könnten etwa 80 % der dort entwickelten Decken- und Wandelemente in das Gebäude Mainz-Bingen übertragen und wiederverwendet werden. Lediglich die Bauteile im Durchgangsbereich müssten neu gefertigt werden.

# Hauptteil

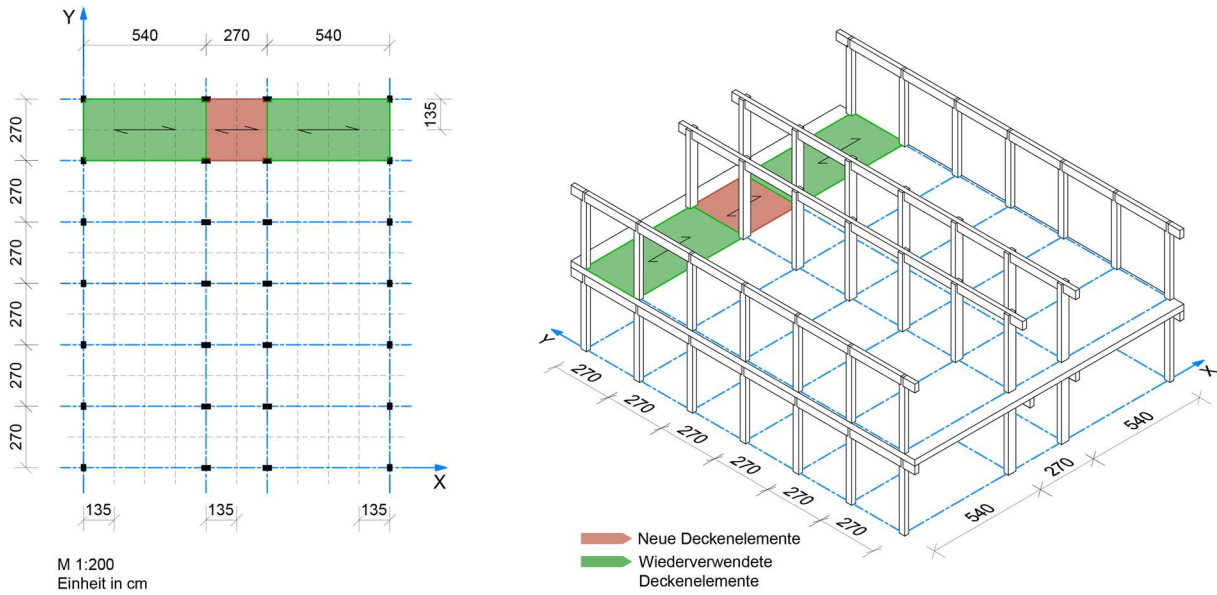


Abbildung 32: prinzipielle Darstellung der wiederverwendeten Bauelemente

Damit wird deutlich, dass die Standardisierung des Grundrasters ein wesentlicher Schlüssel zur Wiederverwendung großformatiger Holzbauelemente über mehrere Gebäudelebenszyklen hinweg ist und somit einen substantiellen Beitrag zum zirkulären Bauen leistet.

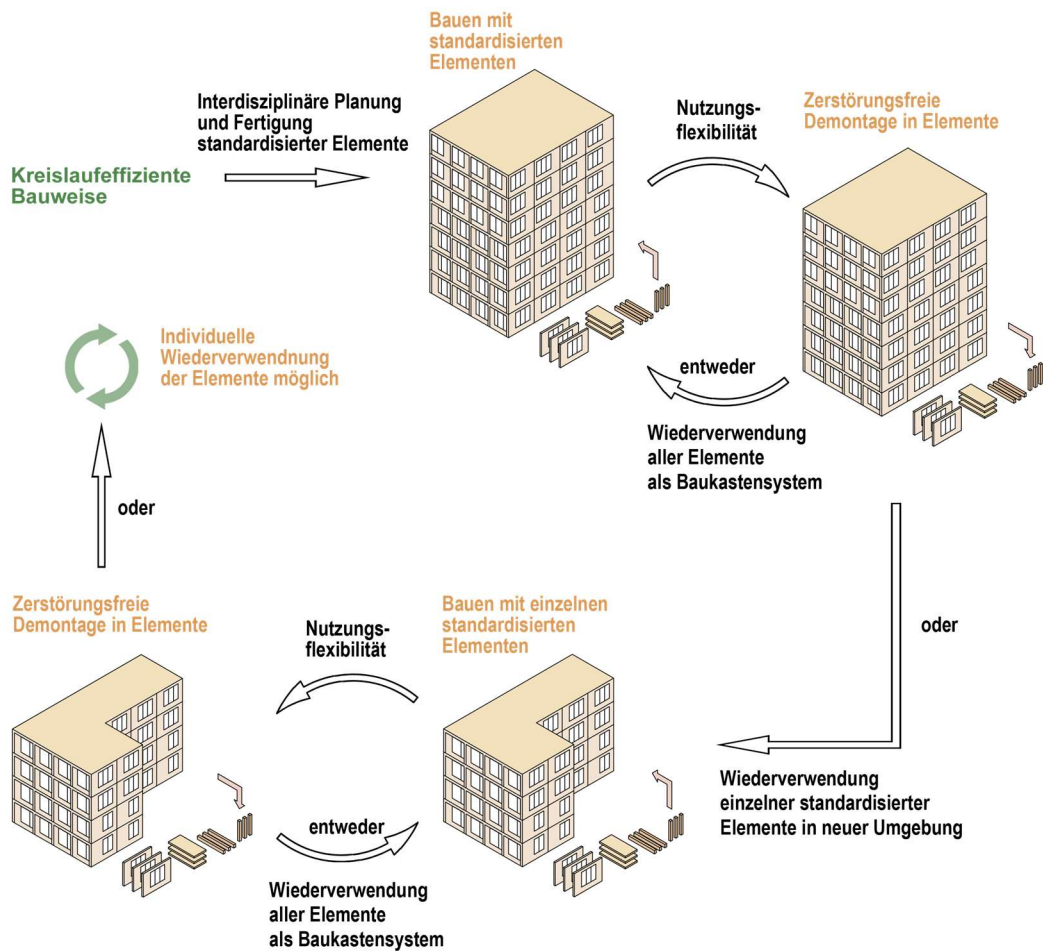


Abbildung 33: Standardisierung und Wiederverwendung von Bauelementen eines nutzungsflexiblen Gebäudes in kreislauffeffizienter Bauweise

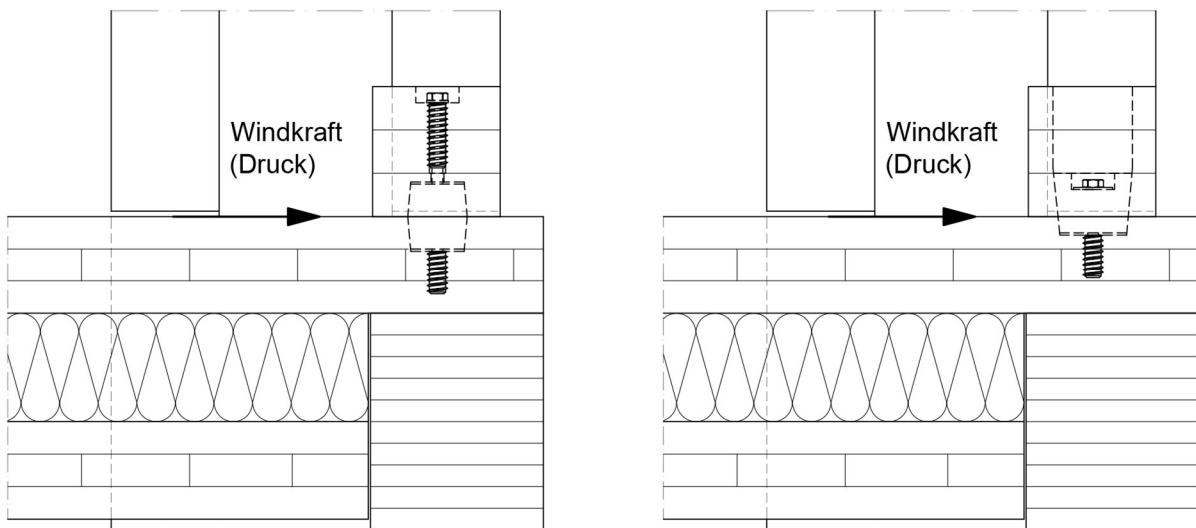
## 2.6 Methodik und technische Untersuchungen

### – Ziel und Funktion der Versuche

Gemäß dem im Rahmen des Projekts entwickelten Verbindungskonzept übernehmen die Doppel-Konusverbinder die Scherbeanspruchungen, während die Einschraubmuffen zur Aufnahme der Zugkräfte eingesetzt werden.

Die Zugtragfähigkeit von Einschraubmuffen lässt sich in ETA-120481 [14] ermitteln. Die Schertragfähigkeit sowie die Nachgiebigkeit der Doppel-Konusverbinder werden hingegen mittels Druckscherversuchen nach DIN EN 26891 [18] bestimmt. Nach demselben Prinzip können auch Konusadapter die Funktion der Doppel-Konusverbinder zur Aufnahme von Windlasten übernehmen. Aus diesem Grund wurden die Druckscherversuche zusätzlich mit Konusadaptern durchgeführt. Ziel war es, sowohl die Tragfähigkeit als auch die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel zu ermitteln.

Darüber hinaus wurden Zugscherversuche mit Konusadaptern durchgeführt, um deren Tragfähigkeit unter kombinierter Beanspruchung vollständig zu erfassen.



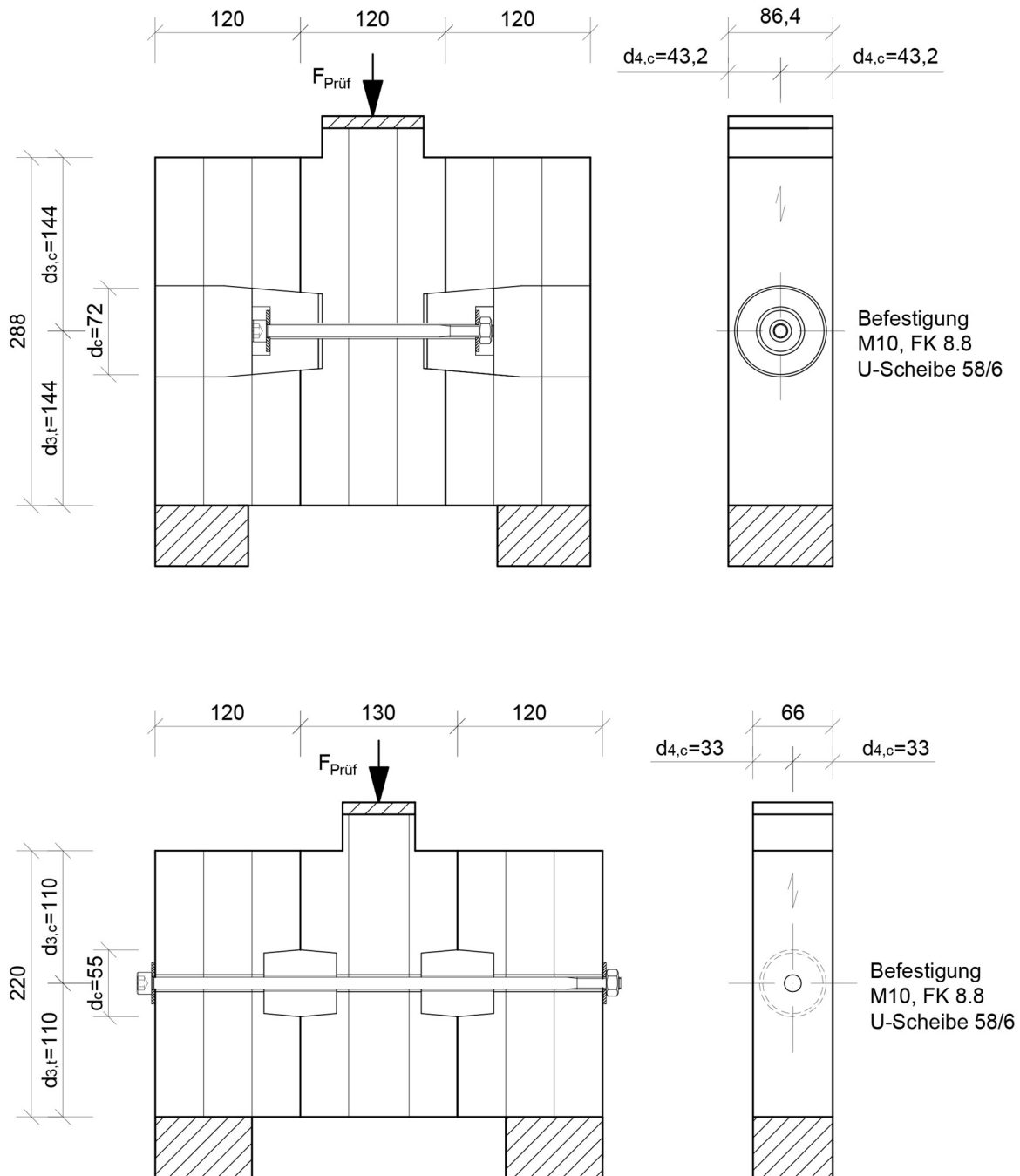
**Abbildung 34:** Zwei Konstruktionsprinzipien zur Übertragung von Windlasten mittels zerstörungsfrei lösbarer Verbindungsmittel: links das Prinzip mit Doppel-Konusverbindern, rechts das Prinzip mit Konusadaptern.

### – Druckscherversuche

Die Geometrien von Druckscherversuchskörpern wurden gemäß den Anforderungen an die Mindestabstände für Sonderdübel Typ A in DIN EN 1995-1-1 [9] festgelegt. Dabei handelt es sich um den Abstand zum unbeanspruchten Hirnholzende ( $a_{3,c}$ ), unbeanspruchten Rand ( $a_{4,c}$ ) sowie beanspruchten Hirnholzende ( $a_{3,t}$ ).

**Tabelle 5:** Mindestabstände von Doppel-Konusverbindern und Konusadaptern in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter  $d_c$  beschreibt bei Doppel-Konusverbindern den Durchmesser des Verbinders zwischen den verbundenen Bauteilen. Bei Konusadaptern entspricht  $d_c$  dem größeren Durchmesser (72 mm, in Abbildung 35).

Verbinder	$a_{3,c}=2,0d_c$	$a_{3,t}=2,0d_c$	$a_{4,c}=0,6d_c$
Doppel-Konusverbinder ( $d_c = 55 \text{ mm}$ )	110 mm	110 mm	33 mm
Konusadapter ( $d_c = 72 \text{ mm}$ )	144 mm	144 mm	43,2 mm



**Abbildung 35: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche: oben Konusadapter, unten Doppel-Konusadapter; die jeweiligen Randbedingungen der Versuchskörper sind in der Tabelle 5 angegeben.**

### – Zugscherversuche

Die Geometrien der Zugscherversuchskörper wurden unter Berücksichtigung der erforderlichen Mindestabstände ( $a_{3,t}$  und  $a_{4,c}$ ) sowie der Ergebnisse aus den Druckscherversuchen festgelegt. Ziel ist die Ermittlung des erforderlichen Mindestquerschnitts von Holzbauteilen unter Zugbeanspruchung. Die Herleitung der maßgebenden Geometrien ist im Anhang 5.4 dargestellt.

## – Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Druck- und Zugscherversuche exemplarisch vorgestellt und diskutiert. Eine detaillierte Zusammenstellung sämtlicher Versuchsergebnisse ist im Anhang dokumentiert.

### Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern

Bei jedem Versuchskörper aus BSH GL24 wurden zwei Doppel-Konusverbinder geprüft. Aufgrund der materialbedingten Inhomogenität des Holzes können die einzelnen Verbinder innerhalb eines Prüfkörpers unterschiedliche Tragfähigkeiten aufweisen. Der gewählte Versuchsaufbau erlaubt dabei keine eindeutige Zuordnung des Erstversagens zu einem der beiden Verbinder, sofern das Versagen in der Scherfuge auftritt. In diesen Fällen lässt sich das Erstversagen ausschließlich anhand der Kraft-Verschiebungs-Kurve identifizieren.

Vor diesem Hintergrund wurde die Tragfähigkeit eines einzelnen Verbinders als die Hälfte der zum Zeitpunkt des ersten Versagens erreichten Bruchkraft angesetzt. Dieser Ansatz stellt sicher, dass der ermittelte charakteristische Wert auf der sicheren Seite liegt und streuungsbedingte Unsicherheiten infolge der materialtypischen Variabilität des Holzes angemessen berücksichtigt werden.

Der Mittelwert der Tragfähigkeit beträgt 24,2 kN, während der charakteristische Wert bei 21,8 kN liegt. Die Einzelwerte sowie das jeweilige Versagensverhalten der Versuchskörper sind im Anhang 5.5 dokumentiert.

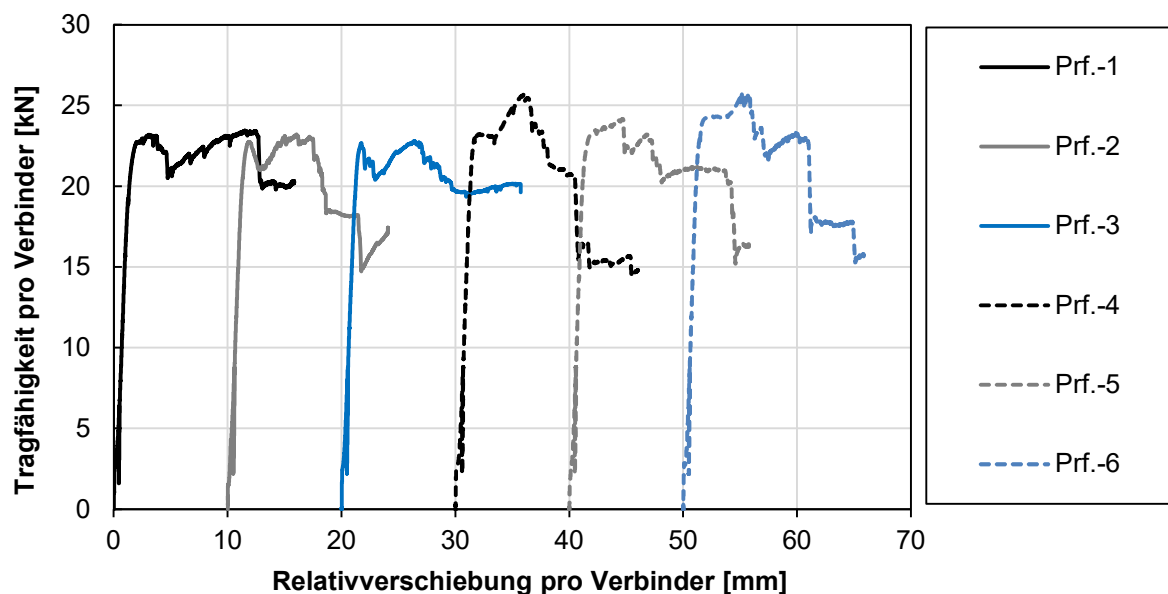


Abbildung 36: Kraft-Verschiebungskurve von Druckscherversuchen mit Doppel-Konusverbindern bei GL24

Gemäß dem entwickelten Verbindungskonzept (siehe Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9) übernehmen die Doppel-Konusverbinder die quer zur Faserrichtung wirkenden Scherbeanspruchungen. Die Tragfähigkeit bei Scherbeanspruchung quer zur Faserrichtung wurde im Rahmen des Projekts nicht experimentell ermittelt. Sie lässt sich jedoch auf Grundlage der in [19] angegebenen Bemessungsgleichungen mithilfe des Faktors  $k_{\alpha,c}$  aus den vorhandenen Versuchsergebnissen ableiten.

$$F_{v,90,Rk} = k_{\alpha,c} \cdot F_{v,0,Rk} = 0,738 \cdot 21,80 = 16,09 \text{ kN}$$

Gl. (1)

mit

$$k_{\alpha,c} = \frac{1}{(1,3 + 0,001 \cdot d_c) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{1}{(1,3 + 0,001 \cdot 55) \cdot 1^2 + 0^2} = 0,738$$

Auf Basis der mit Gl.(1) ermittelte Tragfähigkeit bei Schubbeanspruchung quer zur Faserrichtung kann der erforderliche Verbinderabstand im Kantholz festgelegt werden. Dieser beträgt 1,585 m (siehe Anhang 5.3).

### Druckscherversuche mit Konusadaptern

Bei der Untersuchung der Konusadapter an Versuchskörpern aus BSH GL24 wurden jeweils zwei Verbinder pro Probe geprüft. Analog zu den Druckscherversuchen mit Doppel-Konusverbindern wurde die Tragfähigkeit eines einzelnen Verbinders als die Hälfte der zum Zeitpunkt des ersten Versagens erreichten Bruchkraft angesetzt. Auf diese Weise liegt der ermittelte charakteristische Wert bewusst auf der konservativen Seite, wobei die streuungsbedingten Unterschiede in der Holzqualität angemessen berücksichtigt werden.

Der ermittelte Mittelwert der Tragfähigkeit beträgt 34,8 kN, der charakteristische Wert liegt bei 33,2 kN. Eine detaillierte Aufstellung der Einzelwerte sowie das beobachtete Versagensverhalten der Versuchskörper sind im Anhang 5.6 dokumentiert.

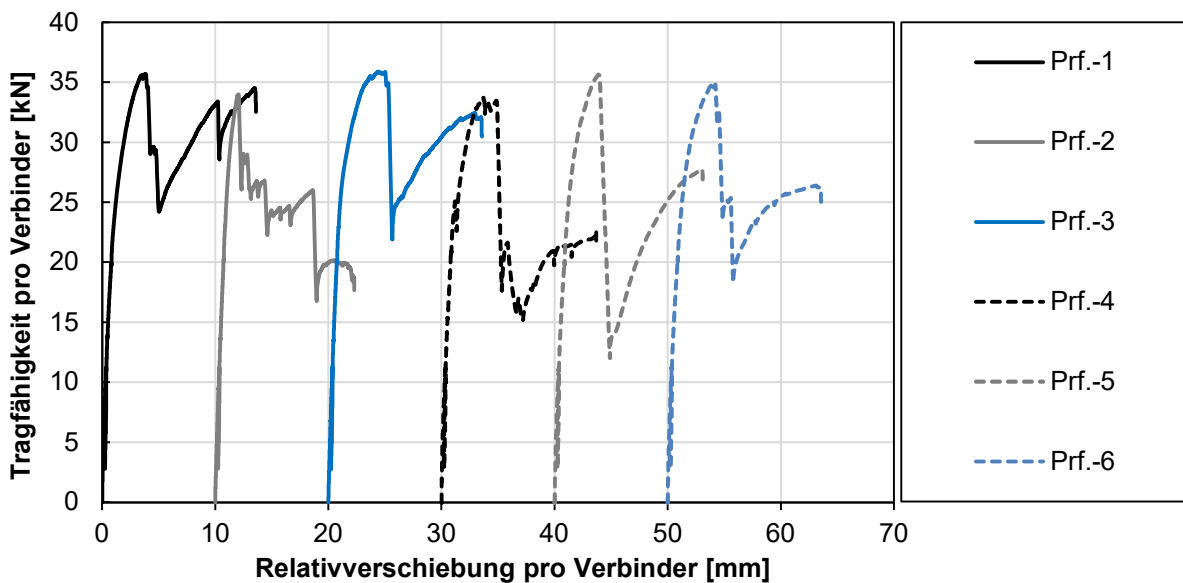


Abbildung 37: Kraft-Verschiebungskurve von Druckscherversuchen mit Konusadaptern bei GL24

### Zugscherversuche mit Konusadaptern

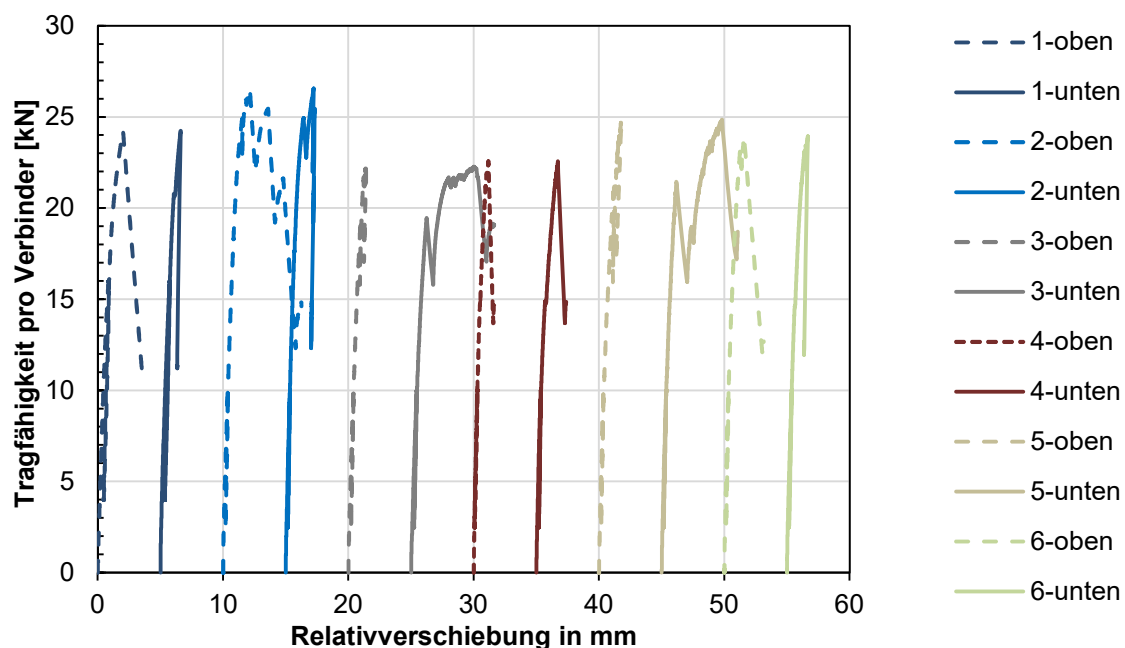
Bei den durchgeführten Zugscherversuchen wurden an jedem Prüfkörper jeweils vier Konusadapter eingesetzt (siehe Abbildung 41 im Anhang 5.4). Die oberen Verbinder operieren unabhängig von den unteren, sodass für die Ermittlung der Tragfähigkeit pro Prüfkörper zwei voneinander unabhängige Messwerte verfügbar sind.

Aufgrund der materialbedingten Inhomogenität des Holzes variieren die Tragfähigkeiten von Konusadaptern selbst auf derselben Seite eines Prüfkörpers erheblich. Um eine konservative Bewertung sicherzustellen, wird für die Bemessung eines einzelnen Konusadapters die gemessene Bruchkraft der beiden Verbinder auf einer Seite herangezogen. Dieser Ansatz

berücksichtigt die streuungsbedingten Unterschiede in der Holzqualität und gewährleistet, dass der ermittelte charakteristische Wert auf der sicheren Seite liegt.

Die Tragfähigkeit wird dabei auf Basis der Bruchkraft zum ersten Peak der Kraft-Verschiebungskurve bestimmt. Nach dem ersten Peak kann die aufgenommene Kraft zwar weiter ansteigen, da der jeweils andere nicht versagte Verbinder oder das Holzbauteil nach lokalem Versagen weiterhin Last übertragen kann. Für Verbindungen, die zerstörungsfrei lösbar ausgelegt sind, ist diese zusätzliche Kraftaufnahme jedoch nicht relevant. Daher wird ausschließlich die Bruchkraft beim ersten Peak als Bemessungswert herangezogen.

Beispielhaft zeigt Prüfkörper 3-unten in der Abbildung 38 eine Bruchkraft von 19,5 kN beim ersten Peak. Obwohl die Kraft nach dem Erstversagen noch auf 22,3 kN ansteigt, wird für die Bewertung der Tragfähigkeit der konservative Wert von 19,5 kN verwendet. Auf dieser Basis beträgt der Mittelwert der Tragfähigkeit unter Zugscherbeanspruchung 23,4 kN, während der charakteristische Wert 20,1 kN beträgt.



**Abbildung 38: Kraft-Verschiebungskurve von Zugscherversuchen mit Konsadaptern bei GL24**

Bei den geprüften Versuchskörpern trat kein Zugversagen in Faserrichtung im Bereich der Bohrungen auf. Dies bestätigt den im Anhang 5.4 beschriebenen Ansatz zur Herleitung des erforderlichen verbleibenden Querschnitts. Mit diesem Vorgehen lässt sich der Mindestquerschnitt des Holzbauteils bestimmen, in dem der Konusadapter eingesetzt wird, sodass die Tragfähigkeit des Verbinders vollständig ausgenutzt werden kann.

### 3 Fazit

Im Rahmen des Projekts wurden geschossweise austauschbare Wandelemente für eine reversible, kreislauffähige Holzskelettbauweise entwickelt, hergestellt und hinsichtlich ihrer technischen, konstruktiven und praktischen Funktionsfähigkeit untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung innovativer Verbindungstechniken, insbesondere der Kombination aus Doppel-Konusverbindern und Konusadaptern, die eine zerstörungsfreie Demontage und Wiederverwendung der Bauteile ermöglichen. Das im Maßstab 1:1 errichtete Mock-Up bestätigte die grundsätzliche Machbarkeit des reversiblen Systems und lieferte wertvolle Erkenntnisse zur Handhabung, zu Montageabläufen sowie zur präzisen Positionierung der Bauteile unter realen Randbedingungen.

Das Mock-Up ermöglichte zudem die praktische Erprobung der Montage- und Demontageschritte und diente als Testumgebung für die Handhabung großformatiger Wandelemente. Dabei konnten potenzielle Montageerschwerpunkte frühzeitig identifiziert und konstruktiv adressiert werden, beispielsweise durch gezielte Anpassungen der Verbindungslage oder den Einsatz vormontierter Verbindungsmittel. Gleichzeitig bestätigte die Umsetzung im Maßstab 1:1 die konstruktive Tragfähigkeit und Stabilität des Systems unter praxisnahen Einsatzbedingungen.

Technische Untersuchungen, darunter Druck- und Zugscherversuche an Doppel-Konusverbindern und Konusadaptern, lieferten quantitative Daten zur Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel. Die Ergebnisse zeigen, dass diese die vorgesehenen Lasten zuverlässig aufnehmen und nach der Demontage unbeschädigt wiederverwendet werden können, sofern die definierten Fertigungstoleranzen eingehalten werden.

Die Analyse der Kreislauffähigkeit verdeutlicht, dass die entwickelten Konstruktionen die zentralen Kriterien der Wiederverwendbarkeit, Austauschbarkeit und Standardisierung erfüllen. Standardisierte Grundraster von 1,35 m sowie durchdachte Bauteilgeometrien ermöglichen eine projektübergreifende Wiederverwendung der Elemente und reduzieren den Aufwand für Rückbau und Wiederaufbau. Eine eindeutige Kennzeichnung der Bauteile, beispielsweise über digitale Elementpässe, unterstützt die Rückverfolgbarkeit und erleichtert Planung, Montage und zukünftige Einsatzmöglichkeiten.

Auf Grundlage der Projektergebnisse lassen sich konkrete Empfehlungen für die Praxis ableiten. Bereits in der Entwurfsphase sollten Architektinnen und Architekten, Tragwerksplanende und Fertigungstechnikerinnen bzw. -techniker eng zusammenarbeiten, um Toleranzen, Konstruktionsdetails und Montageschritte frühzeitig abzustimmen. Eine präzise Vorfertigung der Elemente, standardisierte Abmessungen und Grundraster sowie ein klar strukturiertes Montageschema erhöhen die Effizienz und Sicherheit bei Montage und Demontage. Die Verbindungsmittel sollten so ausgelegt sein, dass sie die Bauteile zuverlässig positionieren und gleichzeitig eine einfache, zerstörungsfreie Lösung ermöglichen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Entwicklung reversibler, kreislauffähiger Holzelemente technisch realisierbar, konstruktiv tragfähig und praxisrelevant ist. Die gezielte Weiterentwicklung der Verbindungstechnik und deren Erprobung im Mock-Up liefern eine fundierte Grundlage für eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Holzbauweise. Diese kann einen substantiellen Beitrag zum zirkulären Bauen leisten und ist auf elementierte, standardisierte Baukonzepte übertragbar.

#### 4 Literatur

- [1] Graf, J.; Birk, S.; Sadegh-Azar, H.: Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen – Teilvorhaben 1: standardisierte Holzbausysteme, Brettsperrholzdeckenkonstruktion und Lebenszyklusanalyse, 2022.
- [2] Graf, J.; Hao, B.; Birk, S. et al.: Legitimation der kreislaueffektiven Holzbauweise – Nachweis der Klimaschutzwirkung. *In: Bautechnik* 101 (2024), S2, S. 64-73. <https://doi.org/10.1002/bate.202300087>.
- [3] Winter, S.: Brandschutz im Holzbau. *In: Cheret, P.; Schwaner, K.; Seidel, A. et al.* (Hrsg.): *Urbaner Holzbau – Chancen und Potenziale für die Stadt ; Handbuch und Planungshilfe*. Arbeitsgruppe Urbaner Holzbau, Handbuch und Planungshilfe. DOM Publ, Berlin, 2014.
- [4] Dotzler, C.; Hessinger, J.; Kurzer, C. et al.: Hybridbau - Holzaußenwände. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, DETAIL Praxis, DETAIL, München, 2019.
- [5] Winter, S.; Kainz, N.; Christoph, K. et al.: Planungshilfe mehrgeschossiger Wohnungsbau – Empfehlung für klimaverträgliches Bauen mit Holz. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion - Technische Universität München, München, 2024.
- [6] Heisel, F.; Hebel, D.E.: Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen – Die Stadt als Rohstofflager. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2021.
- [7] Dietsch P, Ummerhofer T, Frese M, Müller M, Winter S, Mensinger M, Ehrenlechner C: Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile Ausgabe 2025.
- [8] Graf, J.; Shi, W.; Birk, S.: Kreislaueffektives Potenzial von Holz im Hallenbau. *In: Bautechnik* 99 (2022), S1, S. 2-12. <https://doi.org/10.1002/bate.202100105>.
- [9] DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008.
- [10] HILTI: HTC-P2P Holzbauverbinder – Holzverbinder HTC-P2P 90mm M12, 2025, [https://www.hilti.de/c/CLS\\_FASTENER\\_7135/CLS\\_TIMBER\\_CONNECT/r21872848?itemCode=2425950&CHA\\_GLOBAL\\_ANC\\_SIZE=M12&salespackquantity=14%20Stk&activeTab=preconfigured-kits-tabs](https://www.hilti.de/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_TIMBER_CONNECT/r21872848?itemCode=2425950&CHA_GLOBAL_ANC_SIZE=M12&salespackquantity=14%20Stk&activeTab=preconfigured-kits-tabs).
- [11] DIN 18203-3:2008-08, Toleranzen im Hochbau\_- Teil\_3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen.
- [12] DIN 18202:2025-09, Toleranzen im Hochbau\_- Bauwerke, Bemessung und Prüfung.
- [13] *Deutsches Institut für Bautechnik*: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise – MHolzBauRL. Deutsches Institut für Bautechnik, 2024.
- [14] ETA-12/0481: RAMPA A, B, BL, BV, C, CV, SK, SK30, SK330, SKL and SKL330 inserts. European Technical Assessment, Ausgabe März 2021.
- [15] Straßenverkehrs-Ordnung – StVO, 2013.
- [16] ReStaKo: Auf- und Abbau der Wandelemente, <https://www.youtube.com/watch?v=yfNdavmPjYw&list=PL2oYygTmEc2m5UpUvT3Korn-8hF0jpKIh>.
- [17] Stahl, J.: Neubau der Kreisverwaltung Mainz-Bingen . *In: : 15. Europäischer Kongress EBH* 2022.
- [18] DIN EN 26891:1991-07, Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO\_6891:1983); Deutsche Fassung EN\_26891:1991.
- [19] Colling, F.: *Holzbau – Grundlagen und Bemessung nach EC 5*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Lehrbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021.

- [20] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter\_ - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.
- [21] DIN EN 1991-1-4:2010-12, Eurocode\_1: Einwirkungen auf Tragwerke\_ - Teil\_1-4: Allgemeine Einwirkungen\_ - Windlasten; Deutsche Fassung EN\_1991-1-4:2005\_ + A1:2010\_ + AC:2010.
- [22] DIN EN 1995-1-1:2023-10, Eurocode\_5\_ - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten\_ - Teil\_1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche und Englische Fassung prEN\_1995-1-1:2023.

## 5 Anhänge

### 5.1 Eigengewicht

Zur Ermittlung des Eigengewichts von Außenwandelementen wird ein standardisiertes Element betrachtet (siehe Abbildung 39 und Tabelle 6).

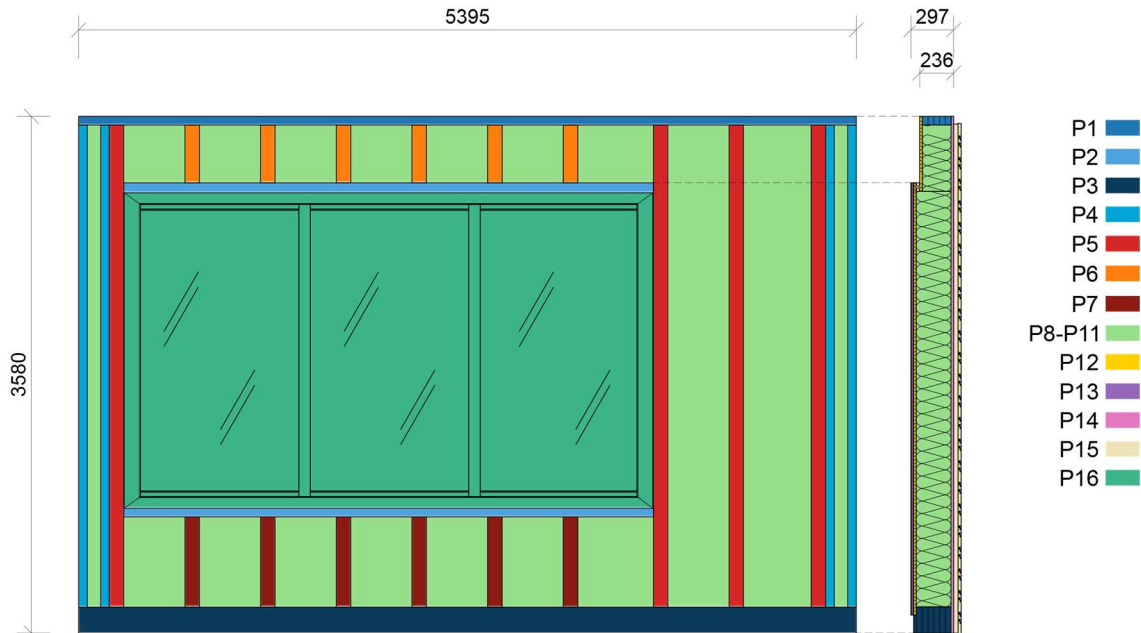


Abbildung 39: Das standardisierte Wandelement, deren Positionen in Tabelle 6 aufgelistet sind.

In Tabelle 6 sind alle Komponenten des standardisierten Wandelements mit ihren jeweiligen Massen zusammengestellt. Das charakteristische Eigengewicht eines Wandelements beträgt 15,5 kN pro Element. Der Bemessungswert des Eigengewichts ergibt sich daraus zu 21,0 kN und wird im Kapitel 5.3.1 als Grundlage für die Bemessung herangezogen. Bei den Positionen 12 bis 16 wurde zur Ermittlung der Massen die Fläche der Fensteröffnung von 8,03 m<sup>2</sup> von der jeweiligen Bauteilfläche abgezogen.

Tabelle 6: Komponenten des standardisierten Wandelements

Pos.	Beschreibung	Material/ Produkt	Dimension [mm]	Roh- dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Anzahl	Gewicht [kg]
1	Rähm	GL 24h	60 x 200 x 5395	385	1	24,9
2	Schwelle	GL 24h	60 x 240 x 3675	385	2	40,7
3	Schwelle	GL 24h	180 x 240 x 5395	385	1	89,7
4	Ständer	GL 24h	60 x 240 x 3340	385	4	74,1
5	Ständer	GL 24h	100 x 240 x 3340	385	4	123,4
6	Ständer	GL 24h	100 x 240 x 400	385	6	22,2
7	Ständer	GL 24h	100 x 240 x 625	385	6	34,7
8	Dämmung	best wood FLEX 50	88 x 240 x 3340	50	2	7,1

Anhang

9	Dämmung	best wood FLEX 50	425 x 240 x 625	50	7	22,3
10	Dämmung	best wood FLEX 50	425 x 200 x 400	50	7	11,9
11	Dämmung	best wood FLEX 50	425 x 240 x 3340	50	2	34,1
12	Innenbeplanung	3S-Platte	18 x 5395 x 3580	410	1	83,3
13	Innenbeplanung	Living-board	19 x 5395 x 3580	700	1	150,1
14	Außenbeplanung	Gipsfaser- Platte	18 x 5395 x 3580	1150	1	233,6
15	Bekleidung	Fi-Lamelle	18 x 5395 x 3580	350	1	71,1
16	Fenster	3-fach- Vergla- sung3	26 x 3675 x 2185	2500	1	521,9
<b>Summe</b>						1545,1

## 5.2 Windlasten

### 5.2.1 Außensog

Zur Ermittlung der Windlast wurde die Windzone Zone 2 angenommen. Die Basisgeschwindigkeitsdruck  $q_{b,0}$  beträgt in diesem Fall  $0,39 \text{ kN/m}^2$  nach DIN EN 1991-1-4/NA [20]. Die Gebäudehöhe beträgt  $25,04 \text{ m}$ . Für vertikale Wände rechteckiger Baukörper dürfen die Außendruckbeiwerte gemäß DIN 1991-1-4 [21] zonenweise in Abhängigkeit von den Gebäudeabmessungen angesetzt werden. Da für die Bemessung die Einwirkungen im obersten Geschoss maßgebend sind, wird die Bezugshöhe  $z_e$  mit  $25,04 \text{ m}$  eingesetzt.

Die Öffnungen werden den Bereichen D (windzugewandt) und E (windabgewandt) zugeordnet (siehe Abbildung 40). Wird im ungünstigen Lastfall angenommen, dass die Öffnungen im Bereich D vollständig geöffnet sind, so werden die Wände im Bereich E durch Außensog und Innendruck beansprucht.

Aufgrund der symmetrischen Gestaltung des Gebäudes kann davon ausgegangen werden, dass die Wände im Bereich D hinsichtlich der maßgebenden Beanspruchung betragsmäßig gleichwertig beansprucht werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Windlastberechnung beispielhaft für den Bereich E durchgeführt.

**Tabelle 7: Parameter zur Ermittlung des Winddrucks (Außendruck)**

Parameter	Wert	Bemerkung
Windzone	2	
Gebäudehöhe ( $h$ )	$25,04 \text{ m}$	
Gebäudebreite ( $b$ )	$22,0 \text{ m}$	
Gebäuelänge ( $d$ )	$16,5 \text{ m}$	
$h/d$	$1,54$	
Basisgeschwindigkeitsdruck ( $q_{b,0}$ )	$0,39 \text{ kN/m}^2$	Windzone 2
Bezugshöhe ( $z_e$ )	$25,04 \text{ m}$	
Böengeschwindigkeit ( $q_p(z_e)$ )	$0,931 \text{ kN/m}^2$	$q_p(z_e) = 1,7 \cdot q_{b,0} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,37}, 7 \text{ m} < z_e \leq 50 \text{ m}$
Außendruckbeiwert ( $c_{pe,10}$ )	$-0,53$	Bereich E
Außendruck ( $w_e$ )	$-0,491 \text{ kN/m}^2$	$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe,10}$

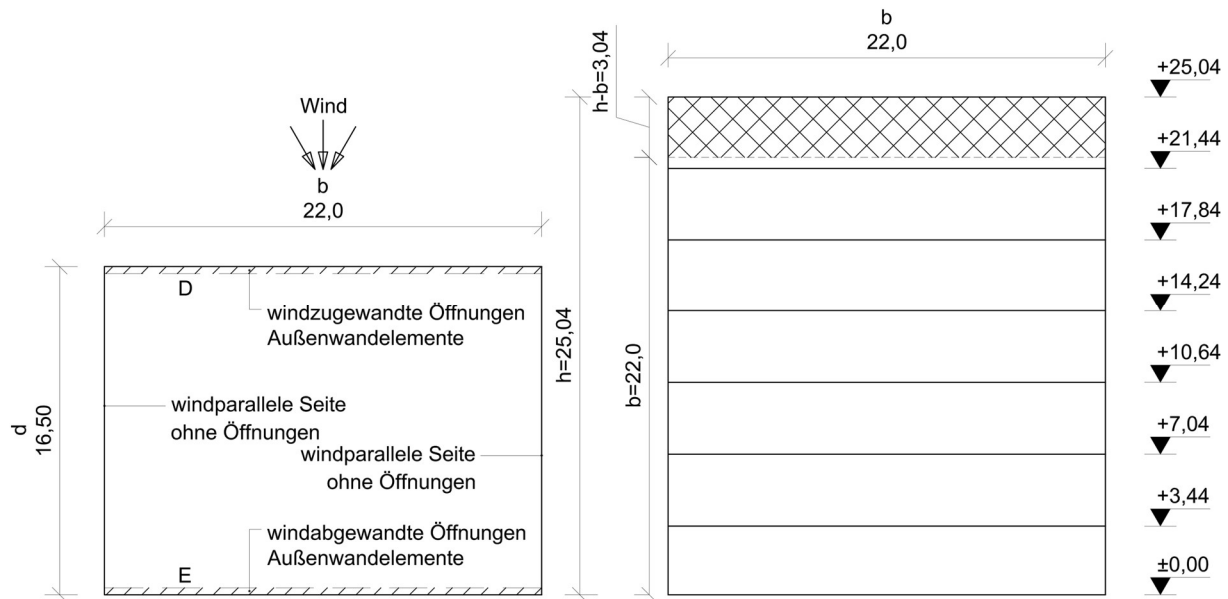


Abbildung 40: Bezugshöhe  $z_e$  für vertikale Wände in Abhängigkeit von Baukörperhöhe  $h$  und -breite  $b$

### 5.2.2 Innendruck

Die Ausführung und Verteilung der Gebäudeöffnungen (windzugewandt, windabgewandt und windparallel) ist im Rahmen des Projekts nicht eindeutig festgelegt. Daher wird das Gebäude ohne dominante Öffnung angesetzt. In diesem Fall sind für den Innendruckbeiwert die ungünstigen Randwerte zu prüfen:  $c_{pi} = 0,2$  und  $c_{pi} = -0,3$  [21].

Für die windabgewandte Wand (Außensog) ist in der Regel der Fall  $c_{pi} = +0,2$  maßgebend, da dadurch die Windlasten am größten werden.

Tabelle 8: Parameter zur Ermittlung des Winddrucks (Innendruck)

Parameter	Wert	Bemerkung
Windzone	2	
Gebäudehöhe ( $h$ )	25,04 m	
Gebäudebreite ( $b$ )	22,0 m	
Gebäuelänge ( $d$ )	16,5 m	
$h/d$	1,54	
Basisgeschwindigkeit ( $q_{b,0}$ )	0,39 kN/m <sup>2</sup>	Windzone 2
Bezugshöhe ( $z_e$ )	25,04 m	
Böengeschwindigkeit ( $q_p(z_e)$ )	0,931 kN/m <sup>2</sup>	$q_p(z_e) = 1,7 \cdot q_{b,0} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,37}$ , $7 \text{ m} < z_e \leq 50 \text{ m}$
Innendruckbeiwert ( $c_{pi}$ )	0,2	
Innendruck ( $w_i$ )	0,186 kN/m <sup>2</sup>	$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pi}$

### 5.2.3 Design-Wert der Windkraft

Tabelle 9: Ermittlung des Design-Werts für den Winddruck (Außen- und Innendruck)

Last	Wert	Bemerkung
Außendruck ( $w_e$ )	- 0,491 kN/m <sup>2</sup>	siehe Tabelle 7
Innendruck ( $w_i$ )	0,186 kN/m <sup>2</sup>	siehe Tabelle 8
<b>Summe</b> ( $w_e - w_i$ )	- 0,677 kN/m <sup>2</sup>	
<b>Design-Wert</b>	- 1,016 kN/m <sup>2</sup>	1,5 x Summe

Die resultierende Windlinienlast wird gleichmäßig auf Rähm und Schwelle verteilt. Für eine Geschosshöhe von 3,6 m ergibt sich je Baukomponente (Rähm und Schwelle):

$$w \cdot \frac{h}{2} = 1,016 \cdot \frac{3,6}{2} = 1,83 \text{ kN/m} \quad \text{Gl. (2)}$$

### 5.3 Bemessungen

#### 5.3.1 Eigengewicht

Die Auflagerung des Außenwandelements erfolgt mit einer Auflagertiefe von 4 cm auf das Tragwerk (BauBuche oder BSH GL28h). Da die Druckfestigkeit von BauBuche GL75 deutlich größer ist als die von BSH GL28h, wird im Folgenden die Nachweisführung für die Drucktragfähigkeit mit den Kennwerten von BSH GL28h durchgeführt.

Die Auflagerfläche ergibt sich zu

$$A = B \cdot L = 4 \cdot 497 = 1988 \text{ cm}^2 \quad \text{Gl. (3)}$$

Für die Druckbeanspruchung wird der Bemessungswert der vertikal einwirkenden Last  $g_d$  von 21,0 kN (siehe Anhang 5.1) angesetzt.

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{g_d}{A} = \frac{21,0}{1988} = 0,01 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Gl. (4)}$$

Der Nachweis der Drucktragfähigkeit quer zur Faser wird mit dem charakteristischen Wert  $f_{c,90,k}$ , dem Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_M$  und dem Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  (KLED = ständig) geführt:

$$f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 0,24 \cdot \frac{0,6}{1,3} = 0,11 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Gl. (5)}$$

Das Ausnutzungsverhältnis ergibt sich zu

$$\eta = \frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} = 9 \% < 1 \quad \text{Gl. (6)}$$

Damit liegt die vorhandene Druckspannung deutlich unter der Bemessungsdruckfestigkeit quer zur Faser, und der Nachweis ist erfüllt.

#### 5.3.2 Windlasten

Im Kapitel 5.2 wurde der Bemessungswert der Windlasten zu 1,83 kN/m ermittelt. Zur Aufnahme dieser Windlasten werden Rampa-Muffen Typ SKL mit  $D = 22 \text{ mm}$  und  $L = 80 \text{ mm}$  sowie Schrauben M12, Festigkeitsklasse 8.8, vorgesehen. Die Tragfähigkeiten der Verbindungsmittel sind in Tabelle 10 dargestellt. Im Vergleich zu den Schrauben ist die Tragfähigkeit der Muffen für die Bemessung maßgebend.

**Tabelle 10: Zugtragfähigkeit der Schraube M12, FK 8.8 und Ausziehtragfähigkeit der Rampa-Muffe  $D = 22 \text{ mm}$ ,  $L = 80 \text{ mm}$**

Verbindungsmittel	char. Tragfähigkeit	$k_{mod}$ (k./s.k.)	$\gamma$	Design-Wert
Muffe	17,10 kN	1,0	1,3	13,15 kN
Schraube	---	---	---	48,6 kN

Der Abstand  $b$  der Verbindungsmittel wird entsprechend dem Konzept der Außenwandelemente bemessen. Es wird vorgesehen, dass jedes zweite Ständerfach mit einem Verbindungsmittel ausgestattet wird. Daraus ergibt sich:

- Achsabstand der Ständer: 525 mm

- Abstand der Verbindungsmittel:  $b = 2 \times 525 \text{ mm} = 1050 \text{ mm} = 1,05 \text{ m}$

Die Bemessung erfolgt nach Gl. (3).

$$F_{Rd} = \frac{F_{ax,0,Rd}}{b} = \frac{13,15}{1,05} = 12,52 \text{ kN/m} > w_d(1,83 \text{ kN/m}) \quad \text{Gl. (7)}$$

Damit ist die Tragfähigkeit der Muffen ausreichend.

Zusätzlich wird die Tragfähigkeit der Doppel-Konusverbinder im Kantholz nachgewiesen. Entsprechend den Versuchsergebnissen (siehe Kapitel 2.6) beträgt die charakteristische Druckschertragfähigkeit in Faserrichtung  $F_{v,0,Rk} = 21,80 \text{ kN}$ . Die Tragfähigkeit quer zur Faserrichtung kann nach [19] über den Faktor  $k_{\alpha,c}$  umgerechnet werden.

$$F_{v,90,Rk} = k_{\alpha,c} \cdot F_{v,0,Rk} = 0,738 \cdot 21,80 = 16,09 \text{ kN} \quad \text{Gl. (8)}$$

Mit

$$k_{\alpha,c} = \frac{1}{(1,3 + 0,001 \cdot d_c) \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{1}{(1,3 + 0,001 \cdot 55) \cdot 1^2 + 0^2} = 0,738$$

Der erforderliche Abstand der Doppel-Konusverbinder ergibt sich zu:

$$b = \frac{F_{v,90,Rd}}{w_d} = \frac{12,38}{1,83} = 6,77 \text{ m} \quad \text{Gl. (9)}$$

Mit

$$F_{v,90,Rd} = F_{v,90,Rk} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 16,09 \cdot \frac{1,0}{1,3} = 12,38 \quad \text{Gl. (10)}$$

Unter Berücksichtigung dieses Ergebnisses sowie der geometrischen Randbedingungen wird ein Abstand von 1,585 m gewählt. Damit können im Kantholz insgesamt 4 Doppel-Konusverbinder gleichmäßig verteilt werden.

Der Abstand zum unbeanspruchten Hirnholz beträgt 120 mm und ist damit größer als die geforderte Mindestanforderung von 110 mm nach [9].

#### 5.4 Herleitung der Prüfkörpergeometrien für Zugscherversuche

Im Folgenden wird die Herleitung der Prüfkörpergeometrien für die Zugscherversuche erläutert (vgl. Abschnitt 2.6). Als Prüfmaterial wird Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 verwendet.

Ziel der Versuche ist es, den erforderlichen Mindestquerschnitt der Holzbauteile bei Zugbeanspruchung parallel zur Faser so zu bestimmen, dass ein Versagen des Holzes vor dem Versagen des Verbindungsmittels ausgeschlossen ist. Es gilt:

$$F_{t,0} \geq F_{v,0} \quad \text{Gl. (11)}$$

Der minimale effektive Holzquerschnitt im Bereich der Bohrung muss demnach eine Zugtragfähigkeit in Faserrichtung aufweisen, die größer ist als die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels. Als versuchstechnische Auslegungsgrundlage dienen die Ergebnisse der durchgeführten Druckscherversuche (siehe Anhang 5.6). Die mittlere Schertragfähigkeit des Konusadapters in Brettschichtholz GL24 beträgt dabei 35,0 kN.

Berechnungsansatz zur Ermittlung der Mindestbreite

$$F_{t,0,mean} \geq F_{v,0,mean} \quad \text{Gl. (12)}$$

Mit

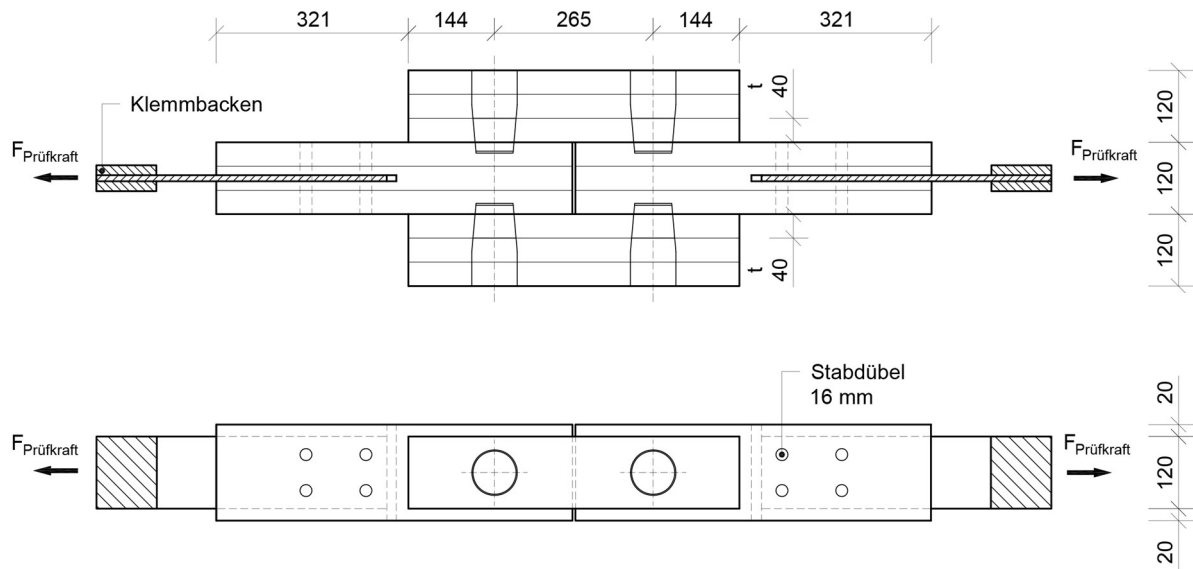
$$F_{t,0,mean} = f_{t,0,k} \cdot 1,2 \cdot A_{eff} = 1,92 \cdot 1,2 \cdot t \cdot b_{ef} \quad \text{Gl. (13)}$$

Der Mittelwert der Zugfestigkeit von GL24 wird unter Annahme eines Umrechnungsfaktors von 1,2 aus dem charakteristischen Wert abgeleitet. Der Parameter  $t$  beschreibt Einstecktiefe des Konusadapters in das Seitenholz (SH) und beträgt in diesem Fall 40 mm (siehe Abbildung 41).

Durch Einsetzen von Gleichung (14) in Gleichung (13) ergibt sich die minimale effektive Breite im Bereich der Bohrung zu:

$$b_{ef} \geq \frac{F_{v,0,mean}}{1,92 \cdot 1,2 \cdot t} = \frac{35,0}{1,92 \cdot 1,2 \cdot 4} = 3,8 \text{ cm} \quad \text{Gl. (14)}$$

In Abhängigkeit vom Bohrungsdurchmesser von 76 mm wurde die Breite der Seitenhölzer auf 120 mm ( $76 \text{ mm} + b_{ef}$ ) festgelegt. Daraus ergibt sich ein Randabstand von 60 mm, der größer ist als der erforderliche Mindestrandabstand von  $a_{4,c} = 43,2 \text{ mm}$  (siehe Tabelle 5). Zur Fixierung des 10 mm dicken Stahlblechs wurden vier Stabdübel mit einem Durchmesser von 16 mm vorgesehen.



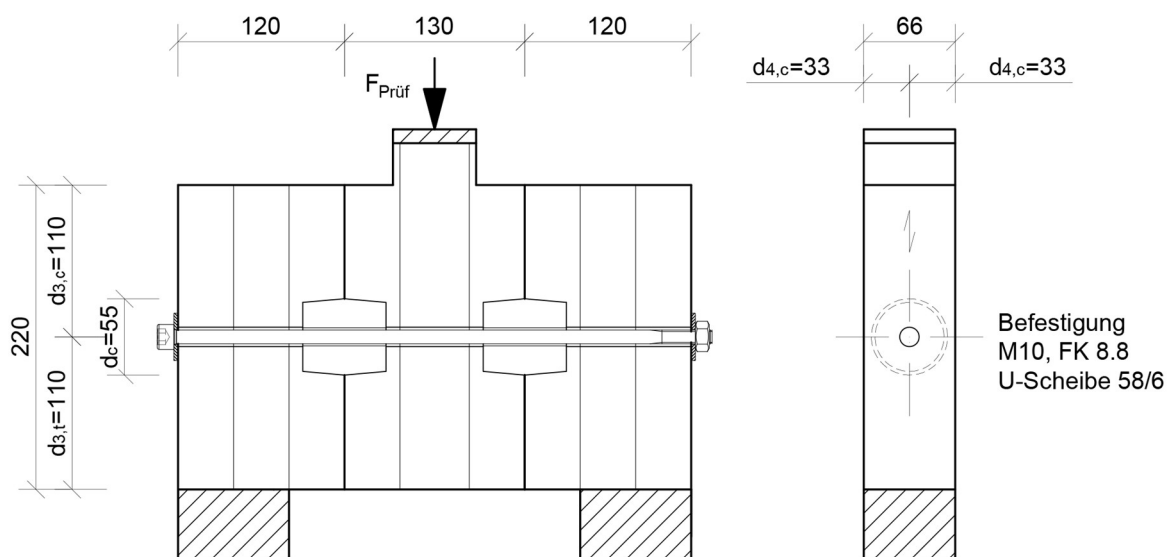
**Abbildung 41: Schematische Darstellung des Zugscherversuchs mit Konusadapter in BSH GL24**

### 5.5 Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern

Die Versuchskörper für die Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern wurden aus BSH GL24 hergestellt. Die Mindestrandabstände der Versuchskörper wurden in Anlehnung an DIN EN 1995-1-1 [9] eingehalten, wobei der Durchmesser des Verbinders zwischen den verbundenen Bauteilen mit  $d_c = 55$  mm als maßgebender Bezugsdurchmesser angesetzt wurde.

**Tabelle 11: Mindestabstände von Doppel-Konusverbindern nach DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter  $d_c$  beschreibt bei Doppel-Konusverbindern den Durchmesser des Verbinders zwischen den verbundenen Bauteilen.**

Verbinder	$a_{3,c} = 2,0d_c$	$a_{3,t} = 2,0d_c$	$a_{4,c} = 0,6d_c$
Doppel-Konusverbinder ( $d_c = 55$ mm)	110 mm	110 mm	33 mm



**Abbildung 42: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern**

Die Versuchsreihe umfasste insgesamt sechs Versuchskörper, wobei in jedem Versuchskörper zwei Doppel-Konusverbinder angeordnet und gemeinsam belastet wurden. Die Tragfähigkeit und die Nachgiebigkeit der Verbinder wurden experimentell ermittelt, indem die Versuche gemäß DIN EN 26891 [18] durchgeführt wurden. Die Prüfgeschwindigkeit wurde dabei so gewählt, dass das Versagen innerhalb eines Zeitraums von  $300 \pm 120$  s eintrat.

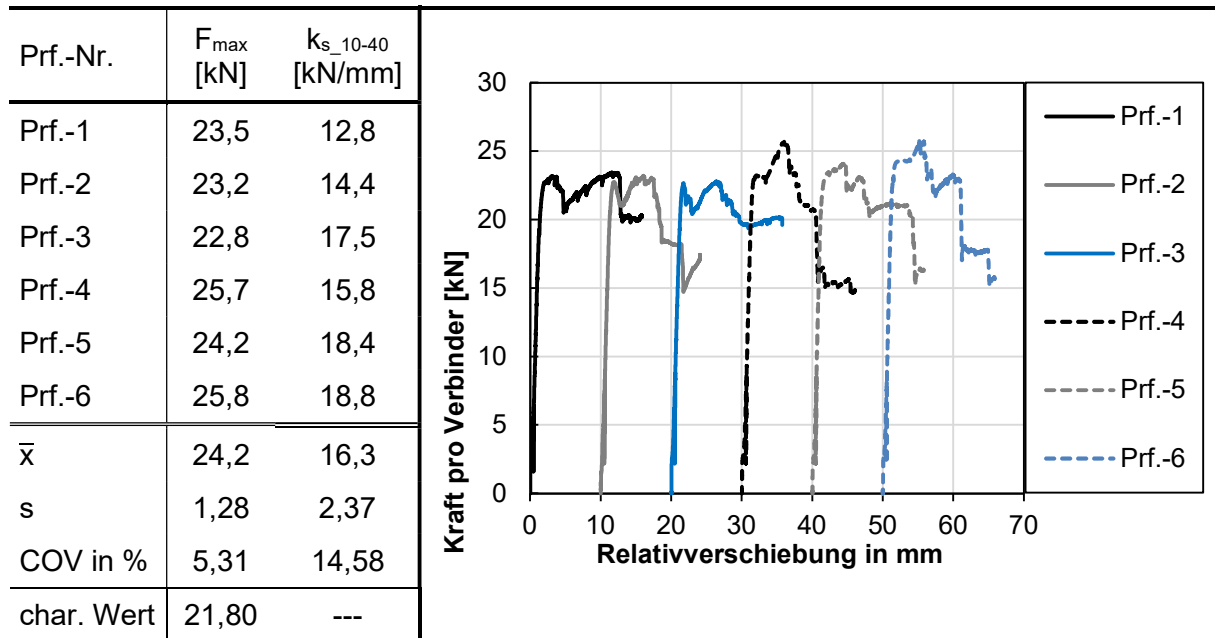
Die Montage der Verbinder erfolgte mittels Drehmomentschlüssel mit einem Anzugsdrehmoment von 16 Nm, um eine definierte Vorspannung sicherzustellen. Das Versagensverhalten der Doppel-Konusverbinder unter Druckscherbeanspruchung wurde anhand der Kraft-Ver-schiebungskurve sowie durch visuelle Beobachtungen erfasst.

#### - Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit

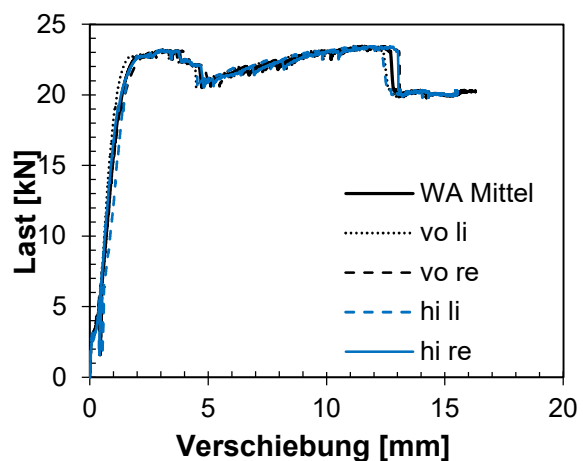
Die ermittelten Werte der Tragfähigkeit und der Nachgiebigkeit sind in der Tabelle 12 zusammengefasst. Aufgrund materialbedingter Inhomogenitäten des Holzes können die innerhalb eines Versuchskörpers angeordneten Doppel-Konusverbinder unterschiedliche Tragfähigkeiten aufweisen. Infolge des Versuchsaufbaus ist es jedoch nicht eindeutig bestimmbar, welcher Verbinder zuerst versagt bzw. zu welchem Zeitpunkt der zweite Verbinder seine Tragfähigkeit vollständig verliert.

Aus diesem Grund wird die im Versuch erreichte Höchstbruchkraft als Tragfähigkeit des Verbinderspaars definiert. Diese Vorgehensweise führt zu einer konservativen Bewertung der Tragfähigkeit. Der Mittelwert der Tragfähigkeit je Verbinder beträgt 24,2 kN, während der zugehörige charakteristische Wert 21,8 kN beträgt.

**Tabelle 12: Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit von Doppel-Konusverbindern in Druckscherversuchen mit BSH GL24**



Zur Ermittlung der Nachgiebigkeit wurden an jeder Scherfuge jeweils vorne und hinten Wegaufnehmer installiert, um die Relativverschiebung zwischen den verbundenen Bauteilen zu erfassen (siehe Abbildung 43). Für die Auswertung wurde der Mittelwert der vier gemessenen Verschiebungen als maßgebende Relativverschiebung angesetzt. Der Mittelwert der Nachgiebigkeit beträgt 16,3 kN/mm.



**Abbildung 43: Versuchsaufbau der Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern, Zustand nach dem Bruch Prf.-1**

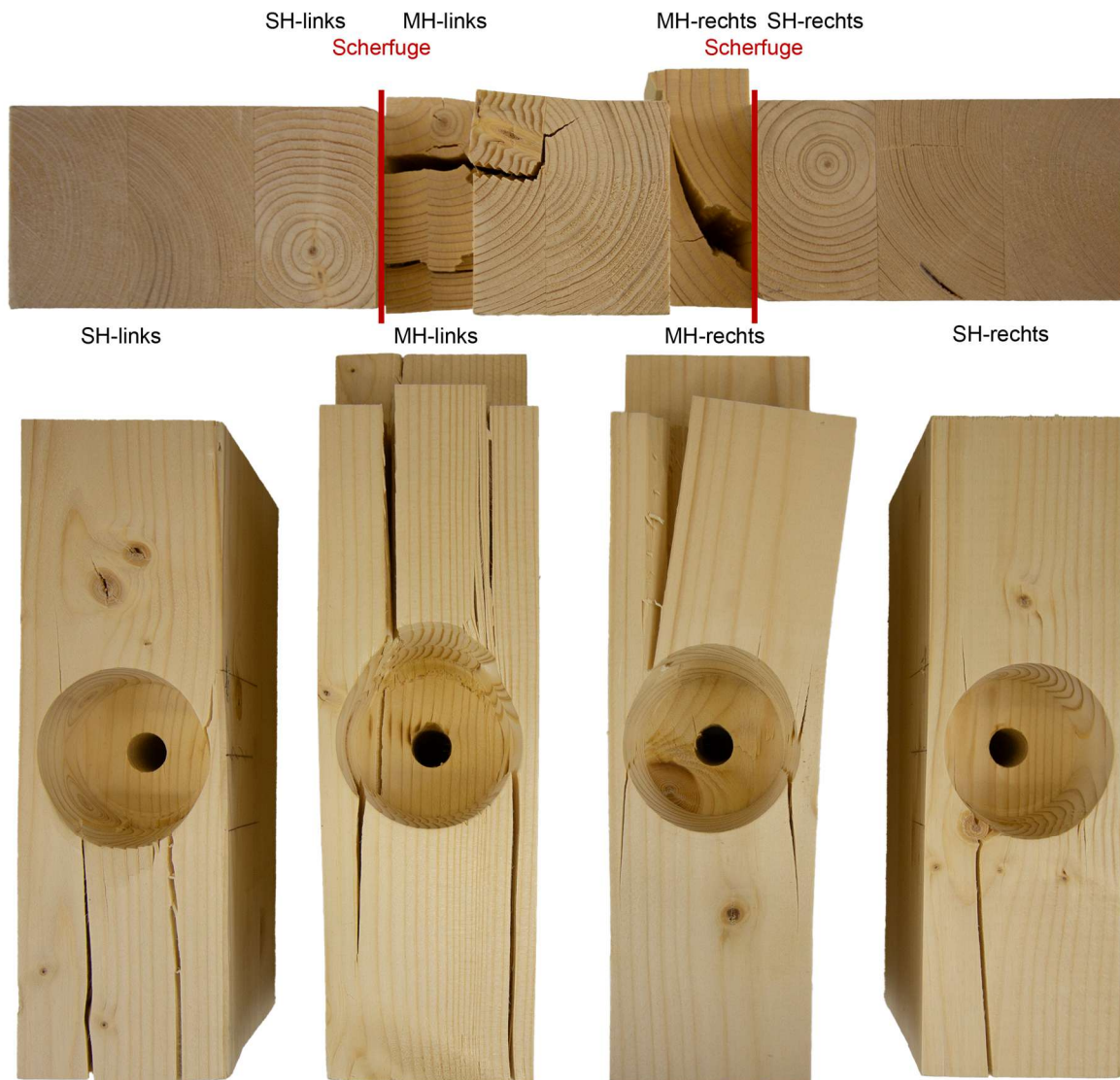
Aus den Last-Verschiebungskurven ist ersichtlich, dass die Verbindung bis zu einer Relativverschiebung von etwa 1,5 mm ein überwiegend elastisches Verhalten aufweist (siehe Abbildung 43). In diesem Bereich wird bereits eine Last von rund 21 kN erreicht, was etwa 89 %

der Höchstbruchlast entspricht. Dieses Verhalten weist auf eine hohe Steifigkeit der Verbindung mit Doppel-Konusverbindern hin.

Daraus lässt sich ableiten, dass unter üblichen Nutzungslasten überwiegend elastische Verformungen zu erwarten sind. Somit bleibt die Tragfähigkeit der Verbindung nach Entlastung grundsätzlich erhalten, was eine zerstörungsarme Demontage sowie eine potenzielle Wiederverwendung der Verbindung begünstigt.

- Versagensverhalten

Das Versagensverhalten ist bei allen sechs Versuchskörpern gleichartig ausgeprägt. Als primärer Versagensmechanismus trat Blockscherversagen im Holz auf. Mit zunehmender Eindrückung des Mittelholzes (MH) kommt es in einer weiteren Laststeigerung zusätzlich zu Querkzugversagen.

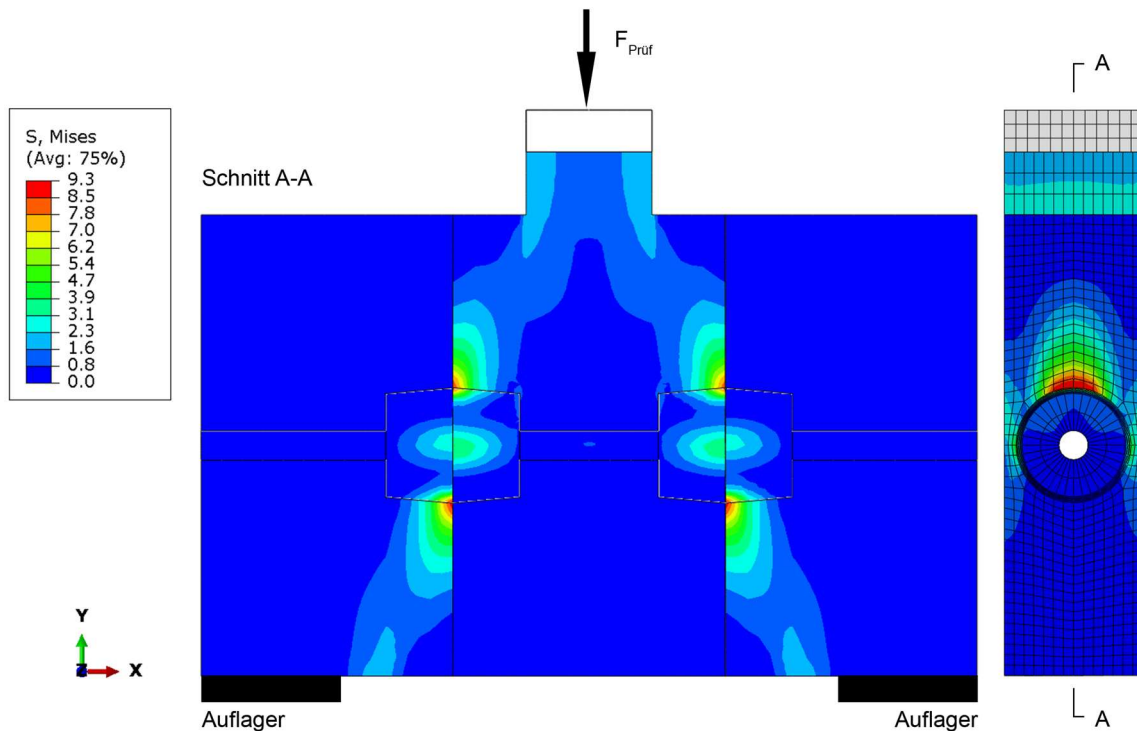


**Abbildung 44: Versagensverhalten der Druckscherversuche mit Doppel-Konusverbindern**

Zur Verifizierung des experimentell beobachteten Versagensverhaltens wurde eine analytische Untersuchung mittels der Finite-Elemente-Methode in Abaqus durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass die Spannungen im Bereich des Kopfes des MH initiiert

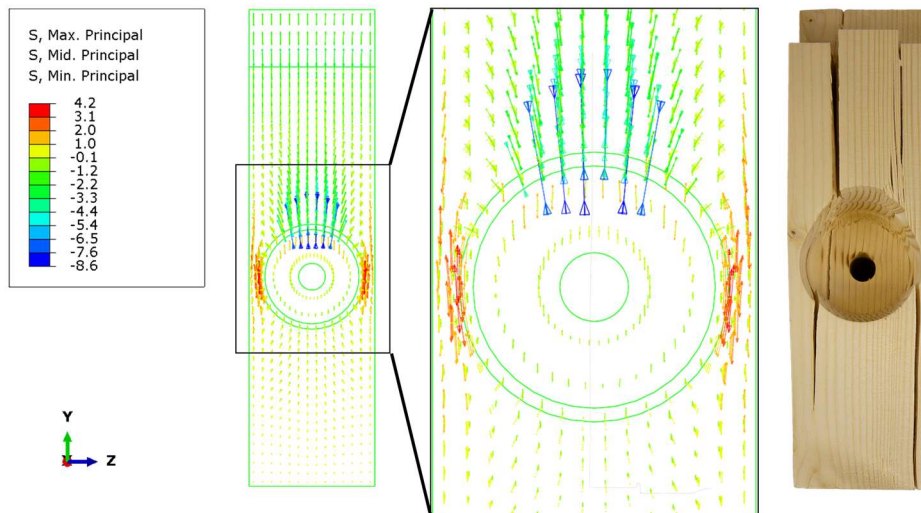
werden, wo die äußere Prüfkraft eingeleitet wird. Von dort werden die Spannungen über den Verbinder in das Seitenholz (SH) weitergeleitet.

Dabei bilden sich oberhalb der Bohrung im MH sowie unterhalb der Bohrung im SH ausgeprägte Spannungskonzentrationszonen aus. Diese Spannungsüberhöhungen führen zu lokalen Druckspannungen in der Faserrichtung, die das beobachtete Versagen erklären und qualitativ mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen.



**Abbildung 45: Spannungsverteilung in der Mittelebene in Z-Richtung**

Abbildung 46 zeigt die Vektordarstellung der Hauptspannungsrichtungen im Bereich der Bohrung des MH. Die Darstellung verdeutlicht, dass neben den dominierenden Druckspannungen (blaue und grüne Pfeile) auf der belasteten Seite der Bohrung zusätzlich Zugspannungen im umliegenden Holz (rote und gelbe Pfeile) entstehen. Diese Zugspannungen begünstigen das Auftreten von Querzugversagen und erklären das kombinierte Versagensbild aus Blockscherversagen und Querzugversagen, das in den experimentellen Untersuchungen beobachtet wurde.



**Abbildung 46: Vektordarstellung der Hauptspannungsrichtungen im MH**

Gemäß DIN EN 1995-1-1 [9] kann die Schubtragfähigkeit von Scheibendübeln mit den folgenden Gleichungen ermittelt werden.

$$F_{v,0,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 (35 d_c^{1,5}) \\ k_1 k_3 t_h (31,5 d_c) \end{array} \right. \quad \text{Gl. (15)}$$

Dabei sind:

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 1$$

$$k_3 = 1,1$$

$$k_4 = 1,0$$

$$k_5 = 1,0$$

$$d_c = 55 \text{ mm, Durchmesser des Verbinders in der Scherfuge}$$

$$t_h = 30 \text{ mm, Einlasstiefe}$$

Mit den oben angegebenen Werten beträgt die nach Gl. (16) rechnerisch ermittelte Schubtragfähigkeit des Verbinders 12,56 kN. Dieser Wert entspricht etwa 58 % des experimentell ermittelten charakteristischen Tragfähigkeitswertes von 21,80 kN und stellt somit eine deutliche Unterschätzung der Tragfähigkeit dar.

Darüber hinaus werden in der DIN EN 1995-1-1 Entwurf [22] Spröbruchversagensarten von Verbindungen mit seitlich belasteten stiftförmigen Verbindungsmitteln parallel zur Faserrichtung klassifiziert. Eine dieser Versagensarten ist das Kernschubversagen, welches qualitativ dem in den durchgeführten Versuchen beobachteten Versagensverhalten entspricht.

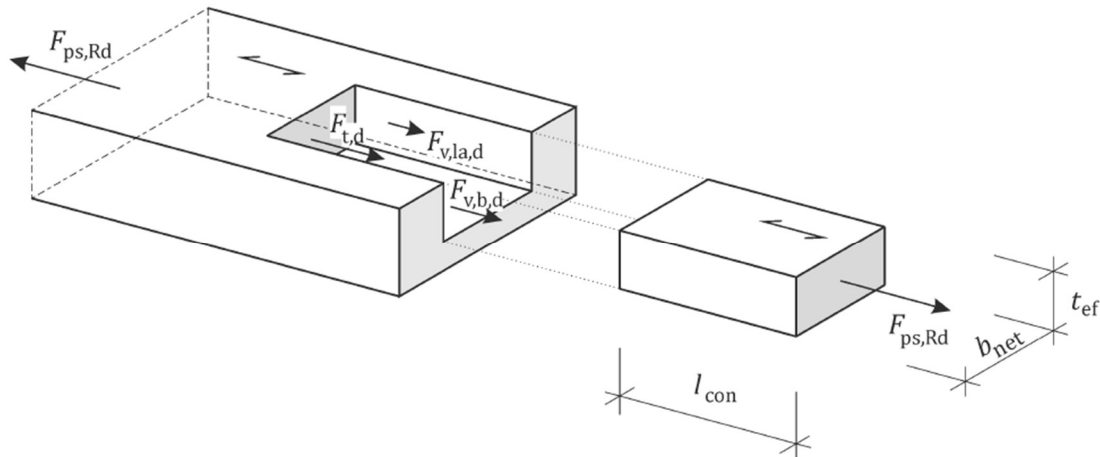


Abbildung 47: Kernschubversagensflächen, Bild aus DIN EN 1995-1-1 Entwurf [22]

Aus diesem Grund wurde die Schubtragfähigkeit des untersuchten Verbinders zusätzlich in Anlehnung an die in der DIN EN 1995-1-1 Entwurf [22] angegebenen Gleichungen für Kernschubversagen rechnerisch ermittelt:

$$F_{ps,Rk} = \max \left\{ \begin{array}{l} 2F_{v,la,k} \\ F_{t,b,k} + F_{v,b,k} \end{array} \right. \quad \text{Gl. (16)}$$

Die Bemessungswiderstände werden wie folgt bestimmt:

$$F_{v,la,k} = k_v t_{ef} l_{con} f_{v,k} = 0,73 \cdot 30 \cdot 85 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 4,65 \text{ kN} \quad \text{Gl. (17)}$$

$$F_{v,b,k} = k_v l_{con} b_{net} f_{v,k} = 0,73 \cdot 85 \cdot 55 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 8,53 \text{ kN} \quad \text{Gl. (18)}$$

mit

$$k_v = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{G_{GL24,mean}}{E_{GL24,mean}}} = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{650}{11500}} = 0,73 \quad \text{Gl. (19)}$$

$$l_{con} = 85 \text{ mm}$$

$$f_{v,GL24,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

Die effektive Dicke der Ebene  $t_{ef}$  wird mit der Einlasstiefe von 30 mm angesetzt, während die Nettobreite  $b_{net}$  dem Durchmesser  $d_c$  von 55 mm entspricht. Zudem wird die Schubtragfähigkeit mit dem Rissfaktor  $k_{cr}$  von 0,714 für BSH GL24 berücksichtigt.

Die Zugtragfähigkeit parallel zur Faser  $F_{t,b,k}$  wird bei Doppel-Konusverbindern nicht berücksichtigt, da durch die Bohrung im Holzbauteil der tragende Querschnitt unterbrochen wird und somit keine Zugkräfte in Faserrichtung übertragen werden können.

In den durchgeführten Versuchen wurde die Schubbeanspruchung über zwei seitliche Schubebenen sowie eine untere Schubebene aufgenommen, die parallel zur Scherfuge verläuft. Entsprechend ergibt sich die Schubtragfähigkeit als Summe dieser Widerstände zu:

$$F_{ps,Rk} = 2F_{v,la,k} + F_{v,b,k} = 17,83 \text{ kN} \quad \text{Gl. (20)}$$

Der Vergleich zeigt, dass die Anwendung der Bemessungsgleichung nach Gleichung (16) die Tragfähigkeit des Doppel-Konusverbinders deutlich unterschätzt, während die Berücksichtigung sprödbuchbasierter Versagensmechanismen eine bessere Einschätzung der Schubtragfähigkeit von Doppel-Konusverbindern ermöglicht.

Die Unterschätzung des Ansatzes nach dem Kernschubversagen lässt sich auf den Rissfaktor  $k_{cr}$  zurückführen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Abmessungen der Prüfkörper ist davon auszugehen, dass die Schubtragfähigkeit nicht in ausgeprägtem Maße durch Rissbildung beeinflusst wird. Wird der Rissfaktor in der Berechnung nicht berücksichtigt, steigt die rechnerische Tragfähigkeit auf 24,97 kN.

Der Vergleich zeigt, dass die rechnerisch ermittelte Tragfähigkeit in diesem Fall oberhalb der experimentell bestimmten Werte liegt. Dies weist darauf hin, dass die Berücksichtigung des Rissfaktors  $k_{cr}$  für eine konservative Einschätzung der Tragfähigkeit sinnvoll und erforderlich ist.

**Tabelle 13: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Doppel-Konusverbindern**

Ansatz	Experi- ment	rechnerisch		
		nach Scheibendübel	nach Kernschub ( $k_{cr} = 0,714$ )	nach Kernschub ( $k_{cr} = 0$ )
char. Wert	21,80 kN	12,56 kN (-42 %)	17,83 kN (-18 %)	24,97 kN (+14 %)

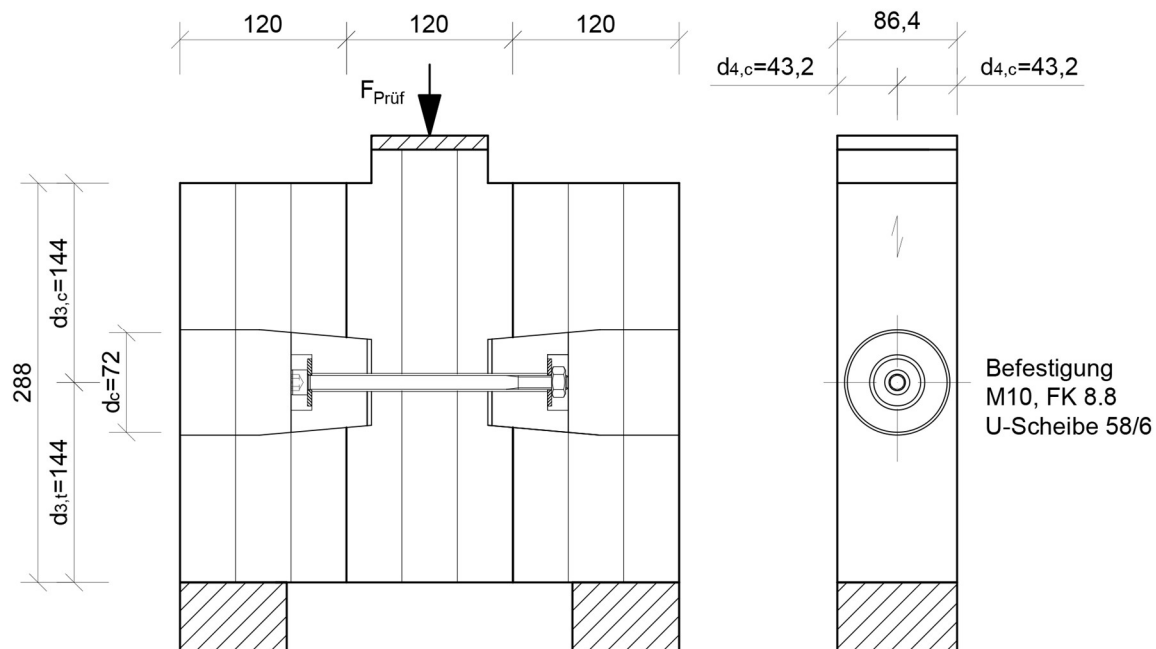
## 5.6 Druckscherversuche mit Konusadaptern

Die Druckscherversuche mit Konusadaptern wurden an Prüfkörpern aus BSH GL24 durchgeführt. Pro Prüfkörper wurden jeweils zwei Konusadapter angeordnet. Die Abmessungen der Prüfkörper wurden unter Berücksichtigung der erforderlichen Mindestrandabstände festgelegt (siehe Tabelle 14). Die Montage der Verbinder erfolgte mit einem Anzugsdrehmoment von 16 Nm.

Die experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit und der Nachgiebigkeit erfolgte gemäß DIN EN 26891 [18]. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass das Versagen innerhalb eines Zeitraums von  $300 \pm 120$  s eintrat.

**Tabelle 14: Mindestabstände von Konusadaptern nach DIN EN 1995-1-1 [9]. Der Parameter  $d_c$  entspricht dem größeren Durchmesser (72 mm, in Abbildung 35).**

Verbinder	$a_{3,c}=2,0d_c$	$a_{3,t}=2,0d_c$	$a_{4,c}=0,6d_c$
Konusadapter ( $d_c = 72$ mm)	144 mm	144 mm	43,2 mm



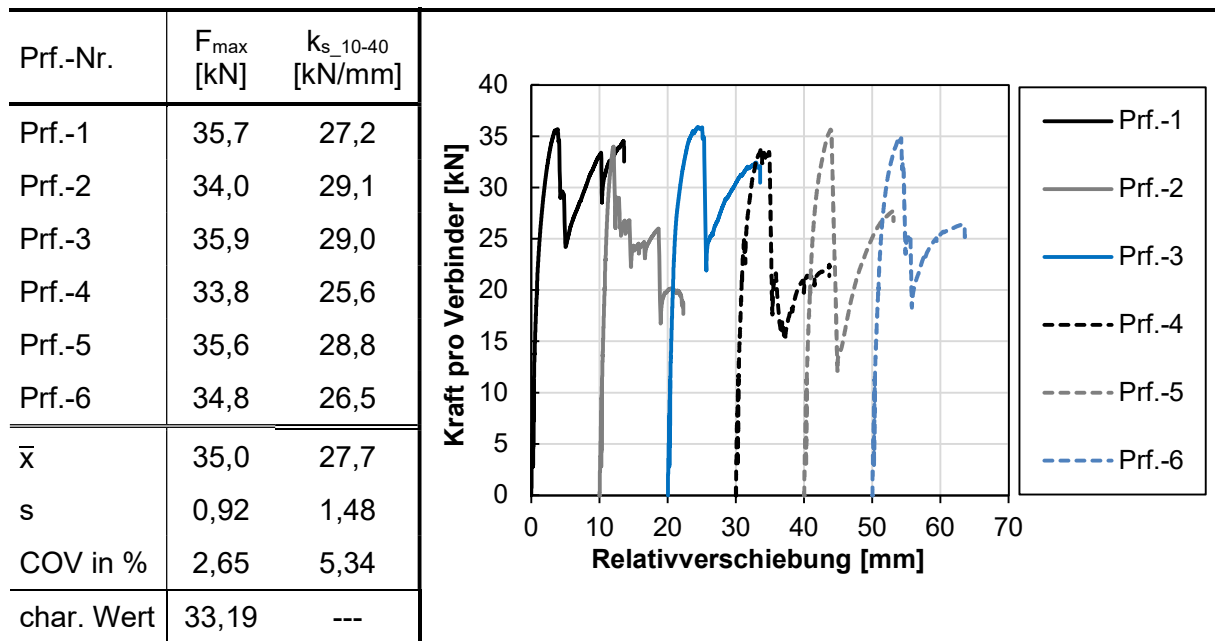
**Abbildung 48: Versuchskörper und Versuchsaufbau für die Druckscherversuche mit Konusadaptern**

### - Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit

Die ermittelten Werte der Tragfähigkeit und der Nachgiebigkeit sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Aufgrund der materialbedingten Inhomogenitäten des Holzes können die innerhalb eines Prüfkörpers angeordneten Konusadapter unterschiedliche Tragfähigkeiten aufweisen. Da infolge des Versuchsaufbaus der vollständige Tragfähigkeitsverlust des zweiten Verbinders nicht eindeutig zugeordnet werden kann, wird die im Versuch erreichte Höchstbruchkraft als Tragfähigkeit des jeweiligen Verbinderpaars angesetzt.

Diese Vorgehensweise führt zu einer konservativen Bewertung der Tragfähigkeit. Der Mittelwert der Tragfähigkeit je Verbinder beträgt 35,0 kN, während der zugehörige charakteristische Wert 33,19 kN beträgt.

Tabelle 15: Tragfähigkeit und Nachgiebigkeit des Verbinders



Zur Bestimmung der Nachgiebigkeit wurden an jeder Scherfuge jeweils auf der Vorder- und Rückseite Wegaufnehmer installiert, um die Relativverschiebung zwischen den verbundenen Bauteilen zu erfassen (vgl. Abbildung 43). Für die Auswertung wurde der Mittelwert der vier gemessenen Verschiebungen als maßgebende Relativverschiebung herangezogen. Der ermittelte Mittelwert der Nachgiebigkeit beträgt 27,7 kN/mm.

Die Auswertung der Last-Verschiebungskurven zeigt, dass die Verbindung bis zu einer Relativverschiebung von etwa 0,6 mm ein überwiegend elastisches Tragverhalten aufweist (siehe Abbildung 43). In diesem Verschiebungsbereich wird bereits eine Last von rund 16,51 kN erreicht, was etwa 50 % der Höchstbruchlast entspricht. Dieses Verhalten verdeutlicht die hohe Steifigkeit der Verbindung mit Konusadaptern.

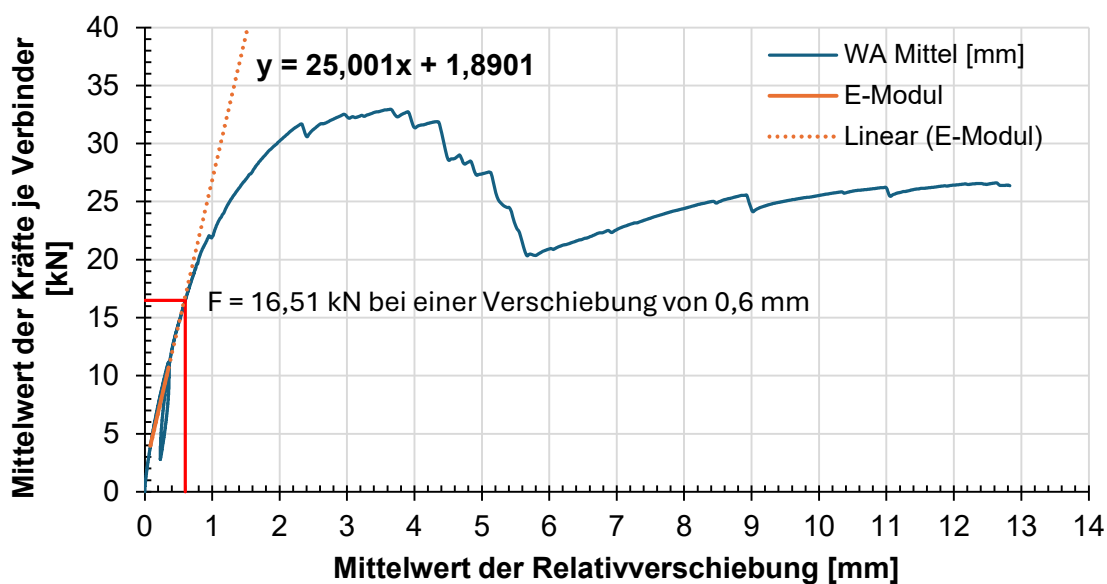


Abbildung 49: Resultierende Kraft-Verschiebungskurve aus den Mittelwerten von allen sechs Versuchen

Ab einer Relativverschiebung von etwa 0,6 mm setzt eine plastische Verformung ein, wobei die übertragene Kraft weiterhin ansteigt. Das erste Bruchereignis trat bei einer Kraft von 35,0 kN auf. Ab diesem Lastniveau kommt es zu einem deutlichen Tragfähigkeitsverlust der Verbindung.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass unter üblichen Nutzungslasten überwiegend elastische Verformungen zu erwarten sein kann. Die Tragfähigkeit der Verbindung bleibt nach Entlastung grundsätzlich erhalten, was eine zerstörungsarme Demontage sowie eine potenzielle Wiederverwendung der Verbindung begünstigt.

- Versagensverhalten

Das Versagensverhalten wird getrennt für das Mittelholz (MH) und die Seitenhölzer (SH) betrachtet. Im Mittelholz tritt ausschließlich Blockscherversagen auf, während in den Seitenhölzern sowohl Blockscherversagen als auch Ausspaltversagen beobachtet wird. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der jeweiligen Versagensart und der erreichten Bruchkraft lässt sich nicht feststellen.

Auf Grundlage der in Tabelle 1 zusammengefassten Versuchsergebnisse zeigt sich, dass das dominierende Versagen durch Blockscherversagen entweder im Mittelholz oder in den Seitenhölzern verursacht wird. Im Mittelholz wurde die Bohrung 3 mm tiefer ausgeführt als die Einlasstiefe des Verbinders von 15 mm, um Fertigungstoleranzen zu berücksichtigen. Infolgedessen setzt das Blockscherversagen nicht unmittelbar am Ende der Bohrung ein, sondern etwa 3 mm oberhalb davon (siehe Abbildung 50).

**Tabelle 16: Zusammenhang zwischen Versagensverhalten und Bruchkraft, SH: Seitenholz, MH: Mittelholz, kein: kein ausgeprägtes Versagen festgelegt**

Prf.-Nr.	Versagensverhalten				Bruchkraft [kN]
	SH-L	MH-L	MH-R	SH-R	
1	kein	Blockscher	Blockscher	Ausspalten	35,7
2	Blockscher	Blockscher	Blockscher	Blockscher	34,0
3	Blockscher	Blockscher + Ausspalten	Blockscher	kein	35,9
4	Aufspalten	Blockscher	Blockscher	Blockscher	33,8
5	kein	Blockscher	Blockscher	kein	35,6
6	kein	Blockscher	Blockscher	Blockscher	34,8



**Abbildung 50: Versagen im MH (links) und SH (rechts)**

Im Abschnitt 5.5 wurden zwei Ansätze zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit erzählt. vorgestellt. Für die Konusadapter wird die Schubtragfähigkeit in Anlehnung an diese beiden Ansätze rechnerisch ermittelt:

$$F_{v,0,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 (35 d_c^{1,5}) \\ k_1 k_3 t_h (31,5 d_c) \end{array} \right. \quad \text{Gl. (21)}$$

Dabei sind:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 \\ k_2 &= 1 \\ k_3 &= 1,1 \\ k_4 &= 1,0 \\ k_5 &= 1,0 \\ d_c &= 65 \text{ mm, Durchmesser des Verbinders in der Scherfuge} \\ t_h &= 15 \text{ mm, Einlasstiefe} \end{aligned}$$

Mit den oben angegebenen Werten beträgt die nach Gl. (16) rechnerisch ermittelte Schubtragfähigkeit des Verbinders 18,34 kN. Dieser Wert entspricht etwa 55 % des experimentell ermittelten charakteristischen Tragfähigkeitswertes von 33,19 kN und stellt somit eine deutliche Unterschätzung der Tragfähigkeit dar.

Im Unterschied zu den Doppel-Konusverbindern sind die Bohrungen im Mittelholz (MH) und in den Seitenhölzern (SH) bei den Konusadaptern nicht symmetrisch angeordnet. Die Bohrung im Mittelholz ist als 15 mm tiefe Rundsacktasche mit einem Durchmesser von 65 mm ausgebildet. Die Bohrung im Seitenholz hingegen ist als konische Durchgangsbohrung ausgeführt. Aus diesem Grund wird die Schubtragfähigkeit auf Grundlage des Kernschubversagensansatzes getrennt für MH und SH ermittelt.

Die Bemessungswiderstände im MH ergeben sich zu:

$$F_{v,la,MH,k} = k_v t_{ef} l_{conf} f_{v,k} = 0,73 \cdot 15 \cdot 111,5 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 3,05 \text{ kN} \quad \text{Gl. (22)}$$

$$F_{v,b,MH,k} = k_v l_{con} b_{net} f_{v,k} = 0,73 \cdot 111,5 \cdot 65 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 13,22 \text{ kN} \quad \text{Gl. (23)}$$

mit

$$k_v = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{G_{GL24,mean}}{E_{GL24,mean}}} = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{650}{11500}} = 0,73 \quad \text{Gl. (24)}$$

$$l_{con} = 111,5 \text{ mm}$$

$$f_{v,GL24,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

Die effektive Dicke der Ebene  $t_{ef}$  wird mit der Einlasstiefe im MH von 15 mm angesetzt, während die Nettobreite  $b_{net}$  dem Durchmesser  $d_c$  von 65 mm entspricht. Zudem wird die Schubtragfähigkeit mit dem Rissfaktor  $k_{cr}$  von 0,714 für BSH GL24 berücksichtigt.

Die Schubtragfähigkeit im MH ergibt sich somit zu:

$$F_{ps,MH,Rk} = 2F_{v,la,MH,k} + F_{v,b,MH,k} = 19,32 \text{ kN} \quad \text{Gl. (25)}$$

Die Bemessungswiderstände im SH werden analog bestimmt:

$$F_{v,la,SH,k} = k_v t_{ef} l_{con} f_{v,k} = 0,73 \cdot 40 \cdot 108 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 7,88 \text{ kN} \quad \text{Gl. (26)}$$

$$F_{v,b,SH,k} = k_v l_{con} b_{ef} f_{v,k} = 0,73 \cdot 108 \cdot 65 \cdot 3,5 \cdot 0,714 = 12,81 \text{ kN} \quad \text{Gl. (27)}$$

mit

$$k_v = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{G_{GL24,mean}}{E_{GL24,mean}}} = 0,4 + 1,4 \sqrt{\frac{650}{11500}} = 0,73 \quad \text{Gl. (28)}$$

$$l_{con} = 108 \text{ mm}$$

$$f_{v,GL24,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

Dabei wird die effektive Dicke  $t_{ef}$  mit der Einlasstiefe im SH von 40 mm angesetzt, während die Nettobreite  $b_{net}$  dem Durchmesser  $d_c$  von 72 mm entspricht. Der Rissfaktor  $k_{cr}$  von 0,714 wird ebenfalls berücksichtigt.

Die Schubtragfähigkeit im SH ergibt sich zu:

$$F_{ps,SH,Rk} = 2F_{v,la,SH,k} + F_{v,b,SH,k} = 28,57 \text{ kN} \quad \text{Gl. (29)}$$

**Tabelle 17: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Konusadaptern**

Ansatz	Experiment	rechnerisch		
		nach Scheibendübel	nach Kernschub im MH	nach Kernschub im SH
char. Wert	33,19 kN	18,34 kN (-48 %)	19,32 kN (-42 %)	28,57 kN (-14 %)

Tabelle 17 fasst die nach unterschiedlichen Ansätzen ermittelten Tragfähigkeiten der Konusadapter zusammen. Wird der Rissfaktor bei der rechnerischen Ermittlung nicht berücksichtigt, erhöht sich die Tragfähigkeit im Mittelholz auf 27,06 kN und im Seitenholz auf 40,01 kN (siehe Tabelle 18). Dies verdeutlicht, dass der Ansatz zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit nach dem Kernschubversagen eine realistischere Abschätzung der Tragfähigkeit ermöglicht.

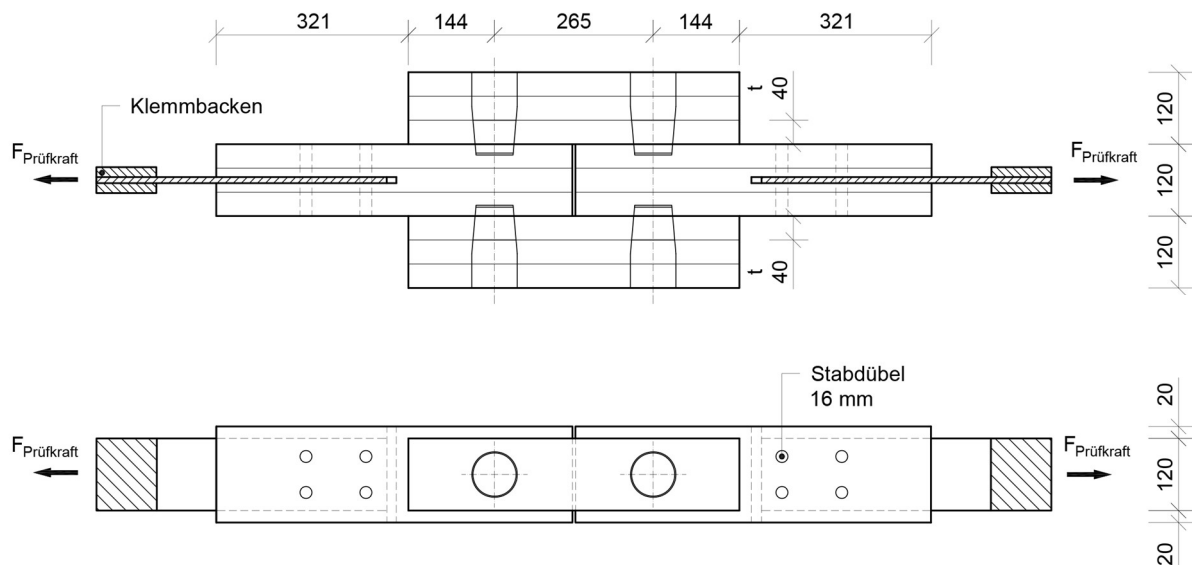
Die rechnerischen Ergebnisse zeigen zudem, dass die Schubtragfähigkeit im Mittelholz (MH) im Vergleich zum Seitenholz (SH) maßgebend ist. Unabhängig davon, dass sich aufgrund des Versuchsaufbaus anhand der Videoaufzeichnungen nicht eindeutig feststellen lässt, ob das Versagen zuerst im Mittelholz oder im Seitenholz einsetzte, lässt sich aus den rechnerisch ermittelten Tragfähigkeiten ableiten, dass der Bereich der 15 mm tiefer Bohrung für die Verbindung mit Konusadaptern maßgebend ist.

**Tabelle 18: Zusammenfassung der nach verschiedenen Ansätze ermittelten Tragfähigkeit von Konusadaptern ohne Berücksichtigung von dem Rissfaktor  $k_{cr}$**

Ansatz	Experiment	Rechnerisch (ohne Rissfaktor)		
		nach Scheibendübel	nach Kernschub im MH	nach Kernschub im SH
char. Wert	33,19 kN	18,34 kN (-48 %)	27,06 kN (-18 %)	40,01 kN (+20 %)

### 5.7 Zugscherversuche mit Doppel-Konusverbindern

Die Geometrien der Versuchskörper für die Zugscherversuche wurden auf Grundlage der Ergebnisse der Druckscherversuche mit Konusadaptern (siehe Tabelle 15 in Anhang 5.6) sowie unter Anwendung des in Abschnitt 5.4 beschriebenen Ansatzes festgelegt.



**Abbildung 51: Schematische Darstellung des Zugscherversuchs mit Konusadaptern in BSH GL24**

Das Versagensverhalten zeigt sich über alle Versuche hinweg weitgehend einheitlich. In 22 von insgesamt 24 untersuchten Verbindern trat Blockscherversagen als maßgebender Versagensmechanismus auf. Bei zwei Verbindern wurde Ausspaltversagen beobachtet. Ein Zugversagen in der Faserrichtung im Bereich der Bohrung trat in keinem der durchgeführten Versuche auf. Dies bestätigt, dass die Mindestbreite der verbundenen Bauteile mit dem im genannten Abschnitt vorgestellten Ansatz sachgerecht bestimmt werden kann und ausreichend bemessen ist, um ein Zugversagen in Faserrichtung zu vermeiden.



**Abbildung 52: Versagensverhalten in Zugscherversuchen mit Konusadaptern**

