

Sys.Wood: Zerlegbare Verbindungen im Holzbau

Hintergrunddokumentation



Autor:innen

Technische Universität Wien

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadaei

Dipl.-Ing. Alexander Gerger, BSc

Dipl.-Ing. Jasmin Prünner, BSc

Dipl.-Ing. Marius Valente, BSc

Forschungsbereich Interdisziplinäre Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau

Karlsplatz 13/E259-02

1040 Wien

Schlüsselwörter

Kreislaufwirtschaft, Fügung, Wiederverwendung

Veröffentlichung

2026

Kurzfassung

Dieses Dokument fasst den aktuellen Stand sowie technische Anforderungen an „kreislauffähige Fügungen“ im Holzbau zusammen und stellt reversible Fügungen als Voraussetzung für die Verlängerung der Nutzungsdauer sowohl auf Gebäude- als auch auf Bauteilebene sowie für eine hochwertige Wiederverwendung dar.

Es werden zwei wesentliche Kriterien für Verbindungen definiert: (1) die Unversehrtheit der verbundenen Holzelemente während der Nutzung und beim Rückbau sowie (2) die langfristige Reversibilität trotz jahrzehntelanger Nutzung und Belastungen. Verschiedene Fügungsarten im Holzbau werden nach ihrem mechanischen Prinzip diskutiert. Dabei werden folgende Arten unterschieden: Formschluss, Kraftschluss und Stoffschluss.

Auf Systemebene untersucht der Bericht drei Haupttypologien – Ingenieurskelettbau, Modulbauweise und CLT (Massivholzsysteme) – und ordnet diesen jeweils die entsprechenden Anforderungen an die Verbindungen zu. Eine Designstrategie im Sinne der Kreislaufwirtschaft legt den Schwerpunkt auf die „Verkürzung des Kreislaufs“ durch die Maximierung der Lebensdauer von Gebäuden und Bauteilen, was durch hochgradig anpassungsfähige Skelette und die geplante Demontierbarkeit am Ende der Lebensdauer erleichtert wird, um Elemente in neue Gebäude wieder einzubauen.

Das Dokument fasst aktuelle Forschungsergebnisse und Produkte zusammen, die die Kreislaufwirtschaft verbessern. Der Abschnitt umfasst Lösungen von KP-basierten (Kunstharzpressholz) Konusadaptern über Ringknotenkonzepte bis hin zu sogenannten Tube Connections.

Die Schlussfolgerungen setzen die Erkenntnisse in umsetzbare Gestaltungsrichtlinien um. Der Bericht ergänzt diese Empfehlungen durch eine Übersicht über derzeit verfügbare Systemverbinder, um Praktiker dabei zu unterstützen, Kreislaufwirtschaft zu einem vorrangigen Konstruktionskriterium zu machen und nicht erst am Ende der Lebensdauer als nachträglicher Einfall zu betrachten.

Abstract

Timber construction emphasizes reversible joints as a prerequisite for extending the service life at both the building and component levels, as well as for high-quality reuse.

Two key criteria for joints are defined: (1) the integrity of the connected timber elements during use and demolition, and (2) long-term reversibility despite decades of use and stress. Various types of joints in timber construction are discussed according to their mechanical principles. The following types are distinguished: form-fit, force-fit, and material-fit.

At the system level, the report examines three main typologies – engineered timber frame construction, modular construction, and CLT (solid wood systems) – and assigns the corresponding requirements for joints to each. A design strategy in line with the circular economy focuses on “shortening the cycle” by maximizing the service life of buildings and components, which is facilitated by highly adaptable frames and planned demountability at the end of the service life to reinstall elements in new buildings.

The document summarizes current research findings and products which improve the circular economy. The section covers solutions ranging from KP-based (synthetic resin-bonded wood) cone adapters to ring node concepts and so-called tube connections.

The conclusions translate these findings into actionable design guidelines. The report supplements these recommendations with an overview of currently available system connectors to help practitioners make circularity a priority in the design phase, rather than treating it as an afterthought at the end of a product’s life cycle.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation.....	1
2 Grundlagen – Fügungen im Holzbau.....	3
3 Ingenieurskelettbau	5
3.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit.....	6
3.2 Individuallösungen	6
4 Modulbauweise.....	9
4.1 Raummodulbauweise	9
4.1.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit	9
4.1.2 Individuallösungen	10
4.2 Rahmenbauweise/Tafelbauweise	12
4.2.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit	13
5 CLT-Bauweise	16
5.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit.....	17
5.1.1 Anforderungen durch Kreislaufwirtschaft.....	18
5.1.2 (geneigte) Holzschrauben / Vollgewindeschrauben (VGS).....	18
5.1.3 Schlitzblech & Stabdübel.....	21
5.1.4 Zuganker & Schubwinkel	22
6 Bauprodukte für kreislauffähige Verbindungen	24
7 Aktuelle Forschungen.....	27
8 Ergebnisse	32
9 Literaturverzeichnis	33

1 Motivation

Die gebaute Infrastruktur ist einer der größten Hebel in Umgang mit der Klimaerwärmung. Hinsichtlich des Beitrags zu den Treibhausgas-Emissionen ist zwischen direkten (unmittelbaren) und indirekten (inkl. Vorketten) zu unterscheiden. Der Anteil des Bauwesens variiert somit zwischen ca. 10% (direkter Anteil Österreich) und ca. 37% der energiebezogenen THG-Emissionen (Betrachtung direkt und indirekt).

Zur Erreichung der Klimaziele (Netto-Null-THG-Emissionen) sind drastische Maßnahmen erforderlich. Strategien dafür sind u.a.:

- Senkung der roten Energie
- Senkung der grauen Energie
- Steigerung der Speicherkapazität

Einer der wichtigsten zu betrachtenden Parameter ist das „kumulative CO₂-Budget“. Der Kern der Theorie besagt, dass nicht nur die Höhe der Emissionen, sondern auch der Zeitpunkt des Ausstoßes von großer Bedeutung ist. Je später Emissionen ausgestoßen werden, umso weniger klimaschädliche Wirkung haben diese. Viele Treibhausgase haben eine Verweildauer in der Atmosphäre über Jahrhunderte [1]. Aus diesem Grund akkumuliert sich deren Beitrag im Laufe der Zeit. Das Ziel ist folglich so wenig Treibhausgase wie möglich und so spät wie möglich zu emittieren [2].

Dies ist die Motivation zur Verwendung biogener, nachwachsender Rohstoffe (NAWAROs). Bäume binden in der Wachstumsphase Kohlenstoff als Zucker in den Zellen. Diese natürlich aufgebaute Kohlenstoffspeicher bleibt bis zum Lebensende des betrachteten Holzelements gespeichert. Als End-of-Life Szenarien stehen viele Möglichkeiten zur Verfügung. Nachfolgend ein Auszug der wichtigsten Möglichkeiten:

- Eine thermische Verwertung mit Freisetzung des gebundenen Kohlenstoffs und Erzeugung von Wärmeenergie,
- Eine thermische Verwertung durch Pyrolyse mit reduzierter Freisetzung
- Eine stoffliche Verwertung in einer kaskadierten Wiederverwertung
- Eine stoffliche Wiederverwertung durch Reuse

Aktuell wird vor allem die thermische Verwertung (mit möglicher stofflicher Verwertung mit kaskadischer Wiederverwertung als Zwischenschritt) angewandt. Damit wird der biogen gebundene Kohlenstoff am Ende wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Bilanzell weisen Gebäude in Holzbauweise in einem Life Cycle Assessment (LCA) wesentlich bessere Ergebnisse auf als vergleichbare mineralische Gebäude. Es ist aber nicht nur der bilanzielle Unterschied, sondern darüber hinaus der Zeitpunkt der Emittierung der Emissionen. Während in mineralischer Bauweise der Anteil fossiler Emissionen bereits in der Herstellungsphase (A1-A3) anfällt und somit eine hohe klimaschädliche Wirkung über die gesamte Gebäudelebensdauer aufweist, fallen diese Emissionen im Holzbau erst im Abschnitt End-of-Life (C1-C4) an (siehe Abbildung 5.1 Abbildung 1.1).



Im Kontext des anthropogenen Klimawandels ist nicht nur die Höhe der Treibhausgasemission relevant, sondern auch der Zeitpunkt (kumulative Wirkung). Beide Anforderungen erfüllt der Einsatz von Holz im Bauwesen und stellt daher eine wichtige Ergänzung zu mineralischen Baustoffen dar.

Damit dieser biogene Speicher angesetzt werden darf, ist eine nachhaltige Waldbewirtschaftung Voraussetzung. Eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sieht eine Balance zwischen Entnahmemenge und nachwachsender Holzmenge pro Zeiteinheit (zB Jahr) voraus. In der letzten Waldinventur von 2023 wurde für Österreich bereits eine Entnahmemenge von 97% der maximalen Möglichkeiten einer nachhaltigen Bewirtschaftung erreicht [3]. Gleichzeitig liegt der Holzbauanteil in Österreich, vor allem im mehrgeschoßigen Wohnbau, noch im niedrigen Bereich [4]. Das für eine Bauweise erforderliche Holz kann somit nur zu einem Teil als Frischholz aus österreichischen Wäldern kommen.

Aus diesem Grund ist ein ressourcenschonender Einsatz von Holz oberstes Gebot. Neben dem möglichst effizienten Einsatz von Frischholz könnte die Verwendung von Altholz in einer Kreislaufwirtschaft als neue Materialquelle etabliert werden.



Abbildung 1.1 Illustrative Darstellung der Speicherwirkung von Holz über 150 Jahren (entspricht 3 Nutzungszyklen je 50 J.) [5]

Betrachtet man das österreichische Abfallaufkommen, so sieht man, dass das Bauwesen für ca. 59% des Gesamtabfallaufkommens in Österreich verantwortlich ist. Der Anteil der Holzabfälle beträgt jedoch nur rund 2% und jener des potenziell nutzbaren Bau- und Abbruchholz nur ca. 0,8% des Gesamtabfallaufkommens [6], [7]. Die Holzmenge, die in den kommenden Jahren durch den Bestand frei wird, ist sehr begrenzt. Damit künftig eine möglichst hohe Quote des Altholzes aus dem Bestand für neue Bautätigkeiten verwendet werden kann, ist auf die Werterhaltung durch lösbare Verbindungen zu achten.

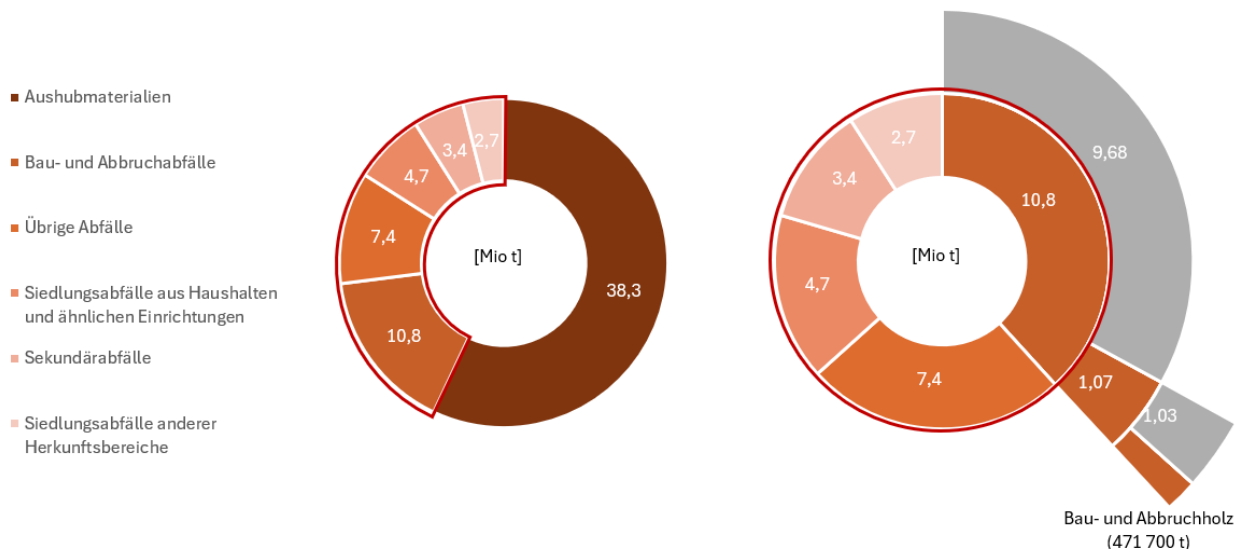


Abbildung 1.2 Abfallaufkommen Österreichs im Jahr 2023 nach Sparten (links) und Anteil des potenziell wiederverwendbaren Holzanteils für tragende Zwecke (rechts) [6]



Die nachhaltige Waldbewirtschaftung stößt bereits heute an ihre Grenzen. Aus diesem Grund kann nur ein begrenzter Anteil in die gebaute Umwelt fließen für den Aufbau einer zweiten, gebauten Kohlenstoffsенке neben der natürlichen Senke in Form des Waldes.

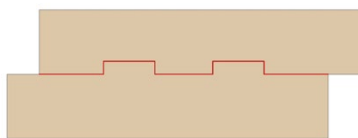
2 Grundlagen – Fügungen im Holzbau

Damit Kreislaufwirtschaft im Bauwesen funktioniert, müssen ökonomische und technische Anforderungen erfüllt werden. Kreislauffähige Verbindungen dürfen nicht zu komplex werden, sondern müssen so einfach wie möglich herstellbar und montier- bzw. demontierbar sein, um ökonomisch konkurrenzfähig zu sein. Aus technischer Sicht gilt es vor allem zwei Anforderungen zu erfüllen: das **Intakt bleiben der Bauteile** und die **Lösbarkeit der Verbindung**.

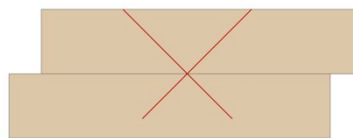
Intakt bleiben der Bauteile bedeutet, dass die Bauteile nicht nur den Beanspruchungen durch Einwirkungen über die Nutzungsdauer widerstehen müssen, sondern darüber hinaus auch nicht durch die Demontage der Verbindung „geschädigt“ werden dürfen. Daraus ergeben sich Fragen hinsichtlich von Störstoffen (z.B. abgerissene Schrauben), der wiederholten Tragfähigkeit von Schraubenantrieben und Gewindegängen oder plastisch verformter Bereiche im Holz (siehe Abbildung 3.2).

Lösbarkeit der Verbindung bedeutet, dass diese auch nach einer geplanten Nutzungsdauer von 50 oder mehr Jahren noch gegeben ist. Das bedeutet, dass die Verbindungen mit einer Überfestigkeit auszulegen sind und das Niveau der Tragfähigkeit zu begrenzen ist. Eine erhöhte Beanspruchung kann beispielsweise zu gekrümmten Verbindungsmittelachsen, oder anderen plastischen Verformungen führen, die die Demontage erschweren. (siehe Abbildung 3.2).

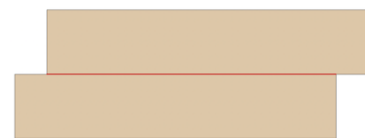
Im Rahmen dieses Dokuments wird der Fokus auf die Fügung gelegt. Fügungen im Holzbau können allgemein in drei Kategorien eingeteilt werden:



formschlüssig
hohe Kreislauffähigkeit



kraftschlüssig (mechanisch)
mittlere Kreislauffähigkeit



stoffschlüssig
schlechte Kreislauffähigkeit

Im Holzbau der letzten Jahrzehnte setzten sich vor allem kraftschlüssige Verbindungen auf Grund ihrer positiven Eigenschaften hinsichtlich des Tragverhaltens durch. Während formschlüssige oder stoffschlüssige Verbindungen meist durch **Spröbruchversagen** gekennzeichnet sind, bieten kraftschlüssige Verbindungen den Vorteil des bestimmaren **duktilen Versagens**. Stoffschlüssige Fügungen stellen „dauerhafte“ Verbindungen dar, werden von den Autoren als nicht kreislauffähig eingestuft und daher nachfolgend nicht näher betrachtet.

Formschlüssige Verbindungen übertragen Kräfte über den Formschluss zwischen Bauteilen. Damit wird ein hohes Maß an **Passgenauigkeit** vorausgesetzt. Ein perfekter Formschluss ist jedoch nur in gewissen Fällen anzustreben, da es unter Belastung sonst zu einem Verkeilen der Elemente kommen kann oder durch Dehnungsänderungen aufgrund von Quellen- und Schwinden des Materials Schäden entstehen können.

Eine Untergruppe formschlüssiger Verbindungen sind die sogenannten Einhängerverbinder zur Verbindung von 1D-1D- oder 1D-2D-Elementen. Je nach Ausführung kann es auch bei dieser Ausführung formschlüssiger Verbindungen zu einer Herausforderung kommen – der **Selbsthemmung**. Einhängerverbindungen werden in einigen Fällen mit keilförmiger Geometrie der Kontaktflächen ausgeführt. Damit ist eine einfachere Zentrierung bei der Montage möglich. Beispiele sind Schwalbenschwanzzapfen, deren Lastübertragung auf der Flankenreibung basiert, Kraftübertragung am unteren Zapfenrand ist zu vermeiden, um Querkraftkräfte aus der Wirkung als Ausklinkung zu vermeiden. Einhängerverbinder aus zwei Metallplatten mit komplementär eingeprägten Formen weisen in einigen Fällen ebenfalls keilförmige Geometrien auf. Untersuchungen zum Tragverhalten derartiger Verbindungen zeigen, dass es durch die Keilform zur Selbsthemmung durch Reibung kommen kann.

Je nach Bauweise ergeben sich individuelle Problemstellungen im Bereich der Fügung. Nachfolgend wird in Abhängigkeit der Bauweise auf jeweilige Herausforderungen und mögliche kreislauffähige Lösungen eingegangen. Es werden individuell umgesetzte Lösungen als auch verfügbare Bauprodukte vorgestellt. Das Thema der Kreislauffähigkeit/Demontierbarkeit wurde von Verbindungsmittelherstellern vor ca. 10 Jahren erstmals aufgegriffen und führt seitdem zur Entwicklung einer breiten Auswahl an Systemverbindern. Nachfolgend wird versucht eine Übersicht über die gängigsten Produkte für verschiedene Anschlusssituationen zu geben.

Nachfolgend werden die Bauweisen:

- Ingenieurskelettbau
- Modulbauweise
 - Raummodulbauweise
 - Holzrahmenbauweise
- CLT-Bauweise

näher analysiert.

3 Ingenieurskelettbau

Bei der Analyse der R-Strategien zur Implementierung einer Kreislaufwirtschaft nimmt die "Narrow the loop"-Strategie (Reduzierung des Ressourcenverbrauchs) eine prioritäre Stellung ein. Im Bauwesen impliziert dies, dass die Lebensdauer von Gebäuden, insbesondere deren tragenden Strukturen, maximiert werden soll, bevor weitere Strategien wie die Wiederverwendung von Bauteilen oder das Recycling von Baustoffen zum Einsatz kommen. Gegenwärtig wird das Gebäude selbst als Systemgrenze definiert. Mit dem Erreichen des Endes der Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer des Gebäudes (End-of-Life) ist auch das Ende der Lebensdauer der Bauteile verbunden. Der Abbruch in aktueller Form erschwert eine Wiederverwendung von Elementen.

Gemäß den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ist eine Differenzierung zwischen zwei Systemgrenzen erforderlich: Gebäude und Bauteil. Bei Erreichen der Endnutzungsdauer des Gebäudes sollte eine Demontage erfolgen, um die Bauteile zu gewinnen und einer weiteren Nutzung in anderen Gebäuden zuzuführen. Dies trägt zur Verlängerung der Lebensdauer bei. Die Nutzungsflexibilität von Gebäuden ist eine wesentliche Voraussetzung für ihre langfristige Nutzbarkeit. Die Möglichkeit, ein Gebäude für verschiedene Nutzungsarten zu konzipieren, wie etwa Wohn- oder Bürobauten in unterschiedlichen Ausbaustufen, ermöglicht eine Verlängerung der Lebensdauer eines Gebäudes innerhalb der Systemgrenze, bevor die einzelnen Bauteile in andere Gebäude integriert werden.

Eine Bauweise, die die **Nutzungsflexibilität** fördert, ist der (Ingenieur-)Skelettbau. Aus architektonischer Perspektive eröffnet sich durch die weitgehende Auflösung der Tragstruktur in stabförmige (1D-)Elemente eine maximale Freiheit in der Grundrissgestaltung. Eine Analyse aktueller kreislauffähiger Bauprojekte offenbart eine Tendenz hin zu einer Ingenieurskelettbauweise. Es lässt sich feststellen, dass sich dieser bei der traditionellen Nutzung als Bürobau zunehmend auch im Wohnbau manifestiert.

Im Ingenieurskelettbau ist insbesondere die Ausführung des Stützen-Decken-Knotens von Relevanz (siehe Abbildung 3.1). In Bezug auf diesen Aspekt ist es erforderlich, vertikale Lasten aus den Stützen durch die Deckenebene bzw. die Unterzugsebene zu leiten. Des Weiteren ist die Kopplung der stabförmigen Elemente zur vertikalen Lastableitung mit den flächigen Elementen zur horizontalen Lastableitung von Relevanz.

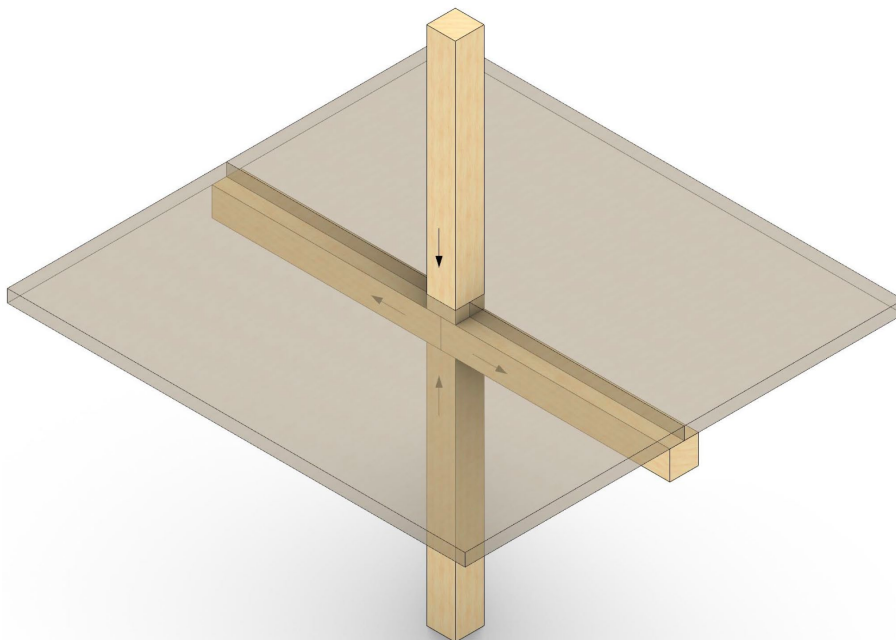


Abbildung 3.1 Deckenknoten in Skelettbauweise mit Hauptbeanspruchungen ©Luca Gottlob

3.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit

Im mehrgeschoßigen Holzbau stellt sich dabei die Herausforderung der vertikalen Lastableitung. Stützen können nicht ohne weiteres auf die „weichen“ Deckenelemente oder Unterzüge gestellt werden, da die Querdruckfestigkeit der Elemente bald überschritten wäre. Querdruckverstärkungen durch VGS stellen eine gängige Option zur Querdruckverstärkung dar, jedoch führt dies zu Problemen in der Kreislaufführung.

Neben der Verstärkung durch VGS, bestehen vielfältige Möglichkeiten die Lasten durch geometrische Überlegungen oder spezielle Bauprodukte durch die „weichen“ Elemente zu führen bei gleichzeitig hoher Kreislauffähigkeit.

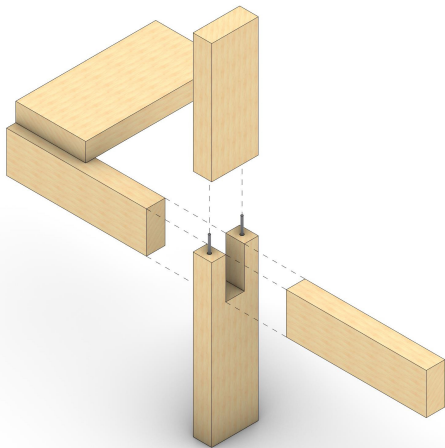
Im Hintergrunddokument „Best Practice Kreislaufwirtschaft“ werden verschiedene kreislauffähige Bauprojekte in Holz-(Hybrid-)Bauweise vorgestellt. Aus dieser Auswahl von Projekten werden nachfolgend einige Individuallösungen dieses Stützen-Decken-Knotens im Ingenieurskelettbau vorgestellt.

3.2 Individuallösungen

Derselben Herausforderung – der vertikalen Lastdurchleitung – wurde in verschiedenen Projekten jeweils anders begegnet. Eine große Auswahl an Lösungsmöglichkeiten ist im Hintergrunddokument „Best Practice Kreislaufwirtschaft“ zu finden. Anhand von fünf Beispielen werden nachfolgend unterschiedliche Lösungen zur vertikalen Lastabtragung in Skelettbauweise vorgestellt. Dargestellt werden Lösungen für die Holzbauweise als auch die Holz-Hybrid-Bauweise.

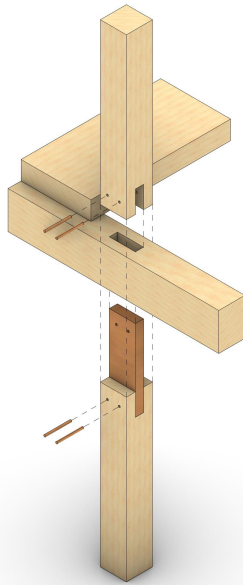
Holzbauweise

Wohnhaus Baustein 12



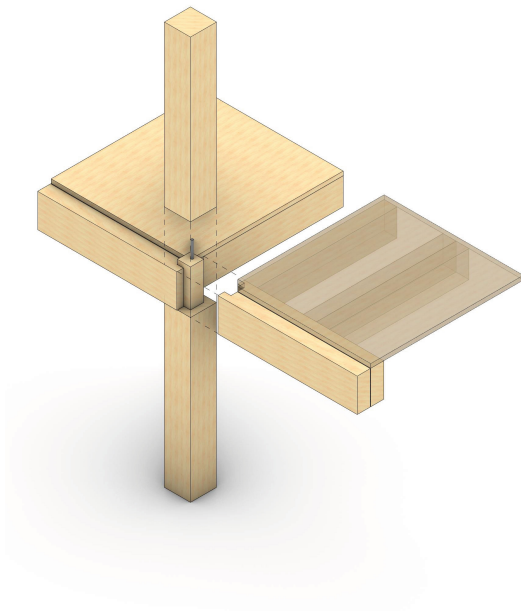
In diesem Projekt wurden die BSH-Stützen mit deutlich rechteckigem Querschnitt ausgeführt. Aufgrund der großen Stützenbreite können die Stützen gleichzeitig als Gabellager für die BSH-Unterzüge dienen. Die vertikale Lastableitung erfolgt direkt von Stütze zu Stütze über Druckkontakt in den „Stegen“ der Gabellagerung. Die Lagesicherung erfolgt über Dorne in den Kontaktflächen. Aufgrund der mittigen Durchführung des Unterzugs lassen sich durch Anpassung der Stützenbreite quasi beliebig große Querschnittsflächen und damit Vertikallasten übertragen. Die Deckenelemente werden auf die Unterzüge aufgelegt und befinden sich somit nicht auf Ebene des Knotens. Im Brandfall wird die Gabellagerung somit nicht durch die Decke geschützt und ist 3-seitig brandbeansprucht. Der Querschnitt zur vertikalen Lastübertragung wird dadurch stark reduziert. Eine unverkleidet Ausführung ist somit für Anforderungen über R30 hinausgehend herausfordernd.

Collegium Academium



In diesem Projekt wird der Stützen-Decken-Knoten als Nut-Feder-Konstruktion ausgebildet. Die Stützen reichen beidseitig nur bis zum Unterzug und weisen zu beiden Enden mittige Einschnitte (Nuten) zur Aufnahme einer Hartholzfeder auf. Die Hartholzfeder wird zusätzlich über Hartholzdübel mit den Stützelementen verbunden. Der Unterzug weist im Bereich der Stütze eine Ausnehmung zur Durchführung der Hartholzfeder auf. Die Deckenelemente liegen auf den Unterzügen auf. Hinsichtlich der Kraftübertragung sind zwei Varianten zu unterscheiden: erfolgt die vertikale Lastableitung mittels Druckkontakt zwischen Feder und Stütze, ist die Festigkeit der Stütze maßgebend und auf den Einsatz von Hartholz kann verzichtet werden. Reicht die vorhandene Querschnittsfläche nicht aus, kann die Kraftübertragung auch auf Abscheren durch die Hartholzdübel erfolgen. In diesem Fall ist auf eine ausreichende Anzahl und somit Übergriffslänge der Elemente zu achten.

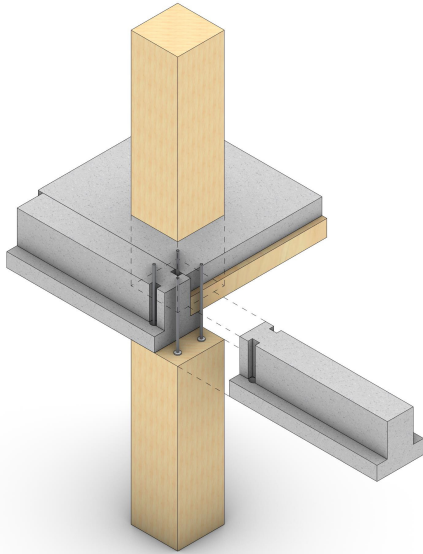
543 Hortus



In diesem Projekt wird der Stützen-Decken-Knoten als Art Zapfenverbindung ausgebildet. Damit kann der erforderliche Platzbedarf durch die Konstruktion minimiert werden. Der Kopf der Stützen wird als Zapfen ausgebildet, wodurch ein Teil der Querschnittsfläche zur Auflagerung der Unterzüge entsteht. Im Brandnachweis ist auf eine ausreichende verbleibende Auflagerfläche zu achten. Dies ist ohne Einsatz einer Sprinkleranlage nur schwer zu erreichen. Die Unterzüge sind bereits Teil der Deckenelemente, wodurch Decke und Knoten in einer Ebene liegen. Der Zapfen ist somit gegenüber Brand durch die Deckenelemente geschützt. Die Lagesicherung der Stützen erfolgt mittels Dorn.

Holz-Hybridbauweise

Leopold Quartier



In diesem Projekt wurde das Querdruckproblem der Unterzüge durch den Einsatz von Stahlbeton-Fertigteilen gelöst. Diese Fertigteile sind mit umgekehrten T-Querschnitt ausgeführt. Dadurch entstehen Auflagerbereiche zum „Einhängen“ der HBV-Deckenelemente. Die Verbindung von Stütze-Unterzug-Stütze erfolgt mittels Dorne. Die Dorne werden im Unterschied zum LCT-One nicht in das Hirnholz der Stütze eingeklebt, sondern mittels Rothoblaas DiscFlat-Verbinder in das Hirnholz geschraubt. Dadurch sind Stützen und Dorne trennbar miteinander verbunden.

Auch die leistungsstarke Holz-Beton-Verbundbauweise bietet Möglichkeiten der Ausführung von Stützen-Decken-Knoten, die Kreislauffähigkeitspotenzial ausweisen. Aktuell besteht jedoch noch eine Herausforderung, die die Kreislauffähigkeit aktuell noch stark einschränkt: unterschiedliche Bautoleranzen. In die Stahlbetonbauteile werden Hohlrohre zur Aufnahme der Dorne vor dem Betoniervorgang eingebracht. Diese Hohlrohre weisen aufgrund notwendiger Bautoleranzen einen größeren Durchmesser als die Dorne auf. Damit eine kraftschlüssige Verbindung umgesetzt werden kann, müssen diese Hohlräume nach dem Versetzen noch mit Vergussmörtel aufgefüllt werden. Zur Wiederverwendung der Bauteile müsste dieser Vergussmörtel wieder entfernt werden. Aus Sicht der Kreislauffähigkeit sollte eine andere lösbare Alternative für Vergussmörtel gefunden werden.

STRATEGIE:

Die Ingenieurskelettbauweise ermöglicht eine nutzungsoffene Grundrissgestaltung und damit eine Langlebigkeit auf höchster Ebene (Rethink, Repurpose). Erst wenn das Tragwerk nicht mehr den Nutzungsanforderungen gerecht werden kann, werden die einzelnen stabförmigen Bauteile einer Wiederverwendung zugeführt (Reuse).



FÜGUNG:

Es bestehen viele Möglichkeiten für kreislauffähige Fügungen durch geometrische Lösungen (zB gezapfte Stützen) oder eigene Bauprodukte (Formschluss und Kraftschluss).

4 Modulbauweise

Die Bauweisen im Holzbau können vielfältig eingeteilt werden. Jene Bauweisen, die einen hohen Vorfertigungsgrad aufweisen, werden oftmals als Modulbauweise bezeichnet. Je nach Systemgrenze kann weiters zwischen Rahmenbauweise/Tafelbauweise/Elementbauweise (2D) und Raummodulbauweise (3D) unterschieden werden. Je nach System unterscheiden sich auch in dieser Kategorie die Verbindungsmittel und damit die Kreislauffähigkeit deutlich voneinander. I.d.R. weisen Raummodule eine ausgeprägt rechteckige Grundform auf. Diese ergibt sich u.a. aufgrund der zulässigen Transportmaße von LKWs. Aufgrund dieser Gestaltung ergeben sich eine starke und eine schwache Achse hinsichtlich der Aussteifungswirkung.

4.1 Raummodulbauweise

Die Raummodulbauweise weist den höchsten Vorfertigungsgrad im Holzbau auf. Die Raummodule können sowohl in Leichtbauweise mit aufgelösten Holzrahmenbauwänden oder in Massivbauweise mit CLT-Wandscheiben hergestellt werden. Die Systemgrenze ist in diesem Fall das Raummodul. Das bedeutet, dass die trennbaren Fügungen primär zwischen den Raummodulen untereinander erfolgen müssen, und erst sekundär zwischen den Elementen (Wand, Decke) der Raummodule selbst.

4.1.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit

Diese Bauweise weist somit Vorteile hinsichtlich der Vorfertigung auf, jedoch ist eine nutzungsflexible Gestaltung durch die Systemgrenze des Raummoduls deutlich eingeschränkt. Die Größe der Module und deren Öffnungen sind auf die vorgesehene Nutzung (z. B. Bildungsbau, Hotel) abgestimmt und schränken die Nutzungsmöglichkeiten innerhalb der Gebäude-/Modulgrenzen deutlich ein. Die Raummodulbauweise strebt eine andere Strategie in der Kreislaufwirtschaft an, die Wiederverwendung der Module mit gleicher Nutzung aber anderen Standort. Die Lebensdauer auf Systemgrenze Gebäude ist eher gering und daher die Lösbarkeit der Fügung von umso größerer Bedeutung.

Aus Sicht der Kreislauffähigkeit weisen Raummodule aus CLT-Bauweise einen Vorteil auf – das höhere Eigengewicht. In Kombination mit den Nutzlasten reicht dieses in vielen Fällen aus, um die Fuge zwischen den Modulen zu Überdrücken und ermöglicht somit einen Verzicht zusätzlicher Verbindungsmittel. Die Module werden geschoßweise übereinander gestapelt mit einer entkoppelnden Dämmebene horizontal und vertikal zwischen den Modulen. Die Lastübertragung erfolgt an wenigen diskreten Punkten, die durch Schallschuttlager ebenfalls entsprechend schallentkoppelt werden. Durch die kontinuierliche Überdrückung dieser Bereiche kann die Lagesicherung entweder durch Formschluss oder Reibungskräfte aktiviert werden.

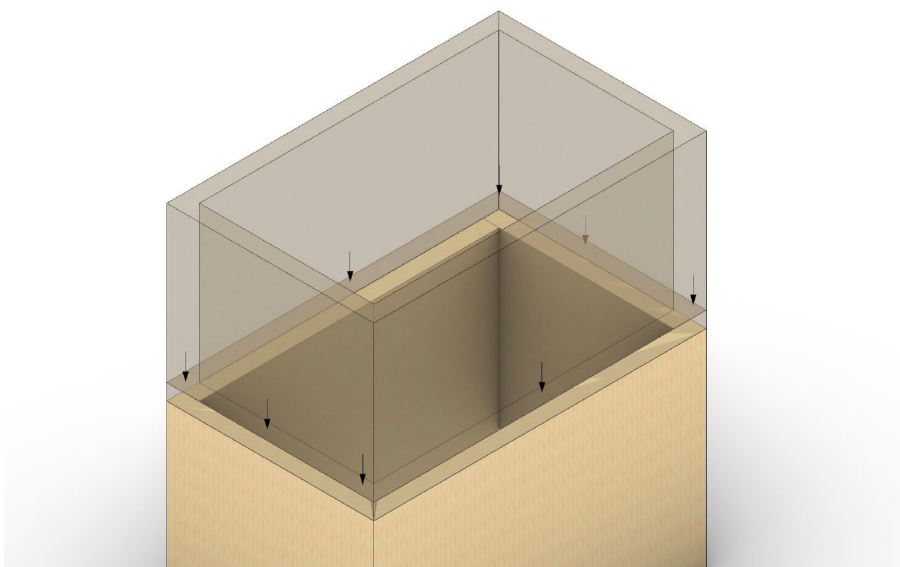


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung der vertikalen Lastabtragung von Raummodulen ©Luca Gottlob

4.1.2 Individuallösungen

In zwei umgesetzten Projekten werden Ansätze zur Fügung von Raummodulen vorgestellt.

The Wood – Boutique Hotel, Wien

Das Projekt von Wolfgang Platz stellt ein interessantes Beispiel zur Schließung einer Baulücke in Raummodulbauweise dar. Die Planung (Architektur und Statik) übernahm ziertitz + partner ZT GmbH, die Fertigung der Module Stora Enso. Das Gebäude weist an beiden Brandwänden aussteifende Kerne aus Stahlbeton auf. Dazwischen werden die Raummodule in CLT-Bauweise gestapelt. Die Module sind in Gebäudequerrichtung längs orientiert. Damit weisen die Module in Gebäudequerrichtung eine höhere Steifigkeit auf und sorgen selbstständig für die Aussteifung. In Gebäudelängsrichtung sind die Module querorientiert haben zusätzlich Öffnungen für Türen und Fenster und weisen entsprechend eine geringere Steifigkeit auf. Vergleicht man die vorhandenen Steifigkeiten in den Richtungen, so ist in Querrichtung nur ca. 2% der Steifigkeit der Längsrichtung vorhanden (siehe Abbildung 4.3). Aus diesem Grund werden die Stahlbetonkerne herangezogen. Die größeren Wandlängen in Modullängsrichtung stellen einen größeren inneren Hebelsarm dar, wodurch die resultierenden Momente aus horizontalen Einwirkungen in niedrigen abhebenden Kräften resultieren. Die Raummodule sind in massiver CLT-Bauweise gefertigt und weisen dadurch ein vergleichsweise hohes Eigengewicht aus. Bei entsprechender Abstimmung der Tragwerksplanung können die abhebenden Kräfte durch die quasi-ständigen Lasten überdrückt werden.

Die Fügung der Raummodule erfolgt über formschlüssige „Schwellen“ (siehe Abbildung 4.2). Dieser Formschluss ermöglicht einen einfachen Abbau und eine Wiederverwendung der Module.



Abbildung 4.2 Darstellungen des Projektes The Wood – Boutique Hotel Wien; Visualisierung von der Straße (links), Foto der Positionierung eines Raummoduls (rechts) ©SIHGA [8]

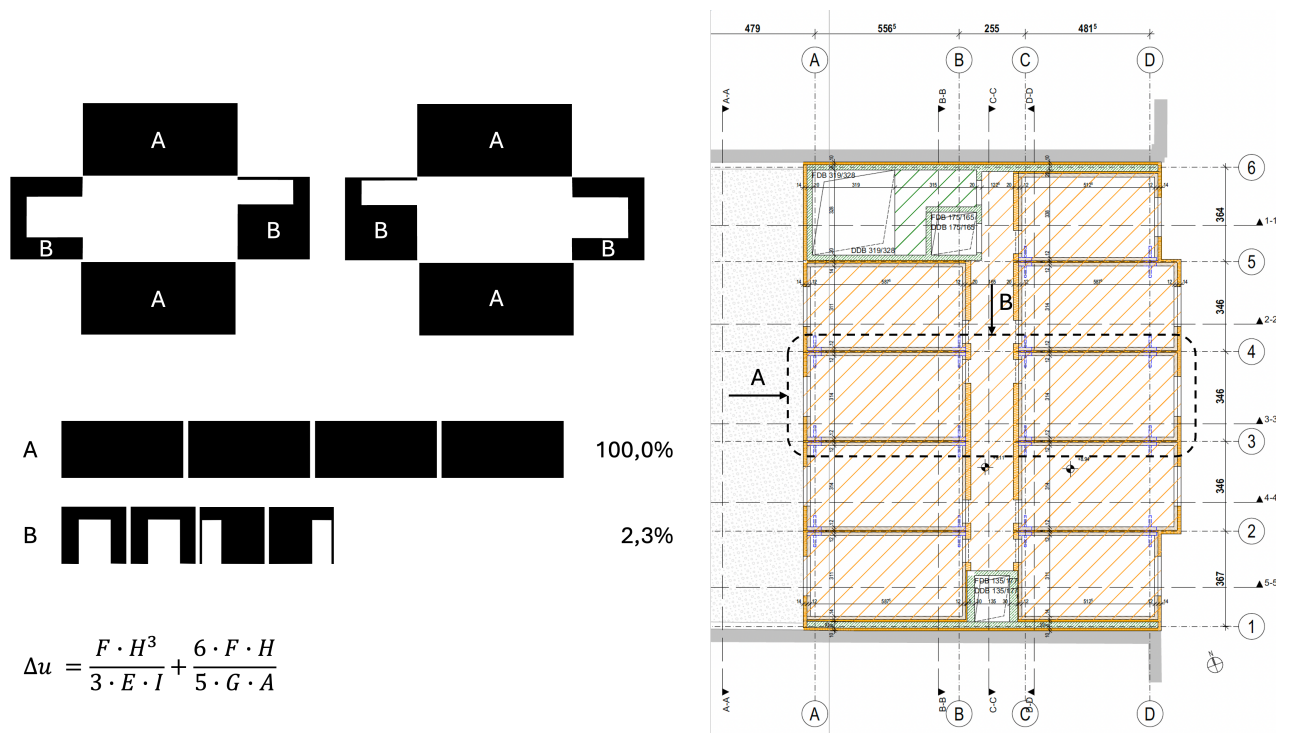


Abbildung 4.3 Grundriss eines Regelgeschoßes (rechts), Darstellung der aussteifenden Wandflächen und deren Steifigkeiten im Vergleich zueinander [8]

WOODIE, Hamburg

Ein weiteres Beispiel stellt das Studentenwohnheim WOODIE in Hamburg dar. Die Architekturplanung übernahm das Büro sauerbruch hutton, während die Raummodule von Kaufmann Bausysteme GmbH gefertigt wurden.

Dieses Projekt zeigt ein sehr ähnliches Konzept in anderem Maßstab. Die Aussteifung erfolgt auch hier überwiegend über Erschließungskerne in Stahlbetonbauweise. Jene Module die zwischen den Aussteifungskernen (in Gebäudequerrichtung) längsorientiert sind, wurden ohne zusätzliche Verbindungsmittel rein mechanisch über Reibung an den Kontaktstellen verbunden. In den auskragenden Gebäudeteilen sind die Raummodule exponiert und wurden daher zusätzlich mit Verbindungsmitteln verschraubt. In Abhängigkeit der Einbindelänge und Orientierung kann auch diese Fügung als kreislauffähig betrachtet werden (siehe Abschnitt 5.1.2).

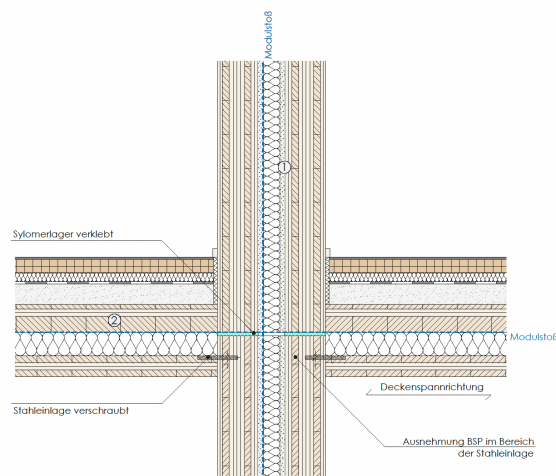


Abbildung 4.4 Detailschnitt durch den Wand-Decken-Anschluss (links), Foto der Kontaktflächen inkl. Schallschutzlagerung der Module (rechts) [9]

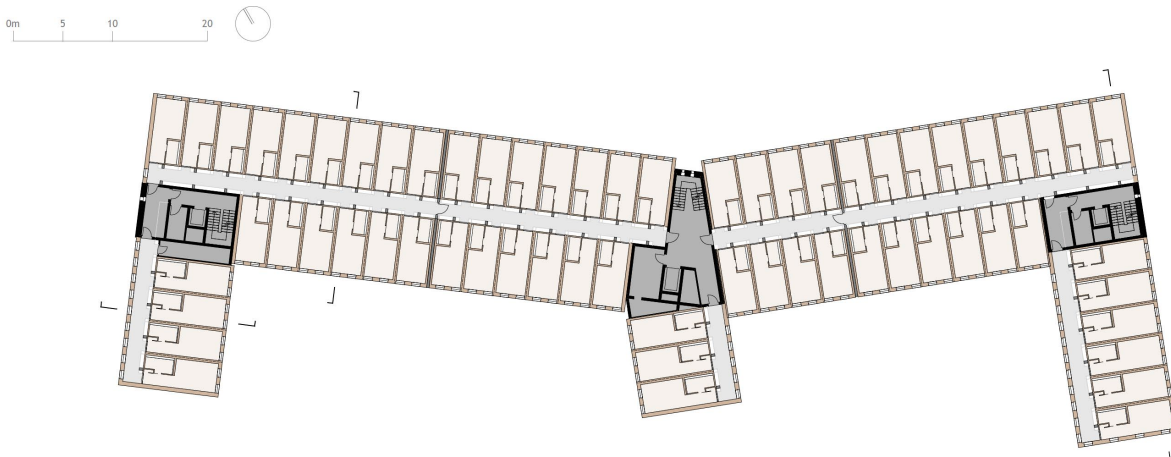


Abbildung 4.5 Grundriss eines Regelgeschoßes [9]

STRATEGIE:

Die Raummodulbauweise ermöglicht eine sehr spezielle Grundrissgestaltung, die idR. schwer für andere Nutzungen übernommen werden kann. Allerdings eignet sich die Bauweise sehr gut für den Einsatz derselben Nutzung an anderer Stelle (z. B. Bildungsbau, Hotellerie). Bei wechselnden Bedarfen kann das Gebäude abgebaut und die Module an anderer Stelle wieder aufgebaut werden (Reuse).

**FÜGUNG:**

In der Raummodulbauweise erfolgt die Fügung durch formschlüssige oder mechanisch/kraftschlüssige Verbindungen. Eigene Bauprodukte sind für diese Bauweise nicht erforderlich und auch am Markt nicht vorhanden.

4.2 Rahmenbauweise/Tafelbauweise

Die am weitesten verbreitete Bauweise im Holzbau in Österreich ist die Rahmenbauweise. Eine Studie der BOKU Wien aus 2011 ergab einen Anteil über 90% innerhalb der Holzbauweisen [10]. Die Holzrahmenbauweise wird vor allem in den Gebäudeklassen 1-3, darüber und im Ingenieurskelettbau als Außenwandsystem eingesetzt. Aus diesem Grund ist diese Bauweise von großer Bedeutung für den Holzbau.

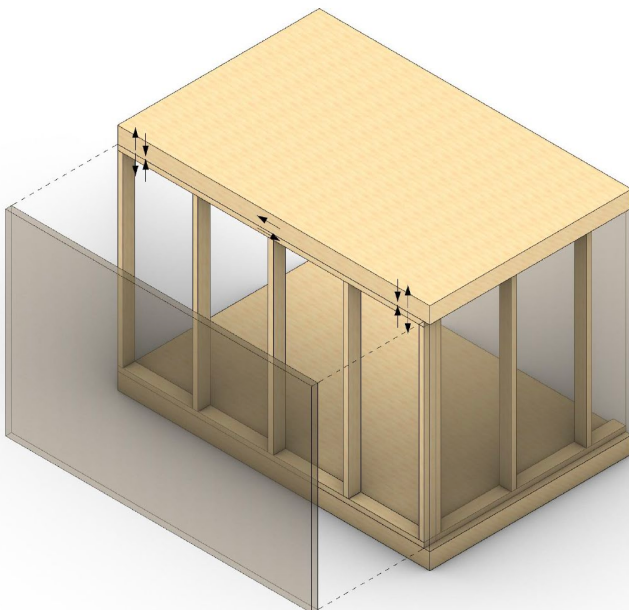


Abbildung 4.6 Konzeptionelle Darstellung eines Wandelementes in Rahmenbauweise mit Hauptbeanspruchungsrichtungen ©Luca Gottlob

Auch in diesem Fall müssen unterschiedlichen Systemgrenzen unterschieden werden. Entsprechend Graf können allgemein folgende Maßstäbe in der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen unterschieden werden (siehe Abbildung 4.7

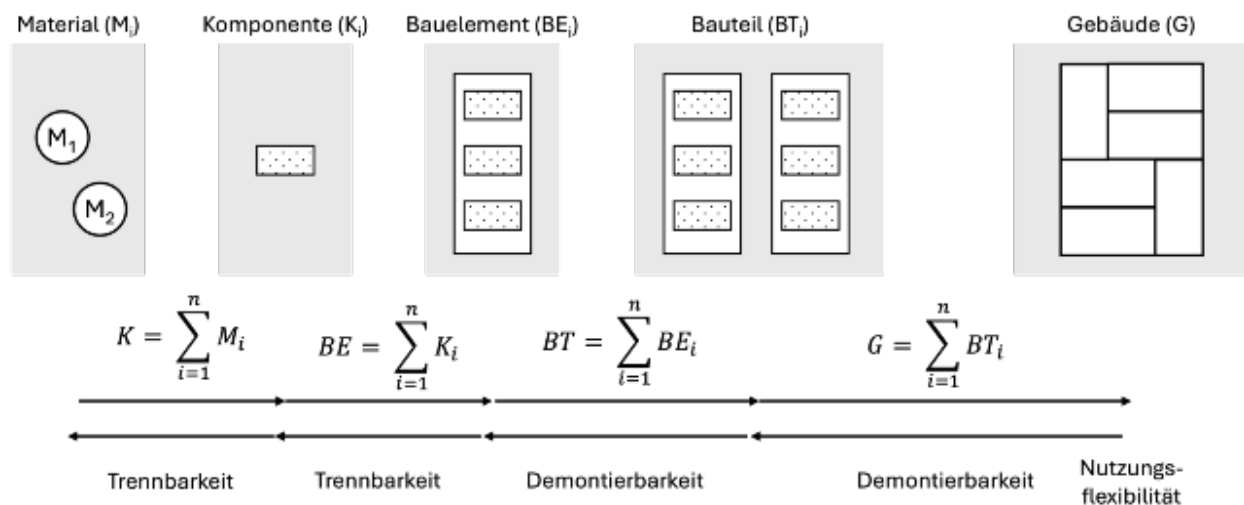


Abbildung 4.7 Darstellung der unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Kreislauffähigkeit nach [12]

Für die Holzrahmenbauweise ist die Fügung zwischen

- Bauteil (z. B. Außenwand) und Gebäude – Demontierbarkeit und
- den Bauelementen des Bauteils (z. B. OSB-Platte) – Trennbarkeit

von Interesse. Holzrahmenbauwände weisen eine wesentlich geringere Steifigkeit auf im Vergleich zu Wänden in CLT-Bauweise oder Stahlbetonwänden (1:5 bzw. 1:30). Aus diesem Grund leisten sie nur einen geringen Beitrag zur Aussteifung (übertragen entsprechend geringe Kräfte) und werden vor allem zur vertikalen Lastabtragung herangezogen.

Die Beanspruchungen auf Bauteilebene entsprechen jenen der CLT-Bauweise jedoch in geringerer Größenordnung: Abhebende Kräfte an den Elementenden und Scherkräfte dazwischen (siehe Abschnitt 5). An den Wandenden werden Winkel oder eigene Zuganker zur Übertragung von Zugkräften angeordnet, dazwischen werden Steckverbindungen verwendet.

In der Systemgrenze Bauelement werden die einzelnen Schichten durch Klammer, Nägel oder Schrauben verbunden.

4.2.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit

Diese Bauweise setzt stark auf die Verwendung stiftförmiger Verbindungsmittel (Schrauben, Nägel, Klammern). Damit stellt sich die Frage nach der Kreislauffähigkeit dieser Verbindungsmittel. Der Wunsch nach der Bewertbarkeit dieser Fügungen führte in den letzten Jahren zur Entwicklung verschiedener Leitfäden, die sich mit den Themen der Lösbarkeit/Trennbarkeit, Schädigung der Schichten und dem Wieder-/Weiterverwendungspotenzial der durch die Verbindungsmittel beschäftigen. Auf diese Thematik wird detailliert im Hintergrunddokument „Ökologische Bewertung“ eingegangen. An dieser Stelle sei der Leitfaden „Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau“ hingewiesen.

Dieser Leitfaden etabliert eine dreistufige Bewertung verschiedenster Fügungen im Holzbau – speziell zwischen Bauelementen. Daraus können folgende Erkenntnisse gewonnen werden. Hinsichtlich der Demontierbarkeit sind folgende Verbindungen als problematisch (Stufe 3) einzustufen:

- Geschraubt verspachtelt: Schrauben weisen grundsätzlich erst ab hohen Einbindetiefen oder gezielten plastischen Verformungen Probleme hinsichtlich der Kreislauffähigkeit auf. Im Kontext der Rahmenbauweise führen übliche Einbindelänge und Beanspruchungen zu keinen Problemen. Werden die Schraubenköpfe jedoch verspachtelt oder verputzt, können die Schrauben nur mit unwirtschaftlichem Aufwand wiedergewonnen werden. Für Anwendungen in Kombination mit Putzsystemen, können

Klebebänder über den Schraubenachsen oder das Wegschneiden der Befestigungsbereiche durch Schrauben angewandt werden.

- Geklebt: Geklebte Verbindungen sind dauerhafte Verbindungen. Diese sind nur durch erheblich Beschädigung der zu verbindenden Elemente lösbar. Insbesondere bei Folien besteht noch ein Bedarf hinsichtlich kreislauffähiger, wiederverwendbarer Produkte.

Im Gegensatz dazu sind folgende Fügungen als besonders demontierbar einzustufen (Stufe 1):

- Nut-Feder: als Formschlüssige Verbindung weisen diese ein hohes Kreislauffähigkeitspotenzial auf
- Hartholzdübel: Hartholzdübel werden im Gegensatz zu Stabdübeln aus Stahl nicht aufgrund des plastischen Potenzials eingesetzt. Dübel aus Holz werden bis zum Darrzustand getrocknet, kurz gewässert und anschließend passgenau in die Fügung eingebracht. Durch das Aufquellen in der Fügung werden Reibungskräfte erzeugt, die für eine stabile Verbindung sorgen. Zum Lösen der Verbindung sollten die Dübel möglichst trocken sein und können ggf. mittels Stabdübel „ausgeklopft“ werden. Sind die Reibungskräfte zu hoch, kann der Holzdübel ausgebohrt werden.
- Zimmermannsmäßige Verbindung: sind ebenfalls formschlüssige Verbindungen, die ggf. nur zur Lagesicherung über zusätzliche mechanische Verbindungsmittel verfügen. Formschlüssige Verbindungen können durch das Quell- und Schwindverhalten des Holzes hohe Reibungskräfte erzeugen, die die Trennbarkeit erschweren.
- Geschraubt: Schrauben weisen grundsätzlich erst ab hohen Einbindetiefen oder gezielten plastischen Verformungen Probleme hinsichtlich der Kreislauffähigkeit auf. Nähere Informationen dazu siehe Abschnitt 5.1.2
- Mehrteilige Verbindungen mit Schrauben: z. B. Falzbrett geschraubt/genagelt, Winkel geschraubt

Zusammenfassend legt Koppelhuber in diesem Leitfaden eine Hierarchie der Verbindungsmittel hinsichtlich des Rückbaupotenzials fest:

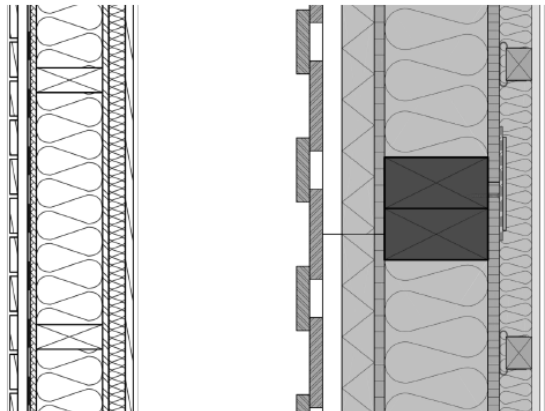
1. Gesteckte Verbindungen
2. Geschraubte Verbindungen
3. Genagelte/geklammerte Verbindungen
4. Geklebte Verbindungen

LEITFADEN
Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau



Rückbaukatalog mit Bewertungsschema zur Kategorisierung von Aufbau- & Anschlusssituationen
Aufbausituation 1a - Außenwand - Holzleichtbau

06.06.2024 / V1



dataholz.eu - Detailpunkt: avrhi09a - 12.12.2023 Leitdetails für den Holzwohnbau -
TU-Graz - INSTITUT FÜR HOCHBAU- UND INDUSTRIEBAU – LfNr.:001

Rückbaukatalog mit Bewertungsschema zur Kategorisierung von Aufbau- & Anschlusssituationen - Aufbausituation 1a - Außenwand - Holzleichtbau							
Bauteile	RB- folge	Funktionsebene / Schichtenmodell	Bau- Konstruktionselement		Rückbaubarkeit		Anw.
			Schicht	Komponente / Material	Verbindungstyp	Demontierbarkeit	
		Innere Funktionsebene ARCH/BPH	Bepankung	Feuerschutzplatte/ Gipsplatte/Gipsfaserplatte	geschraubt		
					geschraubt verspachtelt		
					geklammert		
				geschlossene Holzschalung - Nut-Feder	geschraubt		
			Dämmebene		genagelt		
				geschlossene Holzschalung - Deckleiste	geschraubt		
					genagelt		
				Platten- / Rollendämmstoffe	lose		
		Konstruktion Installationsebene		Einblasdämmung	lose		
				Unterkonstruktion Holz (Lattung)	geschraubt		
					genagelt		
				Unterkonstruktion Metall (Profile)	geschraubt		
					genagelt		
			Dampfbremse	div. Dampfbremsen	geklebt vollflächig		
					geklammert+pkt. geklebt		
					geklebmt		

Abbildung 4.8 Beispiel der Rückbaubarkeitsbewertung einer Außenwand in Holzrahmenbauweise nach Koppelhuber [13]

STRATEGIE:
Die Rahmenbauweise wird vor allem in klein- und kleinstvolumigen Holzbau eingesetzt. Darüber hinaus kommt diese Bauweise oftmals bei Außenwänden aufgrund des hohen Öffnungsanteils zum Einsatz. Die Elemente können als Ganzes wiederverwendet werden (ReUse) oder einzelne Ebenen zur Wiederverwendung zusammengefasst werden.

FÜGUNG:
Die Rahmenbauweise wird aufgrund der geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu massiven BSP-Wänden nur begrenzt zur Kraftübertragung herangezogen. Oftmals werden Steckverbinder eingesetzt, die allerdings nur Zugkraftübertragung verriegeln und nicht rückbaubar sind. Erste Bauprodukte, die über Entriegelungsmechanismen verfügen und damit kreislauffähig sind, sind bereits am Markt verfügbar.

5 CLT-Bauweise

Unter den Begriff „Massivbau“ werden im Holzbau verschiedene Bauweisen zusammengefasst (zB Blockbauweise, Brettstapelbauweise oder CLT-Bauweise). International fasst der Begriff „Mass Timber“ die Holzmassivbauweisen aus mehrschichtigen, vorgefertigten Massivholzlamellen zusammen. In diesem Dokument wird nachfolgend der Fokus auf die CLT-Bauweise gerichtet.

Eine reine CLT-Bauweise ist aufgrund des vergleichsweise hohen Materialverbrauchs zurückgegangen. Oftmals werden CLT-Elemente (als Aussteifungselemente) in verschiedenen Bauweisen eingesetzt (zB Raummodulbauweise, Rahmenbauweise). Im Ingenieurskelettbau werden aufgrund der hohen Schnittgrößen meist Stahlbetonkerne zur Gebäudeaussteifung eingesetzt. Die Schwachstelle in der CLT-Bauweise stellt die Fügung dar. In Abbildung 5.1 sind die unterschiedlichen Arten von Fügungen und deren Hauptbeanspruchungsarten dargestellt.

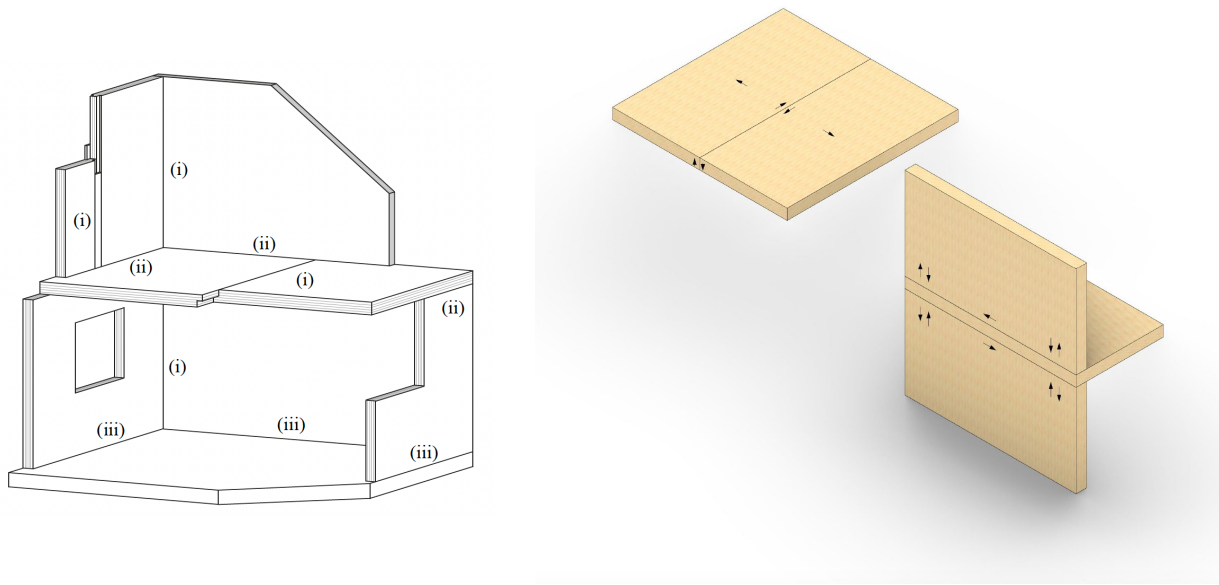


Abbildung 5.1 Fügungen in der CLT-Massivbauweise (i) Fläche-Fläche in einer Ebene (ii) Fläche-Fläche über Eck (iii) Wand-Fundament (links) [14], Fügungen mit Hauptbeanspruchungen ©Luca Gottlob (rechts)

In Europa werden CLT-Wände traditionell geschoßweise ausgeführt. In Neuseeland, Kanada, USA [15] werden die Aussteifungswände aus CLT oftmals geschoßübergreifend, bspw. über 3 Geschoße ausgeführt. Diese Bauart führt zu einer geringeren Anzahl an Fügungen und bietet damit einen Vorteil in der Leistungsfähigkeit. Die Steifigkeit einer CLT-Wand zur Gebäudeaussteifung ist von unterschiedlichen Phänomenen abhängig (siehe Abbildung 5.2). Aufgrund des Steifigkeitsunterschiedes des Wandelements selbst im Vergleich zu den Verbindungsmitteln, ist besonders das „Rocking“ (Aufkippen) für die Gesamtsteifigkeit von Bedeutung. Damit stellt die Leitungsfähigkeit der Fügung von CLT-Wänden einen wichtigen Hebel in der Steigerung des Anteils von Holzbauweisen dar.

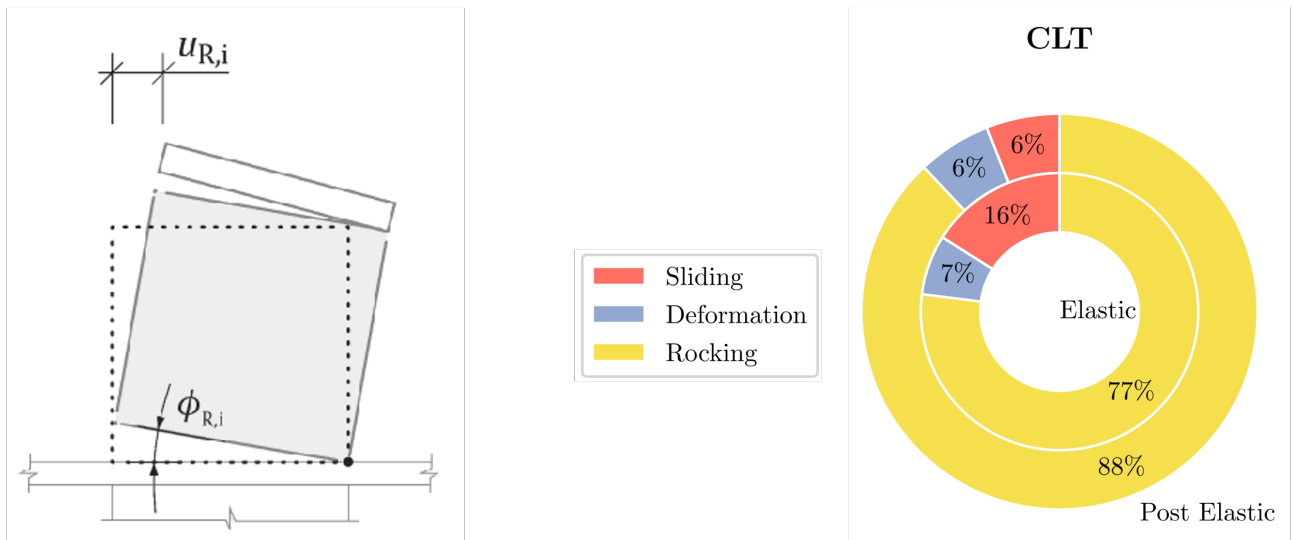


Abbildung 5.2 Einfluss auf die Steifigkeit durch Rocking (Aufkippen) (links) [16], Anteil der unterschiedlichen Einflüsse auf die Steifigkeit (rechts) [17]

5.1 Status Quo & Herausforderungen im Kontext von Kreislauffähigkeit

Eine besondere Herausforderung stellen Wand-Decken-Anschlüsse von Aussteifungswänden dar. In diesen Bereichen gilt es

- Die Vertikallasten darüberliegender Geschoße ohne Querdruckversagen durch die Deckenplatte zu leiten
- Horizontallasten als Schubkräfte in den Fugenbereichen zu übertragen
- Ein ausreichendes duktiles Verhalten der Fügungen sicherzustellen, damit die aufzunehmenden Kräfte in den BSP-Bauteilen geringgehalten werden können

Derzeit wird dieser Bereich meist in Form einer der dargestellten Varianten ausgeführt. Je nach Höhe der Vertikallasten dienen VGS als Querdruckverstärkung der Deckenplatte.

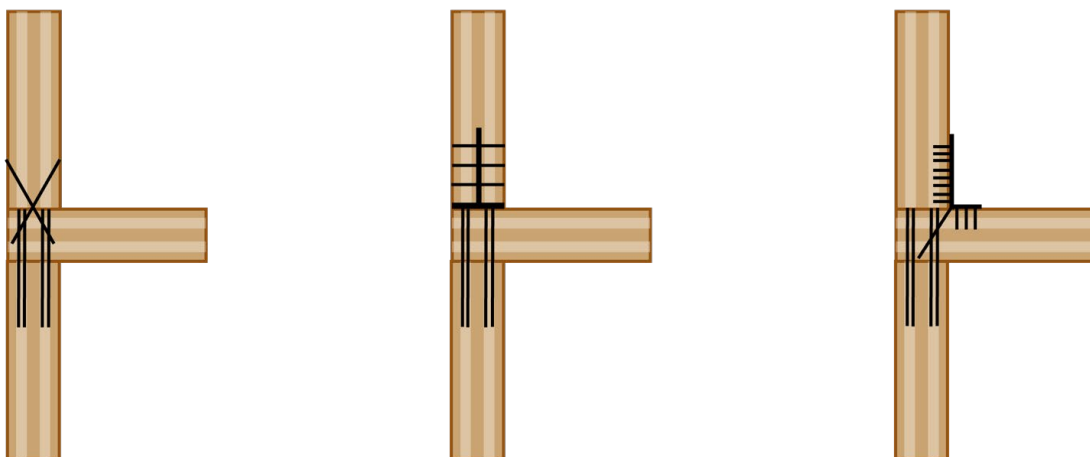


Abbildung 5.3 Verschiedene Formen der Ausbildung eines Wand-Decken-Wand-Anschlusses in CLT-Bauweise: geneigte VGS (links), Schlitzblech & Stabdübel (mittig) und Zuganker & Schubwinkel (rechts)

Diese Fügungen konnten sich in den letzten Jahrzehnten unter den damaligen Rahmenbedingungen bewähren, bieten hinsichtlich deren Kreislauffähigkeit jedoch noch Verbesserungsspielraum.

5.1.1 Anforderungen durch Kreislaufwirtschaft

Damit Kreislaufwirtschaft im Bauwesen funktioniert, müssen ökonomische und technische Anforderungen erfüllt werden. Kreislauffähige Verbindungen dürfen nicht zu komplex werden, sondern müssen so einfach wie möglich herstellbar und montier- bzw. demontierbar sein, um ökonomisch konkurrenzfähig zu sein. Aus technischer Sicht gilt es vor allem zwei Anforderungen zu erfüllen: das Intakt bleiben der Bauteile und die Lösbarkeit der Verbindung.

Intakt bleiben der Bauteile bedeutet, dass die Bauteile nicht nur den Beanspruchungen durch Einwirkungen über die Nutzungsdauer widerstehen müssen, sondern darüber hinaus auch nicht durch die Demontage der Verbindung „geschädigt“ werden dürfen. Daraus ergeben sich Fragen hinsichtlich von Störstoffen (z.B. abgerissene Schrauben), der wiederholten Tragfähigkeit von Schraubenantrieben und Gewindegängen oder plastisch verformter Bereiche im Holz (siehe Abbildung 3.2).

Lösbarkeit der Verbindung bedeutet, dass diese auch nach einer geplanten Nutzungsdauer von 50 oder mehr Jahren noch gegeben ist. Das bedeutet, dass die Verbindungen mit einer Überfestigkeit auszulegen sind und das Niveau der Tragfähigkeit zu begrenzen ist. Eine erhöhte Beanspruchung kann beispielsweise zu gekrümmten Verbindungsmittelachsen, oder anderen plastischen Verformungen führen, die die Demontage erschweren. (siehe Abbildung 3.2).

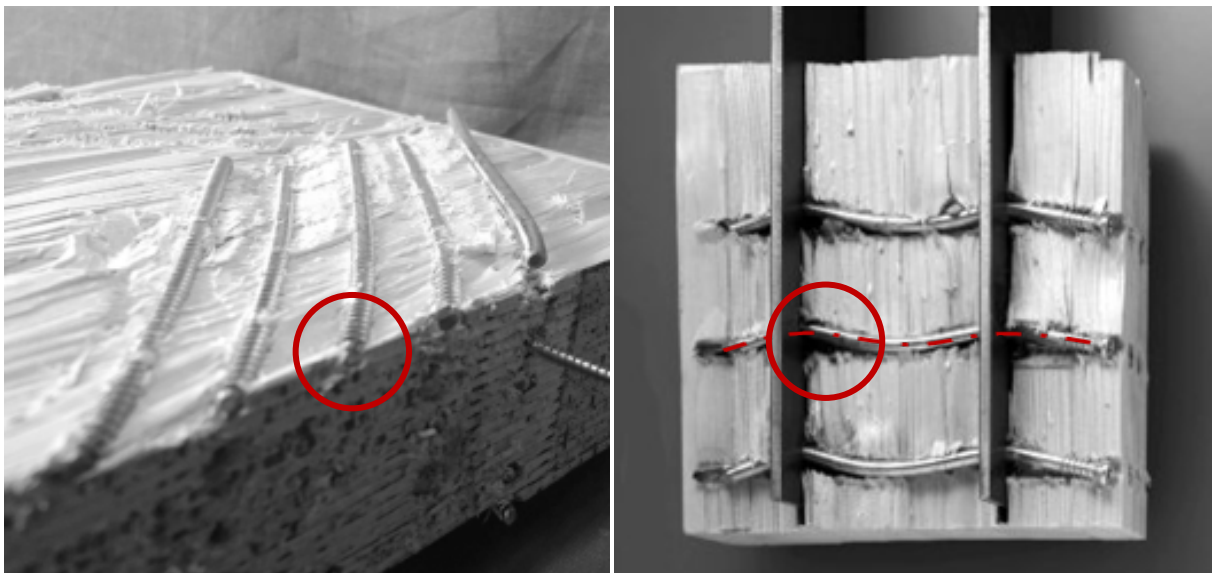


Abbildung 5.4 Herausforderungen im kreislauffähigen Bauen: Abreißen des Schraubenkopfes (links) [18], Verkrümmung der Stabachse durch Scherbeanspruchung (rechts) [19]

Diese beiden Anforderungen an die Fügung werden nachfolgend für die wichtigsten Verbindungsarten in der CLT-Bauweise näher betrachtet.

5.1.2 (geneigte) Holzschrauben / Vollgewindeschrauben (VGS)

Die geringen Kosten, die einfache Montage, die Freiheit in Anordnung und Geometrie sowie die vergleichsweise hohe Tragfähigkeit sind die Hauptargumente für die Anwendung von Holzschrauben [20, S2]. Anforderungen an stiftförmige Verbindungsmittel aus Metall sind in der ÖNORM EN 14592 bzw. ÖNORM EN 14545 geregelt. Holzschrauben wirken als punktförmige Verbindungen, die auf Abscheren beansprucht werden, axial beansprucht werden oder einer Kombination aus beidem. Je nach Beanspruchungsart sind verschiedene Versagensszenarien nachzuweisen [16]:

Abscheren:

- Def $\leq$ 6mm: Wirkungsweise wie Nägel
- Def $>$ 6mm: Wirkungsweise wie Passbolzen

Axiale Beanspruchung:

- das Ausziehversagen des eingeschraubten „Gewindeteils“ der Schraube;

- das Abreiversagen des Kopfes von Schrauben, die in Verbindung mit Stahlblechen verwendet werden;
- das Durchziehversagen des Schraubenkopfes;
- das Abreißen der Schraube auf Zug;
- das Knickversagen der Schraube bei Druckbelastung;
- das Scherversagen entlang des Umfanges einer Gruppe von Schrauben, die in Verbindung mit Stahlblechen verwendet wurde (Blockscherversagen).

Der Einbau von Holzschrauben unter einem Winkel hat sich seit ca. 10 Jahren verbreitet. Damit kann eine reine axiale Beanspruchung oder zumindest eine kombinierte Beanspruchung aktiviert werden. Die axiale Beanspruchung bietet den Vorteil, dass sie wesentlich durch die Eindringtiefe des Gewindes bestimmt wird und somit die Leistungsfähigkeit leicht und wirtschaftlich gesteigert werden kann. Die axiale Beanspruchung einer Schraube bedeutet jedoch auch ein sprödes Versagen im Vergleich zum duktilen Abscheren. Im Entwurf des nächsten Eurocode 8 wird in Abschnitt 13.4.2 explizit auf das nicht duktile Tragverhalten axial beanspruchter Holzschrauben hingewiesen [21]. Mit der Erhöhung der Gewindelänge zur Leistungssteigerung, sinkt jedoch die Fähigkeit zur Demontage. Beim Eindrehen der VGS entsteht durch die Reibung zwischen Schraube und umgebender Holzmatrix Wärme, die zu einem Verbund zwischen Verbindungsmittel und Holz (Lignin) führt. Dadurch entsteht ein erhöhter Drehmomentwiderstand bei der Demontage der Schrauben. Wird dies nicht in der Planung berücksichtigt, führt das in vielen Fällen zu einem Torsionsversagen des Schraubenkopfes („Abdrehen des Kopfes“) bei der Demontage.

Daneben können weitere Einflüsse zu einer Erhöhung der Reibung und damit dem erforderlichen Drehmoment zur Demontage führen. Korrosion des Verbindungsmittels führt zu einer Volumenzunahme und damit ebenfalls zu einer Erhöhung des Drehmoments. Bei der Planung ist deshalb auf den pH-Wert des verwendeten Holzes und eine geeignete Materialwahl der Schraube zu achten.

Aktueller Forschungsstand

Die Verwendung von Holzschrauben im zirkulären Bauen stellt einige Herausforderungen an die Planung. Dabei stellen sich vor allem zwei Fragen: „Ist die Verbindung nach einer Nutzungsdauer von 50 Jahren lösbar?“ und „Ist die Verbindung für einen neuerlichen Zyklus von 50 Jahren geeignet?“.

Folgende Fragen sind hinsichtlich der zerstörungsfreien Demontage zu klären:

- Wie wurde die Schraube belastet (Orientierung)?
- Wie hoch ist das benötigte Drehmoment für die Demontage?
- Wie korrosionsanfällig ist die Schraube?
- Wie hoch ist die Tragfähigkeit des Gewindeganges im Holzbauteil bei neuerlicher Nutzung?

Zur Klärung dieser Fragen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Hinsichtlich des Kreislauffähigkeitspotenzials von Schrauben liegen aktuell wenige empirische Daten vor. Nachfolgend werden die Erkenntnisse verschiedener Untersuchungen zusammengefasst.

Forschungsprojekt der TUM: Wandelbarer Holzhybrid [22]

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden unterschiedliche etablierte Verbindungssysteme auf ihre Lösbarkeit untersucht und ggf. eine verbesserte Alternative vorgeschlagen. Für axial beanspruchte Verbindungen wurden Tests mit Holzschrauben durchgeführt.

Rahmendaten der Testung:

- Holzschrauben, Durchmesser 8mm,
- Länge: 10d bis 30d
- Vollgewindeschrauben (SFS WT, Würth ASSY plus),
- Teilgewindeschrauben (Schmid Rapid Hardwood, Würth ASSY 3.0, Spax Heco)
- Bohrspitze oder Verdichterspitze,
- Materialien: Brettschichtholz (BSH) aus Fichtenholz, Buchenfurnierschichtholz (Bu-FSH),

- Dauer: 6 Monate
- Umgebungsfeuchte: konstant 20% in Klimakammer, keine Wechselbeanspruchung
- Testung nach 3, 30 und 180 Tagen
- Stichprobenumfang: jeweils 10

Ergebnisse:

Die Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihen. Vorgebohrte Schrauben ließen sich in allen Kombinationen bis zur maximalen Einbindelänge ohne Schädigung wieder ausbauen. Nicht vorgebohrte Teilgewindeschrauben sind in hartem Buchenfurnierschichtholz (Bu-FSH) bis 120mm (70%) schadfrei lösbar, Vollgewindeschrauben müssen in Bu-FSH vorgebohrt werden und sind dann bis 245mm lösbar.

In weicherem Fichten-Brettschichtholz konnten alle Teilgewindeschrauben gelöst werden. Bei Vollgewindeschrauben konnten ohne Vorbohrung bis 220mm gelöst werden (100%), mit Vorbohrung kann eine höhere Gewindelänge gelöst werden – getestet wurde bis 380mm (33%).

Tabelle 5.1: Maximale Einbindelänge lösbarer Verbindungen nach 180 Tagen und Anteil lösbarer Schrauben

Material	Teilgewindeschrauben				Vollgewindeschrauben			
	nicht vorgeb.	%	vorgebohrt, DM 6mm	%	nicht vorgeb.	%	vorgebohrt, DM 6mm	%
BSH	380mm	100	380mm	100	220mm	100	380mm	33
Bu-FSH	120mm	70	380mm	100	-	-	245mm	100

Konstante Umgebungsbedingungen im Sinne von Innenanwendungen stellen den wohl wichtigsten Anwendungsfall dar. Dennoch können darüber hinaus wechselnde Beanspruchungen in Außenanwendungen oder auch bei Hallentragwerken von Interesse sein. Zu diesem Thema gibt es bereits viele wissenschaftliche Untersuchungen auf die nachfolgend auszugsweise eingegangen wird.

Die Lösbarkeit von Schrauben kann einerseits konzeptbedingt durch die Einbindelänge des Gewindeganges und der Verbundwirkung mit der Holzmatrix beim Einbringen bestimmt werden, aber auch durch chemische Parameter beeinflusst werden. Dazu zählt vor allem der Effekt der Verbindungsmittelkorrosion. Korrosion ist ein oxidativer Prozess durch Sauerstoff und Wasser. Aus diesem Grund ist der Einfluss der Holzfeuchte für diese Thematik von Relevanz:

- Silvia et al untersuchte den Einfluss der Holzfeuchte auf die Ausziehtragfähigkeit in CLT, BSH und Massivholz [23]. Dabei wurden folgende Erkenntnisse festgestellt:
 - Es wurde beobachtet, dass die REF-Konfiguration im Feuchtigkeitsbereich zwischen 12 % und 18 % eine Abnahme der Auszugsfestigkeit um 1,8 % pro Prozentpunkt Feuchtigkeitszugabe aufwies. Dieses Ergebnis belegt, dass die durch Feuchtigkeitszunahme verursachte Reduzierung der Auszugsfestigkeit bei in CLT eingebetteten STS geringer ist als bei Massivholz und GL.
 - Es wurde ein Vergleich der Auswirkungen des relativen Feuchtigkeitszyklus auf CLT (REF-Konfiguration) und GL durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse deuten auf eine bessere Leistung von CLT hin, dass einen Anstieg aufweist, während GL einen leichten Rückgang zeigt. Um diese Unterschiede jedoch genauer zu quantifizieren, ist weitere Forschung erforderlich.

Zur Ermittlung des Korrosionseinflusses sind vor allem zwei Parameter von Interesse: a) die Höhe der Korrosion der Verbindungsmittel und b) die Auswirkungen der Verbindungsmittelkorrosion auf die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels selbst und c) auf die Ausziehtragfähigkeit insgesamt

- Ad a) Nürnberger weist in seinen Untersuchungen auf die Unterscheidung zwischen atmosphärischer Korrosion und Kontaktkorrosion hin [24]. Je nach Art sind unterschiedliche Bereiche der Korrosion zu unterscheiden und entsprechende Maßnahmen zu setzen. Folgende Erkenntnisse wurden festgestellt:
 - Für den direkten Kontakt mit der Außenatmosphäre gilt Folgendes: Kritische Korrosionsbedingungen treten am ehesten auf, wenn sich abgelagerte Schadstoffe (z. B. Chloride in der

- Meeresatmosphäre) im nicht bewässerten Bereich anreichern können. Die Korrosionsbelastung ist dann höher als beim Kontakt mit Holz.
- Für den Kontakt mit Holz gelten folgende Zusammenhänge: In verwitterten Außenbereichen kann das Korrosionsverhalten von Metallbeschichtungen in Kontakt mit Holz aufgrund von Holzbestandteilen (Holzschutzmittel, Essigsäure) höher sein als außerhalb des Holzes. Mit zunehmender Holzfeuchtigkeit wirkt sich einerseits Holzbestandteil (Holzschutzmittel, insbesondere bei Eiche) korrosionsfördernd aus. Andererseits können Schadstoffe wie Chloride zusammen mit Wasser (z. B. entlang einer Schraube) in das Holz gelangen. Im nicht bewitterten Bereich sind die Holzbestandteile nicht korrosiv, da die Holzfeuchte zu gering ist und Schadstoffe (z. B. Chloride aus der Meeresatmosphäre) nicht in gelöster Form in das relativ trockene Holz eindringen können.
 - Ad b) Nguyen et al stellte Verfahren zur Berechnung der Auswirkungen von Korrosion auf die Tragfähigkeit von Metallverbindungselementen in Holzkonstruktionen anhand der australischen Normung vor [25]. Die Berücksichtigung erfolgt in Form der Berechnung des effektiven Querschnittsverlusts für eine vorgegebene Nutzungsdauer.
 - Ad c) Yan et al untersuchte experimentell die Auswirkungen zyklischer Feuchtigkeitsänderungen auf die Auszugsfestigkeit und Dauerhaftigkeit europäischer Schrauben in australischem, mit Kupfer-Chrom-Arsenat (CCA) behandeltem und unbehandeltem Kiefernholz [20]. Die wichtigsten Ergebnisse sind:
 - Alle getesteten Schrauben verloren nach drei Feuchtigkeitszyklen 22–32 % ihrer charakteristischen Auszugskraft. Zwischen dem dritten und zwölften Zyklus wurde eine gewisse Erholung beobachtet. YZ-Schrauben in CCA-behandeltem Holz zeigten dabei eine Erholung über die Ausgangswerte hinaus. Dies deutet darauf hin, dass ein gewisses Maß an Metallkorrosion die Auszugsleistung der Schrauben erhöhen kann.
 - Schrauben in CCA-behandeltem Holz verloren nach 24 Zyklen unabhängig von der Schraubenbeschichtung 50 % ihrer anfänglichen Auszugskraft, während Schrauben in unbehandeltem Holz etwa 35 % verloren.
 - YZ-Schrauben in unbehandeltem Holz wiesen den geringsten Massenverlust über die Zeit und die höchste Korrosionsbeständigkeit auf. Der Massenverlust von YZCCA- und NZ-CCA-Schrauben war 40 % höher als der von YZ-Schrauben in unbehandeltem Holz.

Insgesamt ist festzuhalten, dass aktuell eine hohe Anzahl an Untersuchungen in dieser Thematik stattfindet. Dies ergaben auch diverse Gespräche mit Forschungseinrichtungen in Österreich. Zum Zeitpunkt des Endes des Forschungsprojektes standen jedoch noch keine Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Verfügung.

5.1.3 Schlitzblech & Stabdübel

Ausführungen mit Schlitzblech und Stabdübeln kommen in hochbeanspruchte Situationen zur Anwendung, die die Leistungsfähigkeit von Zugankern übersteigt. Zuganker weisen meist eine maximale Zugtragfähigkeit von 120–150 kN auf [26, 27]. Im mehrgeschoßigen Holzbau können im EG jedoch Zugkräfte leicht Vielfache davon erreichen. Ab einer Anzahl von 3 Verbindungsmitteln nebeneinander sind Alternativen zu überlegen.

Diese Ausführungsvariante bietet grundsätzlich eine hohe Kreislauffähigkeit. Die Stabdübel können meist durch eine entsprechende Kraft (z. B. Hammerschlag) ausgeschlagen werden und die Verbindung demontiert. Solange die Verbindung im elastischen Belastungsbereich bleibt, ist sie somit sehr kreislauffähig und kann mit gleichen Leistungsanforderungen erneut verwendet werden.

Treten jedoch höhere Belastungen auf, die den elastischen Bereich überschreiten, treten aufgrund der Scherbeanspruchung Biegeverformungen in den Stabdübeln mit plastischen Druckverformungen der umgebenden Holzmatrix auf. Damit ist die Achse der Stabdübel nicht mehr gerade, womit das Herausschlagen der Verbinder wesentlich erschwert bis verunmöglicht wird. Des weiteren führen die plastischen Bereiche im Holz zu einem Lochspiel und in Konsequenz dazu, dass die gleichen Löcher nicht nochmals mit der gleichen Leistungsfähigkeit verwendet werden können.



Abbildung 5.5 Zweischnittige Stahl-Holz-Verbindung nach Überschreiten der Tragfähigkeit der stiftförmigen Verbindungsmittel durch Ausbildung von Fließgelenken [19]

5.1.4 Zuganker & Schubwinkel

Die am meisten eingesetzten Verbindungsmittel in der CLT-Bauweise stellen Winkel dar. Diese werden je nach Beanspruchungsart als Zuganker oder Schubwinkel ausgeführt. Dabei handelt es sich um mehrteilige Verbindungsmittel bestehend aus einem metallischen Winkel und (in der Fügung von Metall und Holz) einer hohen Anzahl stiftförmiger Verbindungsmittel (Nägel/Rillennägel, Schrauben, Bolzen).

Die Verbindungsmittel sind idR. so ausgelegt, dass es zuerst zu einem Versagen der stiftförmigen Verbindungsmittel kommt. Diese Leistungsfähigkeit ist einfach über die Anzahl der stiftförmigen Verbindungsmittel bestimmbar. Im Bereich der Zuganker können elastische Grenztragfähigkeiten bis zu ca. 120kN [26] erreicht werden. Im mehrgeschoßigen Holzbau können im EG jedoch Zugkräfte von mehreren 100 kN auftreten. In höher beanspruchten Bereichen müssen andere Verbindungen, bspw. Ausführungen mit Schlitzblech und Stabdübeln zur Anwendung kommen.

Durch die Abscherbeanspruchung bieten diese Verbindungsmittel ein plastisches Potenzial. Ähnlich den Stabdübeln ist das plastische Versagen mit plastischen Druckverformungen in der Holzmatrix verbunden und damit einer Reduktion der Tragfähigkeit bei gleichem Verbindungsmitteldurchmesser.



Abbildung 5.6 Versagensfall eines Zugankers bei Überschreiten der Tragfähigkeit der Nägel im Holzbauteil [19]

STRATEGIE:

Die CLT-Bauweise ermöglicht eine große Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten: von Gebäuden in ganzheitlicher „Massivbauweise“, als Deckenelement in nahezu allen modernen Holzgebäuden bis hin zu Aussteifungswänden im Ingenieurskelettbau. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft sind diese Scheiben bzw Platten sehr werthaltig und sollten durch Wiederverwendung (Reuse) als einzelne Bauteile im Kreislauf gehalten werden.

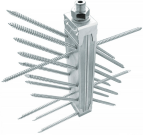
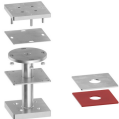
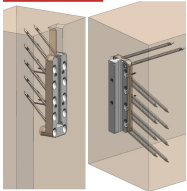
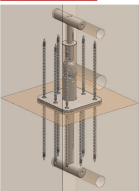


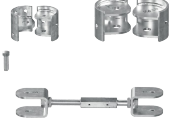
FÜGUNG:

Damit die CLT-Elemente als Bauteile wiederverwendet werden können, müssen die Fügungen demontierbar geplant sein. Aktuelle Fügungen durch hohe Anzahlen stiftförmiger Verbindungsmittel werden diesem Anspruch oftmals nicht gerecht. Die plastischen Potenziale der Verbindungsmittel führen zu plastischen Deformationen der umgebenden Holzmatrix.

6 Bauprodukte für kreislauffähige Verbindungen

Manche Herausforderungen im Kontext von Fügungen sind projektunabhängig (grundlegend) und betreffen daher ein großes Publikum. Für diese Art der Herausforderungen haben Verbindungsmittelhersteller bereits vielfach Lösungen entwickelt. Diese Lösungen werden in diesem Abschnitt vorgestellt und verglichen. Die Gliederung der Systemverbinder erfolgt nach Art des Übertragungsmechanismus (Formschluss, Kraftschluss, Stoffschluss), der Art der zu verbindenden Bauteilen (Stab, Fläche) und der Beanspruchungsart (Druckkräfte, Scherkräfte, etc.). Thematisiert werden die zuvor bereits näher diskutierten Bauweisen: Ingenieurskelettbau, Raummodulbauweise, Rahmenbauweise und CLT-Bauweise. Die Auflistung kreislauffähiger Bauprodukte verfolgt das Ziel, die Bandbreite bereits verfügbarer Produkte aufzuzeigen.

Ingenieurskelettbauweise		
Träger – Stütze / Wand	Stütze – Decke – Stütze	
<u>SIHGA Hobafix Max</u> 	<u>Knapp Megant-Serie</u> 	<u>Rothoblaas Pillar</u> 
<u>Pitzl HVP-/RIGID-Serie</u> 	<u>Knapp Ricon-Serie</u> 	<u>Rothoblaas Spider</u> 
<u>Rothoblaas UV T-Serie</u> 	<u>Knapp Walco-Serie</u> 	<u>Simpson Strong Tie MPSC</u> 
<u>HILTI</u> 	<u>Sherpa Holzverbinder</u> 	<u>HILTI</u> 
<u>Simpson Strong Tie ECGM</u> 	<u>Rothoblaas Alumega-Serie</u> 	<u>Rothoblaas Disc-Flat</u> 

Rahmen-/ Massivbauweise		Modulbauweise
Wand – Wand / Decke – Decke	Wand – Decke – Wand	Wand – Decke
<u>HITLI HTC P2P</u>	<u>Pitzl CLT-Verbinder</u>	<u>HILTI HCW-UP</u>
		
<u>(Hasslacher) X-Fix</u>	<u>Rothoblaas Ring-Serie (90C)</u>	<u>STEXON oK</u>
		
<u>SIHGA Idefix</u>	<u>Rothoblaas Radial</u>	<u>SIHGA Modulix</u>
		
<u>Rothoblaas Ring-Serie (60T)</u>	<u>Rothoblaas X-Rad</u>	<u>Knapp Walco-Serie</u>
		
<u>Rothoblaas Slot</u>		
		
<u>Sherpa CLT-Connector</u>		
		

7 Aktuelle Forschungen

Nach der Analyse des Status quo wird ein Blick in die Zukunft geworfen und ergänzend zu den bereits verfügbaren Produkten, aktuelle Forschungen in dem Gebiet diskutiert.

Konusadapter / Scheibendübel [28]

Das t-lab an der RPTU hat unter der Leitung von Jürgen Graf eine Vielzahl neuer, kreislauffähiger Verbindungen entwickelt. Zwei ähnliche Verbindungsmittel mit großem Anwendungsraum stellen der Konusadapter bzw. der Scheibendübel dar. Das Prinzip eint beide Verbindungen. Es gilt Scherkräfte zwischen Bauteilen zu übertragen, ohne eine plastische Verformung durch Abscheren des stiftförmigen Verbindungsmittels zu erzeugen. Eine traditionelle zimmermannsmäßige Verbindung zur Übertragung von Schubkräften stellen Hartholzdübel, meistens in Blockform, dar. Damit es zu keinem Aufkeilen in Folge einer Schubbeanspruchung kommt, sind solche Verbindungen vertikal mit Zügelementen (z. B. Bolzen oder Schrauben) zu sichern.

Dieses Prinzip wird auch hier angewandt. Konusadapter bzw. Scheibendübel, beide aus Kunstharzpressholz (KP), sichern die Schubübertragung. Durch die Verwendung von KP können Querdruckfestigkeiten von 240 N/mm^2 erreicht werden. Die Elemente weisen ca. 65mm Durchmesser auf. Damit wird eine Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel von 25 kN Scherbeanspruchung ermöglicht. Scherkräfte werden somit rein über den Adapter übertragen, der die innenliegende Schraube vor Scherbeanspruchungen schützt. Damit es zu keinem Abheben kommt, wird eine metrische Schraube mit Unterlagsscheibe verwendet. Als Gegenstück zur Schraube wird eine Rampa-Muffe im zu verbindenden Holzbauteil eingedreht. Aufgrund des metrischen Gewindes bleibt die Verbindung dauerhaft gut lösbar.

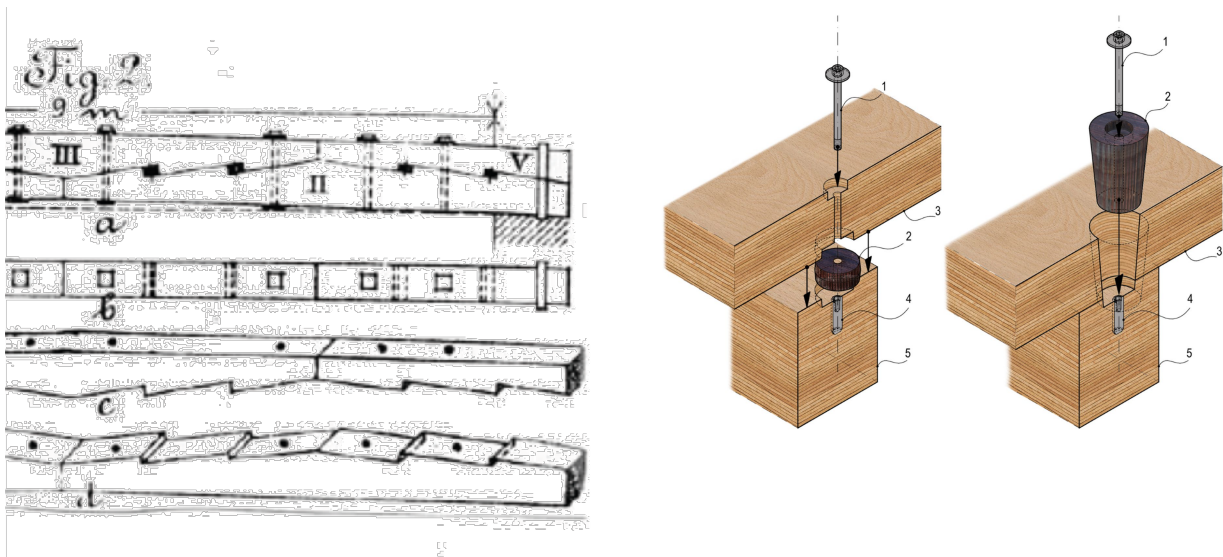


Abbildung 7.1 Zimmermannsmäßige Scherverbindung mittels Hartholzdübel (links) [29], moderne Interpretation einer Scherverbindung mittels Konusadapter (rechts) [28]

In einer Versuchsreihe erreicht der KP-Scheibendübel eine um den Faktor 1,5 höhere charakteristische Tragfähigkeit im Vergleich zum Appel-Dübel mit 65mm (18,3kN zu 25kN). Der Verschiebungsmodul in BauBuche wurde mit 34,9kN/mm ermittelt. Auf Gebrauchslastniveau konnte eine charakteristische Tragfähigkeit von 20kN ermittelt werden. Die trennbare Fuge ist in diesem Konzept als formschlüssige Fügung zwischen zwei Holzelementen ausgeführt.

Teilgewindeschraube mit Unterlagsscheibe & RAMPA Muffe [28]

Bei axial zugbeanspruchten Schrauben hängt die Lösbarkeit von einer Vielzahl an Faktoren ab (siehe Abschnitt 5.1.2). Insbesondere in hochfesten Materialien wie BauBuche ist die Einbindelänge einer Vollgewindeschraube eingeschränkt. Den Kraftschluss, den Vollgewindeschrauben über die Gewindelänge über Formschluss zwischen Gewinde und Holzmatrix herstellen, kann auch über die Anwendung von Teilgewindeschrauben mit metrischem Gewinde (Reduktion der Gewindelänge) in Kombination mit Unterlagsscheiben und RAMPA-Muffe erfolgen. Jene

Fläche, die zur Kraftübertragung über das Gewinde zur Verfügung stünde, kann durch die Anwendung einer Unterlagsscheibe ausgeglichen werden. Die Lösbarkeit des verbleibenden Teilgewindes wird durch das Zwischenschalten einer RAMPA-Muffe zwischen Holzmatrix und Teilgewindeschraube erreicht. Anstelle einer Vollgewindeschraube werde in diesem Fall jedoch eine Teilgewindeschraube mit metrischem Gewinde, eine Unterlagsscheibe und eine RAMPA-Muffe benötigt.

Vorgespannte Ringknoten [30]

Nachhaltigkeit im Sinne eines ressourceneffizienten Umgangs mit Materialien bedeutet die Bauteile als werthaltige Elemente zu betrachten. Es sollte nur so viel Material, wie nötig eingesetzt werden. Aus diesem Grund sind aufgelöste Konstruktionen, massiven, flächigen vorzuziehen, soweit es konstruktiv möglich ist. Beispielsweise können CLT-Wandscheiben in Rahmen mit Diagonalverbänden oder in Wandscheiben in Holzrahmenbauweise aufgelöst werden. Die Auflösung flächiger Elemente in fachwerksartige, stabförmige Elemente wurde auch in der Werks- und Forschungshalle Diemerstein der RPTU Kaiserslautern angewendet.

Die Halle besteht aus 10 Stück 3-Gelenk-Rahmen. Im Holzbau sind biegesteife Verbindungen traditionell nur schwer herzustellen, weshalb 3-Gelenk-Rahmen mit Stabdübelkreisen in den Ecken oder massiven, flächigen Eckbereichen ausgeführt werden. Anstelle dessen wurde eine zu Stäben aufgelöste Konstruktion gewählt, welche in den Verbindungspunkten vor allem Normalkräfte übertragen müssen. Anstelle von Stabdübeln, die im Falle plastischer Verformungen nur zerstörend lösbar sind, werden vorgespannte Verbindungen und Treppenversätze umgesetzt. Die hochbeanspruchten Knotenpunkte bestehen aus KP-Elementen.

Die einzelnen Stäbe werden mittels Schubnocken unverschieblich mit den Knotenpunkten „verzahnt“. Damit diese Verbindung auch bei hohen Lasten erhalten bleibt, werden Stäbe und Knoten mittels Gewindestangen vorgespannt verbunden. Im Stab wird die Vorspannkraft mittels Quadratbolzen (50 mm/50 mm) übertragen. Zum Stabende wurde eine Vorholzlänge von 30 cm vorgesehen.



Abbildung 7.2 Knotenelement mit formschlüssigen Anschlüssen aus Kunstharzpressholz (links), aufgelöste Rahmenecke (rechts) [31]

Kontaktverbinder [32]

Eine besondere Herausforderung im Kontext der Kreislauffähigkeit im Holzbau stellt der Umgang mit duktilen Bereichen dar. Im Fall von Erdbebeneinwirkungen wird im Holzbau das Ziel der Energiedissipation in Verbindungsmitteln und damit die Reduktion der Beanspruchung auf die Holzbauteile angestrebt. Die Energiedissipation soll durch Biegeverformungen der Verbindungsmittel erzielt werden [21]. Diese Verkrümmung der Stabachse führt jedoch zu Nachteilen in der Kreislauffähigkeit. Aus diesem Grund sind Alternativen zu klassischen

stiftförmigen Verbindungsmitteln von besonderem Interesse. Eine Möglichkeit stellen metallische Kontaktverbinder dar.

Schmidt untersuchte in seiner Arbeit unterschiedliche Möglichkeiten von Schubverbindern/Kontaktverbindern für die CLT-Bauweise. Als Kontaktverbindungen bezeichnet er klebstofffreie mechanische Verbindungen, die primär dafür ausgelegt sind, fugenparallele Kräfte in Scheibenebene über die Schmalseitenfuge von einem BSP-Element auf das benachbarte BSP-Element zu übertragen. Dabei ist eine Variante im Kontext der Kreislauffähigkeit besonders hervorzuheben: eine Stahlblechverbindung mit spezieller Aussparung des CLT-Elements. Diese Verbindung zeigt ein deutlich duktileres Verhalten, während die Lösbarkeit und die Möglichkeit des Elementtausches erhalten bleibt. Diese Eigenschaft wird dadurch möglich, dass der benötigte Verformungsraum zur Energiedissipation von vorneherein in der Konzeption berücksichtigt wurde. Bei geeigneter Abstimmung der Tragfähigkeit des Stahlblechs, der Einbindeläge im CLT-Element sowie dessen Festigkeiten, kann die Biegeverformung des Kontaktverbinders ohne bleibende plastische Verformungen in den Wandelementen erfolgen. Dieses Konzept ist eines der wenigen, welches in der trennbaren Fuge auf zwei unterschiedliche Materialien setzt (Holz, Stahl).

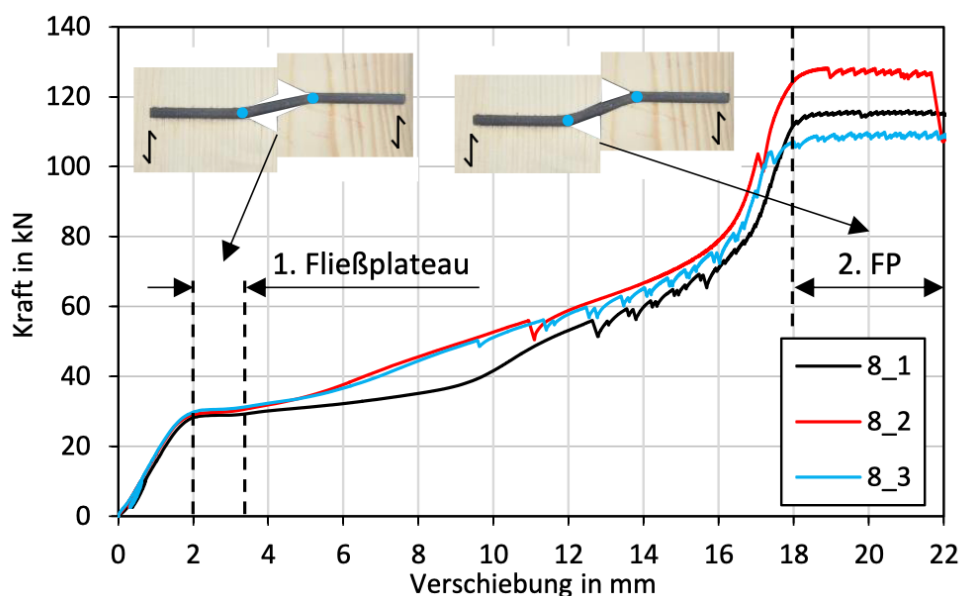


Abbildung 7.3 Last-Verschiebungskurven mit typischem Versagensbild eines Kontaktverbinders [32]

UFP-Verbinder [33]

Ein ähnliches Konzept verfolgen U-shape Flexural Plate-Verbinder (UFP-Verbinder). Diese werden klassisch zur Übertragung von Scherkräften zwischen zwei Elementen in einer Ebene angewandt und sind so konzipiert, dass ein Verformungsraum von Beginn an zur Verfügung steht. Die Steifigkeit des Verbinders lässt sich über Materialwahl und Geometrie (Länge, Radius, Dicke) gut an den Einsatzzweck abstimmen. Die Verbinder werden in der Fuge zwischen flächigen CLT-Wänden oder auch in den Knotenpunkten von Aussteifungsverbänden eingesetzt. Die Lasteinleitung in das Holz-Element erfolgt meist nicht direkt mittels Schrauben, sondern über eine Zwischenplatte aus Stahl. Diese Platte kann beispielsweise mittels VGS-Schrauben mit dem Holzelement „dauerhaft“ verbunden werden. Auch in diesem Konzept wird die trennbare Fuge zwischen zwei metallischen Elementen hergestellt.



Abbildung 7.4 UFP-Verbinder (links) [33], UFP-Verbinder im eingebauten Zustand im Projekt Scion Hub [34]

Structurecraft Dämpfer [35]

In Regionen mit hoher Erdbebenbelastung stellen Dissipations-/Dämpfungssysteme einen essentiellen Bestandteil im Holzbau dar. Die Energieumwandlung kann als Alternative zur plastischen Biegeverformung auch durch Reibung erfolgen. Mit diesem Konzept entwickelte Fast + Epp einen resilienten Gleitreibungsdämpfer (Resilient Slip Friction Joint Device – RSFJ). Dieser besteht aus einer geteilten zentralen Platte mit Hoch- und Tiefpunkten sowie zwei Platten mit ergänzender Oberfläche, die mittels Bolzen und Tellerfedern zusammengepresst werden. Bei Zugbeanspruchung werden die zentralen Platten auseinander gezogen, wodurch die Tellerfedern aktiviert werden. Durch Reibungskräfte kann die Energiedissipation erfolgen.

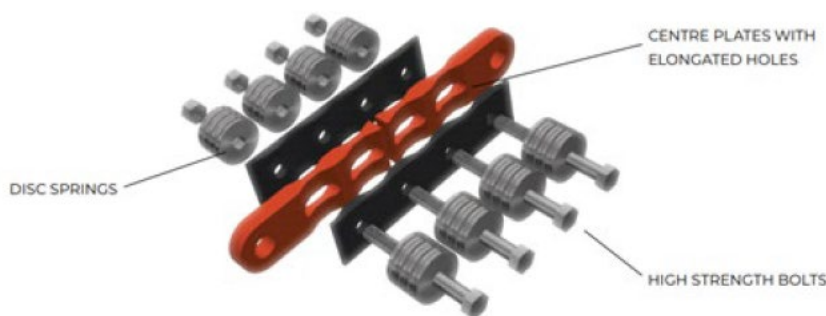


Abbildung 7.5 Explosionsdarstellung des Dämpfer Systems [35]

Ringverbinder [36]

Stabförmige Verbindungsmittel mit vollflächigem Querschnitt stellen den heutigen Stand der Technik dar. Diese werden meist durch Biegemomente beansprucht, welche zu plastischen Verformungen führen können. Die Verkrümmung der Stabachse ist aber immer an eine Deformation der umliegenden Holzmatrix geknüpft. Diese Form der Energiedissipation ist damit an eine Beschädigung des umgebenden Holzes geknüpft.

Bei stabförmigen Elementen mit hohlem Querschnitt kann der Hohlraum zur Energiedissipation herangezogen werden. Damit bleibt die Holzmatrix unbeschädigt. Dieses Konzept hat Schneider et al 2018 in Form eines Ringverbinders als Ersatz von Zugankern eingesetzt. Die entstehenden Zugkräfte in der Fuge zwischen Wand und Decke werden in eine Druckbeanspruchung mittels Ringverbinder umgewandelt.

Erste Versuchsreihen zeigten jedoch eine vergleichsweise geringe elastische Grenztragfähigkeit zwischen 30kN – 50kN (traditionelle Zuganker im Bereich von 120kN).

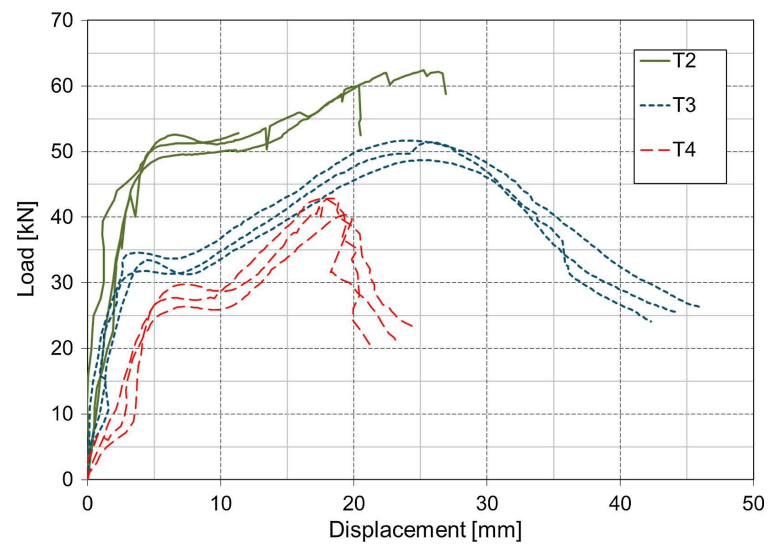
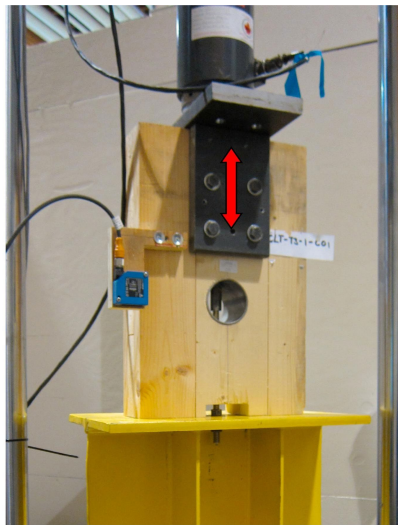


Abbildung 7.6 Foto des Versuchsaufbaus (links), Kraft-Verschiebungsdiagramm der unterschiedlichen Ringtypen (T2, T3, T4) (rechts) [36]

8 Ergebnisse

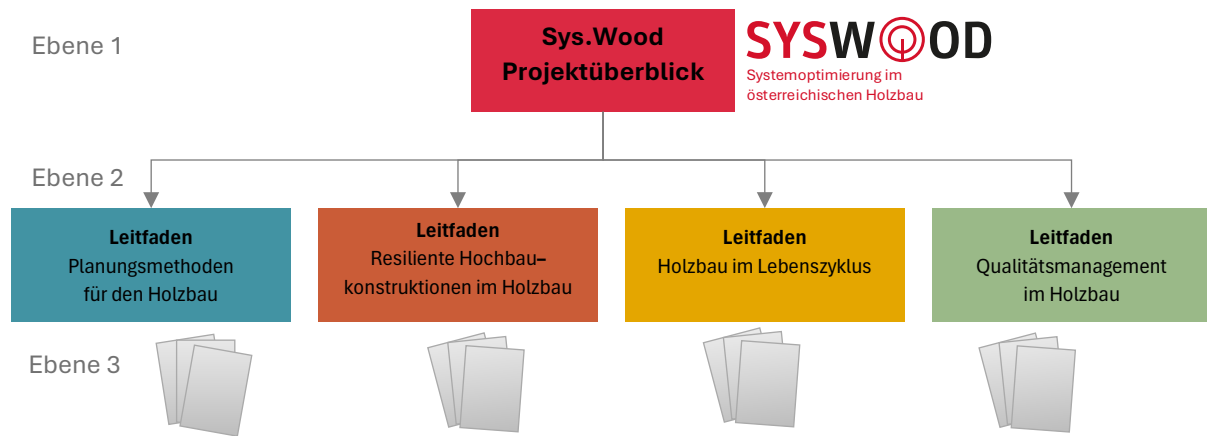
Zusammenfassend zeigt sich, dass die Anforderungen, die durch die Kreislaufwirtschaft entstehen in allen Bereichen neue Strategien erfordern. u. a. folgende:

- Planer
 - Ein neuer Umgang mit duktilem Tragwerksverhalten. Reversible Verbindungen sollten im Allgemeinen im elastischen Bereich bleiben, da die Verbindungsmittel sonst in vielen Fällen plastische Verformungen aufweisen und die Demontage so erschweren. Capacity Design mit austauschbaren Fuse-Elementen (Überkapazitätselemente) bezeichnet ein Entwurfskonzept, bei dem plastische Verformungen gezielt in definierten, ersetzbaren Verbindungselementen konzentriert werden, während die tragenden Holzbauteile im elastischen Bereich verbleiben und somit für weitere Nutzungszyklen erhalten bleiben [37]. Die duktilen Elemente sollten ebenfalls austauschbar geplant werden (z. B. Dissipatoren aus Gummi, U-shaped flexural Plates (UFPs), Gleitreibungsverbindungen etc.)
 - Scherbeanspruchte Verbindungen sollten entweder für den elastischen Bereich dimensioniert werden oder es sollten entsprechende Räume zur plastischen Verformung vorgesehen werden (z. B. UFP-Verbinder)
 - Schrauben in Fügungen sollten möglichst axial beansprucht werden (z. B. durch geneigte oder radiale Anordnung), da bei axialer Beanspruchung in der Regel höhere Tragfähigkeiten sowie ein günstigeres, überwiegend duktiler Versagensverhalten erzielt werden. Gleichzeitig ist die Einbindelänge zu begrenzen [28]. Bei großen Einbindelängen (ab etwa 200 mm bis 300 mm) kann der Herauszieh Widerstand infolge der zunehmenden Verzahnung und Adhäsion zwischen Gewindeflanken und der ligninreichen Holzmatrix stark ansteigen. In diesem Fall wird die Tragfähigkeit nicht mehr durch das Versagen im Holz, sondern durch die Stahltragfähigkeit begrenzt, sodass es zu einem spröden Versagen durch Abreißen des Schraubenkopfes oder des Schraubenschaftes kommen kann.
- Hersteller:
 - Durch eine Reduktion der erforderlichen Anzahl an Schrauben kann die Kreislauffähigkeit gefördert werden
 - Reibungs-, Kriech- und Haltbarkeitsprobleme wie Korrosion können die Demontage beeinträchtigen und müssen bereits in der Planung berücksichtigt werden.
- Ausführung:
 - Formschlüssige Verbindungen weisen grundsätzlich eine hohe Kreislauffähigkeit auf. Diese Fügungsart erfordert jedoch eine passgenaue Herstellung und lässt praktisch keine Bauleranzen zu. Die Bauleranzen können durch reine Bauweisen (z.B. nur Holz) und einen hohen Vorfertigungsgrad gefördert werden

9 Literaturverzeichnis

- [1] Archer, D. et al., 2009. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26 01.
- [2] Masson-Delmotte, V. et al., 2021. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, p. 2391 pp..
- [3] Bundeswaldinventur, 2022. *Waldinventur zeigt Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wälder*. [Online]
Available at: <https://www.bmluk.gv.at/themen/wald/wald-in-oesterreich/wald-und-zahlen/oesterreichswaldinzeitendesklimawandels.html>
- [4] [J. Koppelhuber](#) et al.: **Holzbauanteil Mehrgeschoßiger Holzwohnbau in Österreich 2008 – 2019: Gesamtergebnisse Österreich und Bundesländer**, Ausgabe: Open Access E-Book, ISBN: 978-3-99161-003-8, Mai 2024. Forschungsreihe IBBW, Band 7, <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-99161-002-1>
- [5] Sys.Wood: Ökologische Bewertung, Hintergrunddokumentation Alireza Fadaei, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_lca
- [6] J. Prünner, "Kreislauffähige Verbindungen im Holzbau: FE-Modellierung vorgespannter BSP-Wände," Masterarbeit. TU Wien: 2025
- [7] Bernhardt, A. et al., 2025. *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich; Statusbericht 2025 für das Referenzjahr 2023.*, s.l.: s.n.
- [8] A. Borisov, L. Penz: *The Wood – Boutique Hotel Vienna*. Projektarbeit. TU Wien. 2025
- [9] T. Kroboth, P. Schandl: *WOODIE Hamburg*. Projektarbeit. TU Wien. 2025
- [10] Stingl, R. et al 2011. *Holzbauanteil in Österreich. Statistische Erhebung von Hochbauvorhaben.*, Wien: proHolz Austria
- [11] Brunner, R. et al., 2023. *Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten*, Zürich: Lignum Holzwirtschaft Schweiz.
- [12] Graf, J. et al., 2024. Legitimation der kreislaueffektiven Holzbauweise – Nachweis der Klimaschutzwirkung. *Holzbau*, 23 06, Band Volume 101, Issue 52, pp. 64-73.
- [13] Koppelhuber et al. (2024): Leitfaden – Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau. Koppelhuber² und Partner im Auftrag der Holzindustrie Österreich.
- [14] G. Flatscher et al (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur. J. Wood Prod.* (2016) 74:331–351, DOI 10.1007/s00107-015-0999-5
- [15] Fast + Epp: The Hive – a timber-braced frame, naturally. [online] <https://www.fastepp.com/portfolio/2150-keith-drive/>
- [16] FprEN 1995-1-1 N 2259: Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN. April 2025.
- [17] A. Aloisio et al.: The role of the hold-down in the capacity model of LTF and CLT shear walls based on the experimental lateral response, *Construction and Building Materials*, Volume 289, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123046>.
- [18] C. Sandhaas: KARLSRUHER TAGE 2024 HOLZBAU Forschung für die Praxis, Oktober 2024
- [19] Pro:Holz: Zuschnitt 11: Rein ins Holz – Schraube oder Nagel, Nr. 11, September 2003, ISSN 1608-9642
- [20] Z. Yan et al.: Influence of wet-dry cycles on the withdrawal capacity and corrosion of zinc electroplated self-tapping screws in CCA-treated and untreated Southern pine, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 19, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02429>.
- [21] prEN 1998-1-2: Eurocode 8 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Teil 1-2: Hochbauten. CEN. Oktober 2023
- [22] J. Graf et al.: Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen.

- [23] Silva, C et al (2016). *The influences of moisture content variation, number and width of gaps on the withdrawal resistance of self-tapping screws inserted in cross laminated timber*. Construction and Building Materials, 125, 1205–1215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.008.
- [24] Nürnberger, K. (1995): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen.
- [25] Nguyen, M.N., Leicester, R.H., Wang, C.-H. & Foliente, G.C. Corrosion effects in the structural design of metal fasteners for timber construction. Structure and Infrastructure Engineering, 9(3), 275–284, 2013.
- [26] Rotho Blaas, ETA-23/0813 for Rotho Blaas WHT Hold Downs, ETA-Danmark A/S, April 2026
- [27] Simpson Strong-Tie, ETA-07/0285 for Hold Downs & Post Bases, ETA Danmark A/S, November 2025
- [28] Wandelbarer Holzhybrid für differenzierte Ausbaustufen, Technische Universität Kaiserslautern, DOI:10.13140/RG.2.2.34197.81120
- [29] Stadel F. (1904): Die Holzkonstruktion
- [30] Graf, J. et al (2022), Kreislauffeffektive Bauweise – Auf dem Weg zu einer neuen Tektonik. Bautechnik, 99: 76-84. <https://doi.org/10.1002/bate.202100111>
- [31] t-la – Holzarchitektur und Holzwerkstoffe: Campus Diemerstein. [Online]: <https://tlab.architektur.rptu.de/campus-diemerstein>
- [32] Schmidt, Tobias. 2018. Kontaktverbindungen für aussteifende Scheiben aus Brettspertholz. Band 33 aus Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). DOI: 10.5445/KSP/1000083480
- [33] M. Habibabadi et al.: Effects of geometric characteristics of U-shaped flexural plates on their cyclic performance, Structures, Volume 51, 2023, Pages 351-371, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.016>.
- [34] RTA Studio: Scion Innovation Hub. [Online]: <https://rtastudio.co.nz/portfolio/scion-innovation-hub-te-whare-nui-o-tuteata>
- [35] Jackson, R., 2025. The Hive: A 10-Story Timber Structure with Seismic Dampers in Vancouver. Innsbruck, Austria, s.n.
- [36] J. Schneider et al.: Experimental assessment of a novel steel tube connector in cross-laminated timber, Engineering Structures, Volume 177, 2018, Pages 283-290, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.058>.
- [37] Lisa-Mareike Ottenhaus, Zidi Yan, Reinhard Brandner, Paola Leardini, Gerhard Fink, Robert Jockwer: Design for adaptability, disassembly and reuse – A review of reversible timber connection systems, Construction and Building Materials, Volume 400, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132823>.



Systemoptimierung im österreichischen Holzbau Sys.Wood Projektüberblick und Ergebnisse

Ernst Alexander Dengg, Alireza Fadaei, Alexander Gerger, Benjamin Kromoser, Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Marc Pantscharowitsch, Katharina Schachner, Phillip Süß, Marius Valente, Markus Wallner-Novak, Johannes Würzler (in alphabetischer Reihenfolge)

DOI: <https://doi.org/10.60588/2p3j-9655>

ISBN print: 978-3-903318-66-3

ISBN eBook: 978-3-903318-67-0

Sys.Wood: Planungsmethoden für den Holzbau, Leitfaden

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

DOI: <https://doi.org/10.60588/06k6-0x54>

Sys.Wood: BIM-Übergabe Mock-Ups, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bim-mockups

Sys.Wood: Best Practice Beispiel Bauteilkatalog, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpractice-bauteilkatalog

Sys.Wood: Allgemeines Prozesskettenmodell Holzbau

Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Phillip Süß, Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_prozesskettenmodell

Sys.Wood: Resiliente Hochbaukonstruktionen im Holzbau, Leitfaden

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

DOI: <https://doi.org/10.60588/mbeb-z771>

Sys.Wood: FMEA-Bewertungen, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_ergebnisse_fmea-bewertungen

Sys.Wood: Bauteilaufbauten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bauteilaufbauten

Sys.Wood: Detailkatalog, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_detailkatalog

Sys.Wood: Checklisten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_checklisten_anschlussdetails

Sys.Wood: Best-Practice-Beispiele, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_best-practice-beispiele

Sys.Wood: FMEA - Bewertungsmatrix, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_bewertungsmatrix

Sys.Wood: FMEA - Kriterienkataloge, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_kriterienkataloge

Sys.Wood: Dos & Don'ts, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_dos&donts_planung

Sys.Wood: Holzbau im Lebenszyklus, Leitfaden

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

DOI: <https://doi.org/10.60588/rw1-r893>

Sys.Wood: Wartungshandbuch Mieter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_mieter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Verwalter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_verwalter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Ausführende, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_ausfuehrende

Sys.Wood: Best Practice Kreislaufwirtschaft, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Fabian Ulrych, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpracticekreislauf

Sys.Wood: Ökologische Bewertung, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_lca

Sys.Wood: Zerlegbare Verbindungen im Holzbau, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin Prünner, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_zerlegbare_verbindungen

Sys.Wood: Vertikal Vorgespannte Wandelemente, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin, Prünner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_vorspannung

Sys.Wood: Qualitätsmanagement im Holzbau, Leitfaden

Nadine Ladstätter, Phillip Süß, Gottfried Mauerhofer

DOI: <https://doi.org/10.60588/tzwz-1455>

ISBN eBook: 978-3-903318-71-7