

## Forschungsbericht

**Erhebung der Kreislauffähigkeit von aktuellen Verbindungsmitteltypen  
im konstruktiven Holzbau und notwendige Weiterentwicklungen**

**In Auftrag gegeben von:**  
Fachverband der Holzindustrie  
Schwarzenbergplatz 4  
1030 Wien

**Ausgearbeitet von:**

Universität für Bodenkultur Wien

Univ. Prof. Dr. Benjamin Kromoser

Dipl.-Ing. Dr.techn. Sara Reichenbach

Ingrid Camargo, MSc

Johann Hölzl

Institut für Hochbau, Holzbau und kreislaufgerechtes Bauen (IHB)

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Peter-Jordan-Straße 82, Wilhelm-Exner-Haus, DG

1190 Wien

Die vorliegende Publikation dient als Kommunikationshilfe, um Orientierung im komplexen Themenfeld „Zirkularer Holzbau“ zu geben und präsentiert einen ersten Entwurf für ein mögliches Bewertungssystem zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials von Verbindungen im Holzbau der als Basis für eine detailliertere Entwicklung dienen soll.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Kurzfassung .....	5
Abstract.....	5
0 Präambel.....	6
1 Theoretischer Hintergrund.....	9
1.1 Kreislaufwirtschaft im Holzbau .....	9
1.2 Verbindungen im konstruktiven Holzbau .....	13
1.2.1 Geklebte Holzverbindungen .....	14
1.2.2 Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln .....	15
1.2.3 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen .....	19
2 Methodik .....	21
2.1 Vorgehensweise.....	21
2.1.1 Schritt 1: Systematische Literaturrecherche .....	21
2.1.2 Schritt 2: Analyse von unterschiedlichen Bewertungsmethoden.....	22
2.1.3 Schritt 3: Entwicklung der Bewertungsmethodik.....	23
2.1.4 Schritt 4: Testbewertung von ausgewählten Beispielverbindungen .....	23
3 Indikatoren zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Verbindungen im Holzbau .....	24
3.1 Bewertungsmethodik.....	24
3.2 Detaillierte Beschreibung der Indikatoren .....	24
3.2.1 Indikator: V.1 – Anzahl der Elemente .....	25
3.2.2 Indikator: V.2 – Komplexität.....	26
3.2.3 Indikator: V.3 – Vorfertigungsgrad .....	27
3.2.4 Indikator: V.4 – Montagefreundlichkeit .....	28
3.2.5 Indikator: V.5 – Freiheitsgrade .....	29
3.2.6 Indikator: V.6 – Robustheit .....	30
3.2.7 Indikator: V.7 – Schutz der Verbindung .....	31
3.2.8 Indikator: V.8 – Demontierbarkeit .....	32
3.2.9 Indikator: V.9 – Nicht wiederverwendbare Baukomponenten.....	33

3.2.10	Indikator: V.10 – Wiederverwendbarkeit .....	34
4	Ergebnisse der Bewertung ausgewählter Verbindungen .....	35
4.1.1	Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln .....	35
4.1.2	Zimmermannsmäßige Holzverbindungen .....	41
4.1.3	Analyse und Diskussion der Ergebnisse .....	45
5	Fazit .....	49
6	Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise .....	50
Anhang	.....	51
	Holzschraubenverbindung .....	51
	Gestellschraubenverbindung .....	52
	Nagelplattenverbindung .....	53
	Passbolzenverbindung .....	54
	Passverbindung mit Zugstange .....	55
	Balkenschuhverbindung .....	56
	Balkenträgerverbindung .....	57
	GSA-LMV-Verbindung .....	58
	Holzsystemverbindung .....	59
	Stützenfußverbindung .....	60
	X-Rad Verbindung .....	61
	Zuganker- / Winkelverbindung .....	62
	Holznagelverbindung .....	63
	Schlitz- und Zapfenverbindung .....	64
	Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung .....	65
	Stirnversatzverbindung .....	66
	Überblattungsverbindung .....	67
	X-Fix L-Verbindung .....	68
	Abbildungsverzeichnis .....	69
	Tabellenverzeichnis .....	71
	Literaturverzeichnis .....	72

## **Kurzfassung**

Die hier zusammengefasste Kurzstudie befasst sich mit der Kreislaufwirtschaft im konstruktiven Holzbau, wobei der Schwerpunkt auf den verwendeten Verbindungen liegt. Die Einleitung bietet einen Überblick über die Grundlagen der Kreislaufwirtschaft sowie den Stand der Technik in Bezug auf Verbindungen. Die Methodik zur Entwicklung der Bewertungsmethode wird beschrieben, gefolgt von einer detaillierten Darstellung der Bewertungsindikatoren. Zur Verifizierung der Bewertungsmethode derzeit gängige Verbindungsmittel bewertet, mit besonderen Fokus auf metallische Verbindungsmitteln und zimmermannsmäßigen Verbindungen. Das vorgestellte Bewertungssystem stellt einen ersten Entwurf dar und es muss den Benutzer\*innen bewusst sein, dass sie Bewertung nach momentanem Entwicklungsstand noch subjektiv und stark vom Wissenstand des/der Bewerter/Bewerterin abhängig ist. Abschließend werden die nächsten Schritte sowie der Fahrplan für die erforderlichen Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung des Bewertungssystem diskutiert.

## **Abstract**

The presented study addresses the circular economy in structural timber construction, focusing on the connections used. The introduction explains the basics of the circular economy and the state of the art of timber connections. The methodology for developing the evaluation method is described, followed by a detailed presentation of the evaluation indicators. To verify the evaluation method, currently used connections are assessed, focusing on engineering and carpentry executions. The presented evaluation system is a first draft, and users should be aware that the evaluation is, according to the current state of development, subjective and heavily dependent on the evaluator's knowledge. Finally, the next steps and the roadmap for the necessary research to further develop the evaluation system are discussed.

## 0 Präambel

Das Ziel dieser vom Fachverband der Holzindustrie beauftragten Kurzstudie ist es, den aktuellen Wissensstand zum Thema Reuse und Recycling im konstruktiven Holzbau mit Fokus auf Verbindungen zusammenzustellen sowie die Kreislauffähigkeit der unterschiedlichen Verbindungsmittel zu bewerten und notwendige Weiterentwicklungen aufzuzeigen, um die Kreislauffähigkeit zu erhöhen.

Beauftragt wurde die Erhebung von relevanten Bauteilen, Bauprozessen und Verbindungsmitteln im konstruktiven Holzbau. Zudem sollten Bewertungskriterien zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit entwickelt werden. Diese Kriterien sollten anschließend genutzt werden, um sowohl in der Vergangenheit als auch aktuell verwendete Verbindungsmittel zu bewerten.

Der präsentierte erste Entwurf der ausgearbeiteten Bewertungsmethode basiert einerseits auf Methoden aus der Literatur andererseits auf einer Weiterentwicklung bzw. Forschungsarbeit der Autor\*innen. Es wurde auch ein Bezug zu Vorprojekten, mit Relevanz im Themenfeld hergestellt. Hervorzuheben ist hier beispielsweise das im Auftrag der Stadt Wien bearbeitete Projekt ZiFa 1.0, das die Entwicklung eines umfassenden Bewertungssystems für die Kreislauffähigkeit von Gebäuden beinhaltet. Mit Hilfe des Bewertungssystems können Neubauten und auch Sanierungen bewertet werden. Bei diesem System werden sowohl qualitative als auch quantitative Ansätze verwendet. Mit Hilfe von acht kumulativen Indikatoren und den dazugehörigen Subindikatoren kann ein Bauwerk umfassend und gesamtheitlich hinsichtlich dessen Kreislauffähigkeit bewertet werden. Die Indikatoren des ZiFa 1.0 basieren auf den Grundlagen der EU-Abfallhierarchie und sind anhand von verschiedenen Schlüsselaspekten der Kreislaufwirtschaft eines Gebäudes strukturiert. Die Abhängigkeit der Indikatoren von der Abfallhierarchie sind in Abbildung 1 dargestellt.

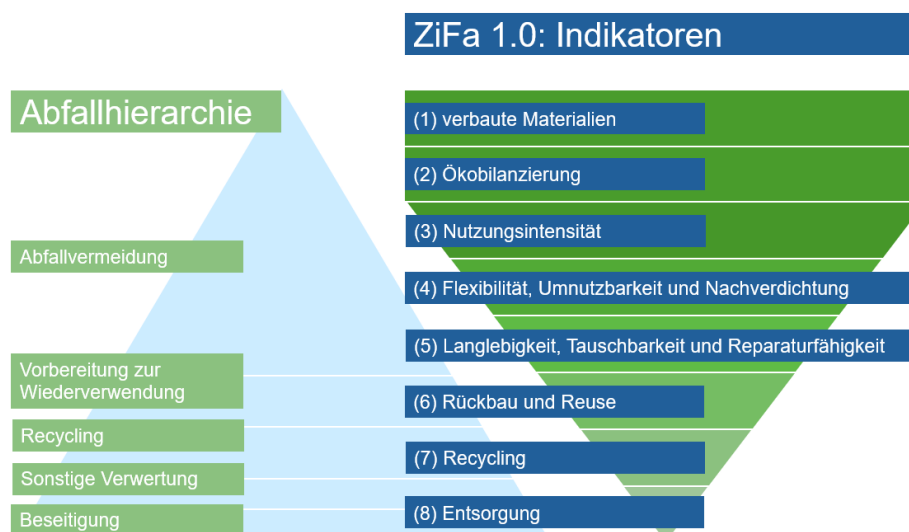


Abbildung 1: Übersicht des ZiFa 1.0 Bewertungssystems - Orientierung der Indikatoren an der EU-Abfallrahmenrichtlinie

Der Indikator (1) *verbaute Materialien* bewertet die in einem Gebäude verwendeten Materialien, wobei zwischen Primärrohstoffen und Sekundärmaterialien aus Wiederverwendung oder Recycling unterschieden wird, und schließt die Wiederverwendung bestehender Strukturen und des Bodenaushubs ein. Zur Bewertung der Umweltauswirkungen wird eine (2) *Ökobilanzierung* durchgeführt, die sich auf vereinfachte Lebenszyklusphasen (A1-A3, C3, C4) und, aufgrund der begrenzten Datenlage, speziell auf das Treibhauspotenzial (GWP) konzentriert. Weitere Indikatoren betreffen die (3) *Nutzungsintensität* mit dem Ziel, die Belegung und Nutzung zu optimieren, um den Rohstoff- und Energieverbrauch zu minimieren, sowie die (4) *Flexibilität, Umnutzbarkeit und Nachverdichtung* mit der Leitidee, dass eine flexible Gestaltung von Gebäuden eine längere Nutzungszeit ohne große bauliche Maßnahmen und somit mit einfacher Anpassung an geänderte Nutzer\*innenanforderungen ermöglicht. Der kumulierte Indikator (5) *Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Tauschbarkeit* bewertet, ob ein Gebäude und insbesondere die haustechnischen Systeme so konzipiert sind, dass eine lange Nutzung/Lebensdauer möglich ist und allfällige Reparaturen oder Erneuerungen von schadhaften oder veralteten Systemen ermöglicht bzw. erleichtert werden. Im kumulierten Indikator (6) *Rückbau und Reuse* wird bewertet, ob die verwendeten Bauelemente und -materialien bspw. rückgebaut und einfach wiederverwendet werden können. Der kumulierte Indikator (7) *Recycling* beurteilt, ob das eingebaute Material am Ende seiner Lebensdauer recycelt werden kann. Im kumulierten Indikator (8) *Entsorgung* wird bewertet, wie viel Material deponiert werden muss bzw. ob eine thermische Behandlung/Verwertung möglich oder notwendig ist. Dieser Indikator bzw. Verwertungsweg ist folglich als Nicht-Ziel anzusehen, da eine Wiederverwendung oder ein Recycling (in dieser Reihenfolge) jedenfalls zu bevorzugen sind.

In diesem Zusammenhang legt das vorgeschlagene Bewertungssystem für die Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau den Schwerpunkt auf Indikator (6) *Rückbau und Wiederverwendung (Reuse)*. Mit diesem Indikator wird bewertet, ob Gebäudekomponenten und -materialien so konzipiert sind, dass sie einen effizienten Rückbau und eine Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes ermöglichen. Das System steht im Einklang mit den Abfallrichtlinien, die der Wiederverwendung, aufgrund der erheblichen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile, Vorrang vor dem Recycling einräumen. Im Gegensatz zum Recycling, bei dem Materialien in neue Produkte umgewandelt werden, bewahrt die Wiederverwendung die graue Energie, reduziert den Bedarf an neuen Rohstoffen und minimiert die Abfallmenge.

Um das Wiederverwendungspotenzial zu erhöhen, sollten Gebäude von vornherein mit Blick auf den Rückbau entsprechend konzipiert werden. Dazu gehört die Auswahl langlebiger und standardisierter Materialien, die Bereitstellung klarer und umfassender Montage- und Demontageanleitungen wie auch die Integration von Verbindungen, die eine einfache

Trennung der Komponenten ermöglichen und auch wieder eingesetzt werden können. All diese Kriterien beeinflussen die Durchführbarkeit und Effizienz des Rückbaus des Gebäudes erheblich und wirken sich positiv auf die Kreislaufwirtschaft aus.

Da es sich bei der präsentierten Kurzstudie um den ersten Entwurf der Bewertungsmethodik handelt mussten klare Rahmenbedingungen gesetzt werden. Die Hauptbedingungen wurden wie folgt definiert:

- Betrachtung von zimmermannsmäßigen Verbindungen und Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln, da diese in Bezug auf Kreislauffähigkeit einen klaren Vorteil gegenüber rein geklebten Verbindungen haben.
- Fokus auf das Kreislaufpotential allgemein (ob und in welcher Form eine Kreislaufführung möglich ist). Der aktuelle rechtlichen Rahmen, der im Zuge der Transformation in Richtung einer Kreislaufwirtschaft auch adaptiert werden muss, stand dabei nicht im zentralen Fokus (z.B. Wiederverwendung von Verbindungsmitteln).
- Der Fokus wurde auf konstruktive Aspekte gerichtet.
- Es wurde ein erster Vorschlag für das System entwickelt, der eine Idee und Basis für eine detaillierte weitere Entwicklung und weitere notwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeit bieten soll.

Es ist zu beachten, dass derartige Bewertungssysteme (auch Gebäudebewertungssysteme) grundsätzlich sehr subjektiv und vom Bewertenden abhängig sind. Zwar wurde durch definierte Bewertungsskalen wie auch -gewichtung versucht, die Bewertungen zu normieren, dennoch konnten teilweise keine klaren Abgrenzungen zwischen den verschiedenen Bewertungsnoten erreicht werden. Mit einer weiterführenden Entwicklung könnte diesem Problem mit einer noch detaillierteren Beschreibung der Indikatoren Rechnung getragen werden. Die Beurteilung hängt auch sehr stark vom vorhandenen Fachwissen und der jeweiligen Ausbildung ab. Für eine realistische Einschätzung ist einerseits eine genaue Kenntnis des Beurteilungssystems und andererseits umfassendes Fachwissen im Holzbau notwendig. Dies betrifft die Planung, jedoch insbesondere die Ausführung.

Alle Schritte der Entwicklung des Bewertungssystems werden beschrieben gefolgt von einer Analyse relevanter Verbindungen. Daraus konnten dann die nächsten Schritte definiert und ein Fahrplan für erforderliche Forschungsarbeiten präsentiert werden.

# 1 Theoretischer Hintergrund

## 1.1 Kreislaufwirtschaft im Holzbau

Im Jahr 2022 betrug das Abfallaufkommen in Österreich rund 73,9 Mio. Tonnen. Den größten Anteil daran hatte Aushubmaterial mit 59 % (43,8 Mio. Tonnen), gefolgt von Bau- und Abbruchtätigkeiten mit 16 % (11,5 Mio. Tonnen). Entfernt man das Aushubmaterialien aus der Berechnung, steigt der Anteil der Bau- und Abbruchabfälle auf etwa 38 % [1]. Diese Verteilung verdeutlicht das Einsparpotenzial bzw. zeigt die mögliche Reduktion der Abfallmengen auf, die durch ein durchdachtes Reuse- und Recycling entstehen. Eine detaillierte Verteilung der Abfallkategorien laut [1] ist in Abbildung 2 dargestellt.

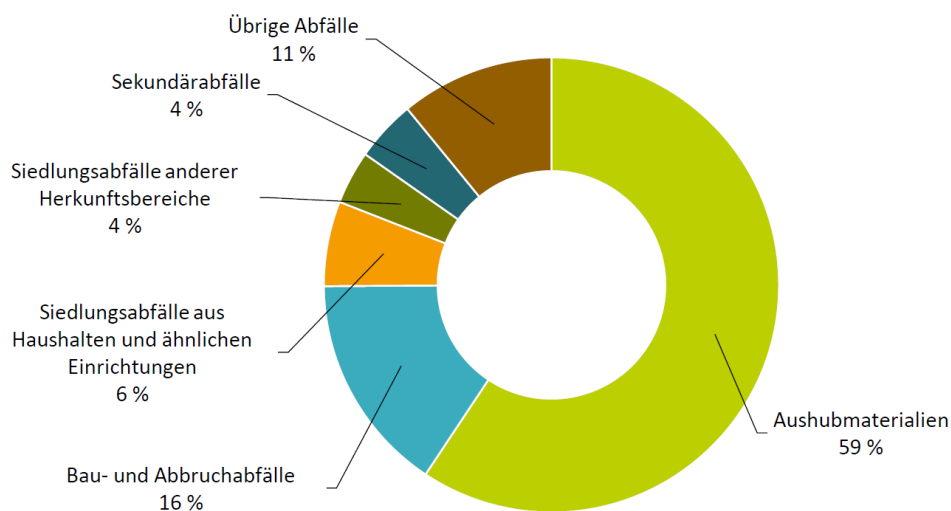


Abbildung 2: Österreichische Abfallverteilung nach Kategorien aus dem Jahr 2022 [%]; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)

Betrachtet man die Statistik der Holzabfälle, die mit 1,14 Mio. Tonnen 4 % des Gesamtabfallaufkommens ausmachen, so zeigt sich, dass Bau- und Abbruchholz etwa 45 % davon (ca. 0,51 Millionen Tonnen) ausmachen [1]. Zum Vergleich: Diese Menge übersteigt die Masse des verbauten Materials im Burj Khalifa, dem höchsten Gebäude der Welt, dessen Rohbau 0,50 Mio. Tonnen wiegt. Kann das Material im Kreislauf gehalten werden, so bleibt auch das im Zuge des Wachstums der Bäume aufgenommene CO<sub>2</sub> temporär gespeichert. Je höherwertig die Nutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass weitere Reuse- bzw. Recyclingzyklen ermöglicht werden. Je länger die Nutzungsdauer in einem Lebenszyklus ist, desto länger bleibt das CO<sub>2</sub> gespeichert (Bauteile haben eine vergleichsweise lange Lebensdauer). Eine detaillierte Aufschlüsselung der Holzabfälle in den jeweiligen Kategorien laut [1] ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Aufkommen der Holzabfälle in Österreich 2022, Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)

SN	ABFALLBEZEICHNUNG	AUFKOMMEN [t]
17101	Rinde aus der Be- und Verarbeitung	28.100
17103	Sägemehl und Sägespäne aus naturbelassenem, sauberem, unbeschichtetem Holz	86.000
17104 3	Holzschleifstäube und -schlämme, behandeltes Holz, schadstofffrei	22.500
17114	Staub und Schlamm aus der Spanplattenherstellung	64.000
17115	Spanplattenabfälle	31.100
17201	Holzballagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt	165.500
17201 1	Holzballagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt, behandeltes Holz	12.400
17201 2	Holzballagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt, ausschließlich mechanisch behandeltes Holz	34.300
17201 3	Holzballagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt, behandeltes Holz, schadstofffrei	4.100
17201 4	Holzballagen und Holzabfälle, nicht verunreinigt, Altholz stofflich	112.100
17202	Bau- und Abbruchholz	295.500
17202 1	Bau- und Abbruchholz, behandeltes Holz	75.700
17202 2	Bau- und Abbruchholz, nachw. ausschl. mechanisch behandeltes Holz	6.100
17202 3	Bau- und Abbruchholz, behandeltes Holz, schadstofffrei	30.500
17202 4	Bau- und Abbruchholz, Altholz stofflich	106.200
17207 g	Eisenbahnschwellen	26.600
17218	Holzabfälle, organisch behandelt (z. B. ausgehärtete Lacke, organische Beschichtungen)	27.900
-	Sonstige Holzabfälle (z. B. Sägemehl und -späne, durch organische bzw. anorganische Chemikalien verunreinigt; Pfähle und Masten, teerölimprägniert, Holzballagen, Holzabfälle und Holzwolle, durch organische Chemikalien verunreinigt, Holzschleifstäube und -schlämme etc.)	11.800
<b>Gesamt</b>		<b>1.140.400</b>
SN	Abfallart: Abfall Schlüssel-Nummer	

Die Analyse des Stoffstrombildes für Holzabfälle in Österreich aus dem Jahr 2022 (Abbildung 3) zeigt, dass 54% der Holzabfälle stofflich verwertet werden und weitere 17% zur thermischen Verwertung genutzt werden [1]. Dies erscheint zwar nachhaltig, entspricht jedoch nicht vollständig der Abfallhierarchie gemäß dem Abfallwirtschaftsgesetz (Abbildung 4) [2]. Um die Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit zu verbessern, sollte Österreich der Abfallvermeidung Vorrang einräumen, indem die Wiederverwendung von Holzabfällen im Bausektor ausgeweitet wird. Dieser Ansatz minimiert die mit dem Recycling und der thermischen Verwertung verbundenen Umweltauswirkungen und maximiert gleichzeitig die Ressourceneffizienz.

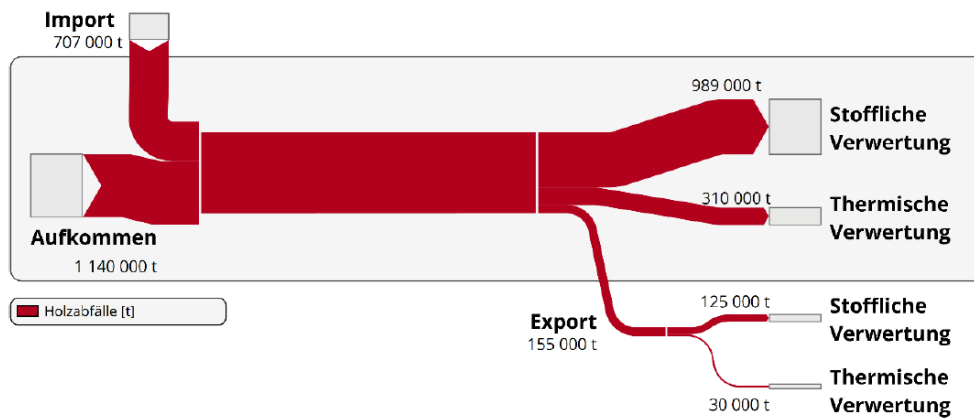


Abbildung 3: Aufkommen, Import, Export und Verbleib von Holzabfällen in Österreich, 2022; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)



Abbildung 4: Abfallhierarchie

Bevor die Vorteile der Wiederverwendung (Reuse) von Holz gegenüber dem Recycling untersucht werden, ist es essenziell, die Notwendigkeit der Vermeidung der thermischen Verwertung zu betonen. Hossain und Poon (2018) zeigen, dass das Recycling von Holzabfällen, im Vergleich zur thermischen Verwertung, die Treibhausgasemissionen um etwa 94 % und den Energieverbrauch um 70 % reduzieren kann [3]. Das führt zu verringerten Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit [4]. Risse et al. (2019) bestätigen zudem, dass Recycling nicht nur ökologisch effizienter, sondern auch kostengünstiger als die thermischen Verwertung sein kann [5].

Noch größere ökologische Vorteile bringt eine Wiederverwendung von Materialien mit sich. Wiederverwendung bedeutet die erneute Nutzung von Gebäudekomponenten mit minimalem Aufbereitungsaufwand, ohne dass umfangreiche Reparaturen oder Nachrüstungen erforderlich sind. Dieser Ansatz ist gegenüber dem Recycling vorteilhaft, da er geringere

Umweltauswirkungen und einen niedrigeren Energieverbrauch aufweist [6–9]. Dies wird von Whittaker et al. (2021) bestätigt, die die Wiederverwendung von Holzplatten analysieren und nicht nur die geringere Umweltauswirkungen aber auch Kosteneffizienz im Vergleich zu herkömmlichen Holzplatten vorweisen [10]. Des Weiteren bestätigen Niu et al. (2021), dass die Wiederverwendung von strukturellen Holzbauteilen die Umweltbelastungen erheblich reduziert [11]. Die Priorisierung der Wiederverwendung gegenüber dem Recycling und der thermischen Verwertung fördert somit die nachhaltige Bewirtschaftung von Holzabfällen und stärkt die Kreislaufwirtschaft.

Die Förderung der zunehmenden Wiederverwendung im Bauwesen wird durch kreislaforientierte Praktiken wie die Rückbauplanung begünstigt [12]. Neben der Erhaltung der grauen Energie sowie der Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs und der Abfallmenge im Vergleich zum Abriss, verringert der Rückbau den Bedarf an schwerem Gerät und minimiert Lärm- und Staubbelastung [12–16]. Dies verbessert die Sicherheit der Arbeiter und der Anwohner, indem die Exposition gegenüber Schadstoffen verringert wird [15]. Zudem fördert die Wiederverwendung von Bauteilen die Verringerung von Deponieabfällen.

Trotz dieser Vorteile können nur wenige Gebäude vollständig rückgebaut und deren Teile wiederverwendet werden. Dies liegt an einer Vielzahl wirtschaftlicher, sozialer, technologischer, ökologischer und rechtliche Herausforderungen. Dazu zählen höhere Kosten (im Vergleich zum Abbruch und Neubau), ein begrenzter Markt für Sekundärmaterialien, mangelnde politische Unterstützung, unzureichende Informationen über bestehende Materialien sowie der höhere Zeitaufwand durch zusätzliche notwendige Zwischenschritte und die Schonung der Bauteile [17–19]. Insbesondere die wirtschaftlichen Faktoren sind hier von Bedeutung [17]. Daher ist es wichtig, Baukonzepte zu entwickeln bzw. diese dann auch entsprechend in eine Planung einfließen zu lassen, die einerseits bereits verwendete Bauteile integrieren (Verwendung von Bauteilen die bereits Rückgebaut wurden oder rückgebaut werden) und auch Gebäude die neu errichtet werden, so zu planen und zu bauen, dass ein späterer Rückbau möglichst einfach von statten gehen kann und die Bauteile dann einfach, schnell und kosteneffizient wiederverwendet werden können.

Es werden bereits in diversen Studien Konzepte für den Rückbau beleuchtet, wie in dem von Crowther [12] erstellten Leitfaden, der Fallstudien von Gebäuden wie „Lloyd's of London“ analysiert, die für einen einfachen Rückbau konzipiert wurden. Die wesentlichen Aspekte der Rückbaukonzepte lassen sich in drei Kategorien unterteilen (Materialien- und Komponentenauswahl, Identifizierung und Dokumentation sowie die Verbindungen) die nun kurz erläutert werden:

- **Material- und Komponentenauswahl:** Es sollten schadstofffreie, sortenreine Materialien bevorzugt und sekundäre Oberflächenbehandlungen wie Beschichtungen

vermieden werden. Langlebige, leichte Materialien, die einfach zu handhaben sind, sowie vorgefertigte und modulare Komponenten erleichtern die Demontage [12,14,16,18,20,21].

- **Identifizierung und Dokumentation:** Eine gründliche Katalogisierung aller Baumaterialien und -komponenten sowie eine gut dokumentierte Montage- und Demontageanleitung sind entscheidend für einen reibungslosen und effizienten Rückbau [12,14,16].
- **Verbindungen:** Verbindungen spielen eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, wie Bauteile ohne Schäden demontiert werden können. Mechanische Verbindungen sind chemischen Verbindungen wie Klebstoffen vorzuziehen, da sie wiederverwendbar und langlebig sind. Die Minimierung der Anzahl der Verbindungen wie auch Bauteilen oder Verbindungsbestandteilen die in einer Verbindung zusammengefügt werden trägt zur Rationalisierung des Rückbauprozesses bei und verringert den Zeit- und Arbeitsaufwand [12,14,16–18,22,23].

Die im Zuge des Berichts vorgestellte Forschungsarbeit untersucht die im Holzbau verwendeten Verbindungen, da sie entscheidend dafür sind, wie effizient und einfach Holzkomponenten montiert und demontiert werden können und wie gut sie nach der Trennung wiederverwertbar sind. Die Wahl der Verbindungen ist daher ein Schlüsselfaktor für die Kreislauffähigkeit des Holzbaus, da sie die Demontage und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen maßgeblich beeinflusst.

## 1.2 Verbindungen im konstruktiven Holzbau

Verbindungen im Holzbau lassen sich in drei übergreifende Kategorien unterteilen: geklebte Verbindungen, Verbindungen mit Hilfe von metallischen Verbindungsmitteln und zimmermannsmäßige Verbindungen.

In der Regel sind geklebte Verbindungen sehr steif und können auch gut Scherkräfte übertragen. Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln weisen meistens eine geringere Steifigkeit auf, wobei dies von der jeweiligen Anwendung und Belastungsart abhängig ist. Diese werden von Neuhaus [24] in stiftförmige und nicht-stiftförmige Verbindungsmittel unterteilt. Zu den stiftförmigen metallischen Verbindungsmitteln zählen Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, Gewindestangen, Gewindebolzen, Nägel und Holzschrauben, die auf Abscheren, auf Herausziehen oder durch eine Kombination aus beiden belastet werden. Nicht-stiftförmige Verbindungsmittel umfassen beispielsweise auf Abscheren beanspruchte Dübel besonderer Bauart und Nagelplatten [25]. Zimmermannsmäßige Holzverbindungen wie Versätze, Zapfen und Holznägel bzw. Holzdübel benötigen per se keine metallischen Verbindungsmittel zur Kraftübertragung, sondern höchstens zur Lagesicherung.

Diese Verbindungen können beispielsweise mittels einer Abbundanlage oder auch per Hand vorgefertigt werden.

### 1.2.1 Geklebte Holzverbindungen

Da bei geklebten Holzverbindungen (Abbildung 5), die Verbindung mit Hilfe von Klebstoffen hergestellt wird, sind die Eigenschaften dieser Klebstoffe von hoher Relevanz. Anforderungen an Klebstoffe für den tragenden Bereich sind in der EN 301 [26] sowie je nach Klebstofftyp (Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff) in der EN 15425 [27] zu finden. Die in [26] angeführten Klebstofftypen Melaminharz, Phenol-Resorcinharz und Polyurethan (PUR) sind für den Einsatz in den Nutzungsklassen 1, 2 und 3 geeignet [26]. Folgend ein Auszug der Randbedingungen der Nutzungsklassen:

- **Nutzungsklasse 1:** Relative Luftfeuchte der Umgebung darf bei 20°C nur einige Wochen im Jahr 65% überschreiten;
- **Nutzungsklasse 2:** Relative Luftfeuchte der Umgebung darf bei 20°C nur einige Wochen im Jahr 85% überschreiten;
- **Nutzungsklasse 3:** Bei Bedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten als in Nutzungsklasse 2 führen [26].

Andere Klebstoffe wie z.B. der Emulsionspolymer-Isocyanat (EPI)- Klebstoff ist hingegen nur für ausgewählte Nutzungsklassen, in diesem Fall 1 und 2, zugelassen.



Abbildung 5: Geklebte Holzverbindungen; Quelle: [28]

Verklebte Verbindungen im tragenden Bereich müssen über die Dauer des erwarteten Lebenszyklus belastbar bleiben [25]. Aufgrund der besonderen Eigenschaften und schwierigen Lösbarkeit wurden auf diese Verbindungen in dieser Studie nicht näher eingegangen. Der Entwurf für das vorgestellte Bewertungssystem kann aber dennoch auch für geklebte Verbindungen verwendet werden.

## 1.2.2 Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln

Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln weisen im Vergleich zu den geklebten Verbindungen eine geringere Steifigkeit auf. Die statische Wirksamkeit ist bis auf wenige Ausnahmen nur gegeben, wenn die stiftförmigen Verbindungsmittel nicht parallel sondern quer, beispielsweise in einem Winkel von  $90^\circ$  zur Faserrichtung des Holzes, eingebracht werden [24]. Auftretende Scherbelastungen führen zu Lochleibungsverformungen und Verformungen der einzelnen Verbindungsmittel, wodurch es im ganzen Knotenbereich zu Verformungen kommen kann. Die Belastbarkeit der Verbindungen selbst kann durch eine Gruppierung stiftförmiger Verbindungsmitteln, je nach Type, erhöht werden, wobei Mindestabstände eingehalten werden müssen, um die Spaltgefahr des Holzes zu minimieren. Dieser Gefahr kann zusätzlich durch eine versetzte Anordnung der Verbindungsmittel oder eine Vergrößerung des Holzquerschnittes entgegengewirkt werden. Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele von Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln kurz erläutert.

### 1.2.2.1 Stabdübel

Stabdübel (Abbildung 6) sind zylinderförmige Stahlstifte, die rechtwinklig zur Eigenachse belastet werden. Sie haben einen Durchmesser zwischen 6mm und 30mm, wobei Durchmesser über 24mm vermieden werden sollten. Stabdübel werden in Verbindung mit Metallbalkenträgern eingesetzt, beispielsweise für den Anschluss von Nebenträger an Hauptträger, bei Stützenfüßen oder bei Zugverbindungen. Die Bohrlöcher in Holz und Metallteilen sollten den gleichen Durchmesser wie der Stift haben [25], der zusätzlich in Erdbebengebieten gegen Herausfallen gesichert werden sollte [29].



Abbildung 6: Stabdübel; Quelle: [30]

### 1.2.2.2 Bolzen und Passbolzen

Bolzen (Abbildung 7 (a)) und Passbolzen (Abbildung 7 (b)) verfügen, wie Stabdübel, über einen glatten Schaft, der eine Querbeanspruchung aufnehmen kann. Sie werden durch Kopf

und Mutter oder beidseitige Muttern mit Beilagscheiben gegen Ausziehen gesichert. Während die Bohrlöcher in den Holzbauteilen bei Bolzenverbindungen generell 1mm größer als der Bolzendurchmesser herzustellen sind, müssen sie bei Passbolzen passgenau sein. Die Bohrlöcher in den Stahlteilen hingegen dürfen bei Passbolzenverbindungen wiederum maximal 1mm größer als der Bolzendurchmesser sein [31]. Das Lochspiel in den Verbindungen ist auf das Schwinden des Holzes zurückzuführen, welches die Klemmwirkung des Holzes und die Steifigkeit der Konstruktion vermindern kann. Dies kann zu einem Formverlust der Konstruktion führen, wodurch Bolzenverbindungen nur bei untergeordneten oder temporären Bauten eingesetzt werden sollten. Passbolzen hingegen können auch bei Dauerbauten verwendet werden [24]. Hier sollte die Gewindelänge ausreichend lang sein, um ein Nachziehen nach dem Schwinden zu ermöglichen.



Abbildung 7: (a) Bolzen und (b) Passbolzen; Quelle: [32]

### 1.2.2.3 Gewindestange

Gewindestangen (Abbildung 8) sind dünne Stahlstäbe mit durchgehendem Gewinde, die mit Muttern und Beilagscheiben durch vorgebohrte Löcher mit geringem Spiel (Durchmesser + ca. 1mm) montiert werden. Es gibt verschiedene Varianten von Gewindestangenverbindungen, etwa mit Holz verklebte Gewindestangenverbindungen oder solche, die entlang der Achse auf Zug beanspruchte werden [24].

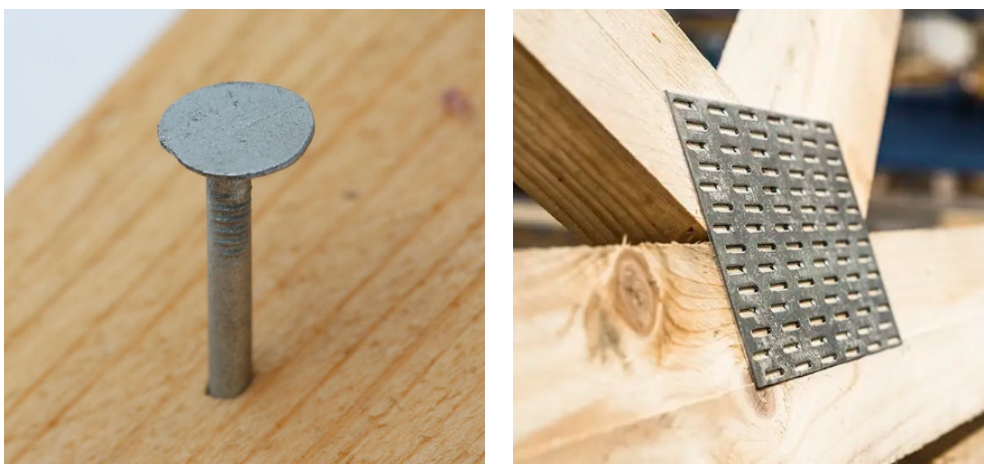


Abbildung 8: Gewindestangen; Quelle: [33]

#### 1.2.2.4 Nagel und Nagelplatte

Nägel (Abbildung 9 (a)) sind spitze stiftförmige Verbindungsmittel mit einem Durchmesser von 1,9 mm bis 8 mm. Sie werden auf Abscheren oder Herausziehen beansprucht und oft in Gruppenanordnungen verwendet. Eine tragende Nagelverbindung muss mindestens aus zwei Nägeln bestehen. Zuzüglich zu den unterschiedlichen Längen sind Nägel mit verschiedenen Schaft- oder Kopfausführungen erhältlich. Nägel mit quadratischem Querschnitt weisen eine geringere Spaltgefahr beim Eintreiben und eine höhere Tragfähigkeit als Nägel mit einem runden Schaftquerschnitt auf. Beurteilt man nach dem Ausziehewiderstand, so ist der von glattschaftigen Nägeln geringer als der von Rillen- oder Schraubnägeln [24].

Nagelplatten (Abbildung 9 (b)) sind Platten aus Metall, aus denen Nägel rechtwinklig zur Plattenebene angebracht sind bzw. bei denen Nägel durch Stanzen aus der Platte hergestellt wurden. Sie werden beispielsweise oft im Fachwerkbau angefounden.



(a)

(b)

Abbildung 9: (a) Nagel und (b) Nagelplatten; Quelle:[34], [35]

### 1.2.2.5 Holzschraube

Holzschrauben (Abbildung 10) sind stiftförmige Verbindungsmittel mit einem profilierten Gewindenschaft und einem Durchmesser von mindestens 2,4mm. Eine tragende Verbindung besteht aus mindestens zwei Schrauben. Es gibt verschiedene Schraubentypen, wie Teilgewinde-, Vollgewinde- und Sechskantschrauben, wobei Vollgewindeschrauben eine gleichmäßigere Kraftübertragung ermöglichen. Grundsätzlich werden die Schrauben auf Abscheren oder Herausziehen beansprucht und wie Nägel in Gruppenanordnung verwendet.

Schrauben mit einem Durchmesser bis zu 6 mm haben ein Trag- und Verformungsverhalten ähnlich dem von Nägeln, während Schrauben mit einem größeren Durchmesser eher wie Passbolzen wirken. Das Schraubgewinden, solange die Schraube eingeschraubt und nicht eingeschlagen wurde, verbessert das Ausziehverhalten gegenüber glattschaftigen Nägeln. Das Torsionsmoment, das beim Ein- und Ausdrehen auftritt, kann dazu führen, dass Schrauben „abgedreht“ werden. Bei einem Schraubendurchmesser über 6 mm muss das Holz vorgebohrt werden, um die Spaltgefahr zu verringern und die Tragfähigkeit auf Abscheren zu gewährleisten. Teilgewindeschrauben eignen sich in vielen Fällen besser als Vollgewindeschrauben um Komponenten zusammenzuziehen [24].

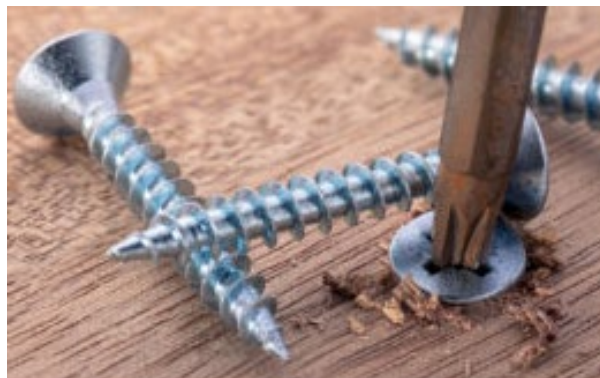


Abbildung 10: Holzschrauben; Quelle: [36]

### 1.2.2.6 Dübel besonderer Bauart

Dübel besonderer Bauart (Abbildung 11) übertragen Abscherkräfte zwischen Komponenten. Es gibt Ring- und Scheibendübel, die in gefräste Vertiefungen eingelassen werden sowie Scheibendübel mit Zähnen, die zwischen den zusammenfügenden Komponenten eingepresst werden. Die Sicherung von Dübeln besonderer Bauart geschieht in vielen Fällen über Bolzen oder ähnliche ausziehfeste Verbindungsmittel [24].

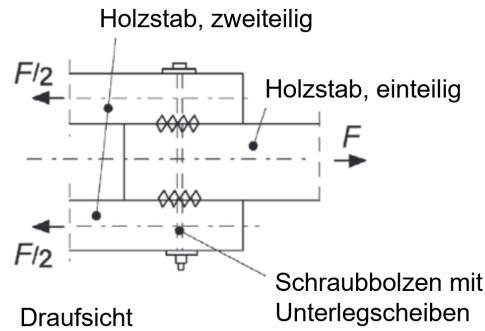


Abbildung 11: Dübel besonderer Bauart; Quelle: [37]

### 1.2.3 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen

Zimmermannsmäßige Holzverbindungen benötigen keine metallischen Verbindungsmittel zur Kraftübertragung [24]. Sie können jedoch zur Lagesicherung mit mechanischen Verbindungsmitteln kombiniert werden. Es gibt viele Ausführungen von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen wobei sehr viel Wissen in dem letzten Jahrhundert verloren gegangen ist. Durch die Industrialisierung wurde öfters auf Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln, aufgrund von geringerem Arbeitsaufwand und auch der tendenziell höheren Tragfähigkeit, zurückgegriffen. Beispiele für zimmermannsmäßige Verbindungen sind Versätze (z.B. Stirn-, Brust- und Fersenversatz), Blätter (z.B. schräges, einfaches oder Hakenblatt) und Zapfen (z.B. einfacher, Schwalbenschwanz- oder Brustzapfen). Auch Holznägel bzw. Holzdübel gehören zu dieser Kategorie.

#### 1.2.3.1 Versatz

Versätze (Abbildung 12) übertragen Druckkräfte durch Flächenpressung, weshalb eine hohe Passgenauigkeit von Bedeutung ist. Die Einhaltung einer bestimmten Vorholzlänge verhindert das Abscheren des einleitenden Holzteils. Die Lagesicherung kann durch Heftbolzen, Laschen, Nägel, Schrauben oder Zapfen erfolgen.



Abbildung 12: Versatz; Quelle: [38]

### 1.2.3.2 Zapfen

Zapfen (Abbildung 13) dienen der Lagesicherung und der Übertragung von Querkräften. Die Tragfähigkeit in dem Bereich der Verbindung ist aufgrund der Querschnittsschwächungen als geringer einzustufen als beim nicht geschwächten Hauptquerschnitt [24]. Zapfenverbindungen können neben der Lagesicherung auch dazu dienen, Holzbauteile wie Firstpfetten zu ersetzen (z.B. Schlitz- und Zapfenverbindungen bei Sparren).

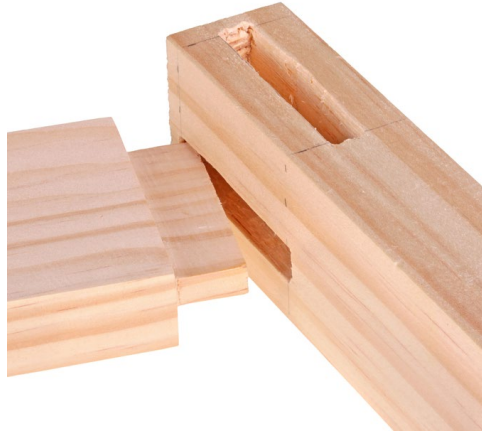


Abbildung 13: Zapfen; Quelle: [39]

### 1.2.3.3 Holznägel, bzw. Holzdübel

Holznägel (Abbildung 14) werden primär zur Lagesicherung und gegen Abscheren beansprucht [24]. Ihre Effektivität ist stark vom Biegeverhalten der verwendeten Holzart abhängig, weshalb oft Harthölzer wie Eiche oder Buchen zum Einsatz kommen. Es existieren verschiedene Ausführungen von Holznägeln, wie z.B. trockene Buchenholzstäbe, die leimfrei in vorgefertigte Löcher eingebracht werden [40] und durch die Feuchteaufnahme der Luft quellen. Eine weitere Ausführungsart sind im Querschnitt abgestufte Holznägel [41].



Abbildung 14: Holznägel; Quelle: [42]

## 2 Methodik

### 2.1 Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Studie ist es, einen ersten Rahmen für die Bewertung der Kreislaufwirtschaft für Verbindungsmittel im Holzbau in Österreich zu schaffen. Dazu gehört die Durchführung einer systematischen Literaturrecherche, die Auswahl bzw. Entwicklung einer geeigneten Methodik zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Verbindungen (aufbauend auf publizierten Ansätzen) und eine erste Testanwendung der Methodik an ausgewählten Verbindungstypen. Dieser Ansatz unterstützt fundierte Entscheidungen und fördert die Einführung von kreislauffähigen und nachhaltigen Praktiken im österreichischen Holzbau.

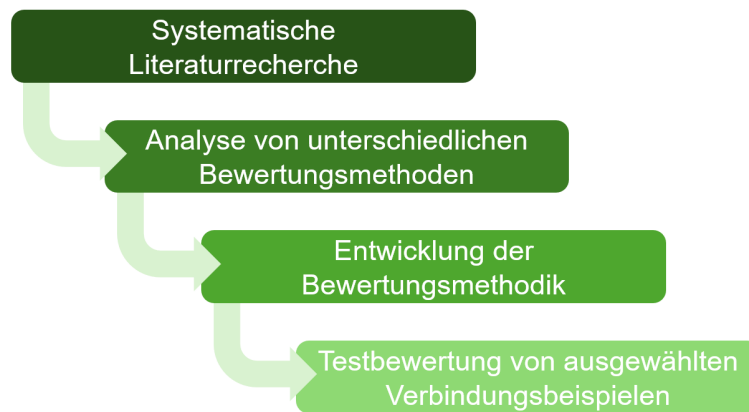


Abbildung 15: Flussdiagramm zur Erläuterung des methodischen Prozesses

#### 2.1.1 Schritt 1: Systematische Literaturrecherche

In einem ersten Schritt wurde eine systematische Recherche in relevanten Datenbanken wie Scopus, Google Scholar und dem Artificial Intelligence Research Assistant Elicit durchgeführt. Ziel war es, bestehende Forschungsarbeiten zu Holzverbindungen und Methoden zur Bewertung der Wiederverwendung von Holz zu identifizieren, wobei der Schwerpunkt auf Verbindungen zwischen Bauteilen lag. Bei diesem Prozess wurden Schlüsselwörter und Suchbegriffe wie "circularity (Kreislaufwirtschaft)", "component (Bauteil)", "connection (Verbindung)", "timber construction (Holzbau)" und "rating system (Bewertungssystem)" verwendet, um einschlägige Artikel, Bücher und wissenschaftliche Quellen zu sammeln.

Die identifizierten Publikationen wurden anschließend sowohl anhand quantitativer (z. B. Publikationsjahr, Häufigkeit von Bauteilen und Verbindungen) als auch qualitativer Kriterien (z. B. Praktikabilität, Potenzial, Effizienz) bewertet. Als geeignet galten Quellen, die sich direkt mit Material- und Lebenszyklen im Holzbau oder in eng verwandten Bereichen befassen. Im Gegensatz dazu wurden Quellen als ungeeignet eingestuft, wenn sie nicht ohne Weiteres auf

den Holzbau anwendbar waren oder wenn die wissenschaftliche Qualität nicht ausreichend war.

Die Literaturrecherche ermöglicht einen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens in diesem Forschungsbereich. Sie legt den Grundstein für den Aufbau der Indikatoren zur Bewertung der Kreislauffähigkeit und dient als Diskussionsbasis.

### **2.1.2 Schritt 2: Analyse von unterschiedlichen Bewertungsmethoden**

Nach der umfassenden Literaturrecherche und sorgfältigen Bewertung verschiedener Forschungsmethoden wurde die Methode von Pozzi (2019) [43] als Grundlage für die Entwicklung der Methodik zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Verbindungen im Holzbau ausgewählt. Die Hauptgründe dafür sind die wissenschaftlich fundierte Herangehensweise und die dennoch einfache praktische Anwendbarkeit. Sie ist speziell für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Holzverbindungen entwickelt worden, wobei ein besonderer Fokus auf die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit gelegt wurde. Die Entwicklung bzw. Testanwendung der Methodik umfasste folgende Schritte:

**Definition der Kriterien:** Pozzi definierte in einem ersten Schritt 11 Kriterien, die in die Beurteilung miteinbezogen werden. Zu diesen Kriterien gehören die Anzahl der Elemente, die Komplexität der Elemente, der Vorfertigungsgrad, die Montagefreundlichkeit, der Freiheitsgrad, die strukturelle Festigkeit, die Endbearbeitung, die Demontagefreundlichkeit, der Abfall am Ende des Zyklus, die Wiederverwendbarkeit und die Kosten.

**Gewichtung der Kriterien und Bewertungsmethodik:** Im nächsten Schritt wurde jedem Kriterium eine Gewichtung zugewiesen. Pozzi verwendete eine vereinfachte Version des analytischen Hierarchieprozesses (AHP), der von Dr. Thomas Saaty [44] entwickelt wurde. AHP ist eine Entscheidungsfindungsmethode, die Alternativen auf der Grundlage von paarweisen Vergleichen einstuft. Bei diesem Verfahren wird eine Matrix erstellt, in der jedes Kriterium mit den anderen auf einer Skala von 1 bis 3 verglichen wird. Dabei steht 1 für relevant, 2 für wichtig und 3 für besonders wichtig. Anhand dieser Vergleiche wird die relative Gewichtung jedes Kriteriums berechnet. Dies spiegelt die Bedeutung jedes Kriteriums für den Entscheidungsprozess wider. Jedes Kriterium wird mit einer Punktzahl von 1 bis 4 bewertet, wobei 1 das schlechteste und 4 das beste Ergebnis darstellt.

**Durchführung von Testbewertungen** Im nächsten Schritt hat Pozzi ausgewählte Verbindungen mit Hilfe des entwickelten Bewertungssystems beurteilt. Diese Punkte werden dann mit ihrer jeweiligen Gewichtung multipliziert. Die sich daraus ergebenden gewichteten

Punktzahlen werden zu einer Gesamtpunktzahl addiert und bilden so das Ergebnis der Beurteilung.

### 2.1.3 Schritt 3: Entwicklung der Bewertungsmethodik

Die ausgewählte Methode (Pozzi-Methode) wurde basierend auf neuen Erkenntnissen aus der Literatur, aus anderen Projekten und Diskussionen in den Fachverbands-Workshops weiterentwickelt. Die wesentlichen Anpassungen sind wie folgt:

**Definition der Indikatoren:** Die ursprünglich 11 von Pozzi (2019) [43] definierten Kriterien, die in dieser Studie als Indikatoren bezeichnet werden, wurden auf die folgende 10 Indikatoren reduziert wie auch inhaltlich adaptiert bzw. präzisiert: (V.1) Anzahl der Elemente, (V.2) Komplexität, (V.3) Vorfertigungsgrad, (V.4) Montagefreundlichkeit, (V.5) Freiheitsgrad, (V.6) Robustheit, (V.7) Schutz der Verbindung, (V.8) Demontagefreundlichkeit, (V.9) Nicht wiederverwendbare Baukomponenten und (V.10) Wiederverwendbarkeit. Der Kostenindikator wurde gestrichen, da das derzeitige System primär auf technische Kriterien fokussiert. Zukünftig ist eine Berücksichtigung jedenfalls relevant, dafür ist jedoch eine umfassendere Aufarbeitung notwendig.

**Bewertungsmethodik:** Die numerische Skala (von 1 bis 4) von Pozzi wurde im Zuge der Weiterentwicklung zu einer Skala von 0 (0%) bis 1 (100%) angepasst, wobei 1 das bestmögliche Ergebnis darstellt. Die Bewertungen werden wie folgt zugewiesen: 0 (0% keine Übereinstimmung), 0,5 (50% mittelmäßige Übereinstimmung) und 1,00 (100% höchste Übereinstimmung). Darüber hinaus wurden alle Kriterien detailliert beschrieben, um die Benutzer\*innen bei der Bewertung zu unterstützen und die Bewertung allgemein möglichst zu objektivieren. Die Gleichung zur Berechnung der kumulierten Kreislauffähigkeit von Verbindungen ist wie folgt definiert, siehe hierzu Gleichung 1.

$$V[-] = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Punkte Indikator } i * \text{Gewichtung Indikator } i)}{\sum_{i=1}^n \text{Gewichtung Indikator } i} \quad (1)$$

### 2.1.4 Schritt 4: Testbewertung von ausgewählten Beispielverbindungen

Die Kreislauffähigkeit verschiedener Verbindungstypen wurde mit der angepassten Methode bewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend systematisch analysiert und interpretiert, um eine umfassende Bewertung der Kreislaufwirtschaft der betrachteten Verbindungen zu ermöglichen.

## **3 Indikatoren zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Verbindungen im Holzbau**

### **3.1 Bewertungsmethodik**

Die Bewertungsmethodik basiert auf einer Weiterentwicklung einer von Pozzi (2019) [43] vorgeschlagenen Methode und beurteilt die technische und praktische Kreislauffähigkeit von Verbindungen im Holzbau. Die Methode bietet einen wissenschaftlich fundierten Ansatz, der dennoch praktisch gut anwendbar ist. Als kritisch ist bei der Methodik ein gewisser subjektiver Einfluss der/des Beurteiler\*in sowie auch eine Abhängigkeit vom Fachwissen der/s Anwender\*in zu nennen. So ist beispielsweise ein umfassendes Praxiswissen im Holzbau notwendig, um die unterschiedlichen Verbindungstechniken hinsichtlich des Aufwandes für die Herstellung und auch einer möglichen späteren Demontage beurteilen zu können.

### **3.2 Detaillierte Beschreibung der Indikatoren**

Insgesamt werden in die Bewertung 10 Indikatoren miteinbezogen, die entweder direkt oder indirekt die Kreislaufwirtschaft von Verbindungen im Holzbau beurteilen. Je nachdem, wie gut der jeweilige Indikator erfüllt ist, kann eine Punktzahl zwischen 0 und 1 vergeben bzw. erreicht werden. Eine Punktzahl von 1 (100%) steht für die höchste Übereinstimmung mit den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft und 0 für (0%) für keine Übereinstimmung. Folgend werden die einzelnen Indikatoren näher erläutert.

### 3.2.1 Indikator: V.1 – Anzahl der Elemente

**Ziel:** Die Minimierung der Anzahl der Elemente zielt darauf ab, die Demontage und Wiederverwendung zu erleichtern, Abfall zu reduzieren und die Ressourceneffizienz zu steigern.

**Beschreibung:** Dieser Indikator bewertet die Anzahl der Komponenten, die an der Verbindung beteiligt sind, wobei Holzteile, die keine Verbindungsmittel darstellen, ausdrücklich ausgeschlossen werden.

**Quantitative Abstufung:** Bei der Bewertung der Anzahl der Elemente wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:

- **Viele:** Das Verbindungssystem besteht aus vielen Verbindungselementen. Viele ist je nach Verbindung von der/dem Beurteiler\*in zu definieren, da eine Verallgemeinerung schwierig ist. Diese Anzahl umfasst nur die Verbindungselemente und nicht die zu verbindenden Holzbauteile.
- **Moderat:** Das Verbindungssystem besteht aus einer moderaten Anzahl von Verbindungselementen. Moderat ist je nach Verbindung von der/dem Beurteiler\*in zu definieren, da eine Verallgemeinerung schwierig ist. Diese Anzahl umfasst nur die Verbindungselemente und nicht die zu verbindenden Holzbauteile.
- **Wenige:** Das Verbindungssystem besteht aus einer minimalen Anzahl von Verbindungselementen. Wenige ist je nach Verbindung von der/dem Beurteiler\*in zu definieren, da eine Verallgemeinerung schwierig ist. Diese Anzahl umfasst nur die Verbindungselemente und nicht die zu verbindenden Holzbauteile.

**Ergebnis:** Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 2 unten dargestellt:

Tabelle 2: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.1

Antwort	Punkte	Gewichtung
Viele	0,0	2
Moderat	0,5	
Wenige	1,0	

### 3.2.2 Indikator: V.2 – Komplexität

**Ziel:** Durch die Minimierung der Komplexität der Form der zu verbindende Elemente soll die Herstellungszeit verkürzt und die Wahrscheinlichkeit der Wiederverwendung von Bauteilen erhöht werden.

**Beschreibung:** Dieser Indikator bewertet die Komplexität der Form der zu verbindende Elemente und nicht die Komplexität von Verbindern, Schrauben oder Ähnlichem.

**Quantitative Abstufung:** Bei der Bewertung der Komplexität der Form der Elemente wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:

- **Komplex:** Die Form der zu verbindenden Holzelemente ist komplex und erfordert beispielsweise aufwändige Maschinen, ein hohes Maß an Präzision ein sehr gutes Verständnis und handwerkliches Geschick, um sie effektiv herzustellen zu können.
- **Moderat:** Die Formen der zu verbindenden Holzelemente (Bauteile) ist mittelmäßig komplex und erfordert konventionelle Holzbauwerkzeuge/ -maschinen, ein moderates Maß an Präzision und handwerkliches Geschick bei der Herstellung.
- **Einfach:** Die Formen der zu verbindenden Holzelemente (Bauteile) ist wenig komplex und mit einfachen Werkzeugen ohne spezielles Geschick zu fertigen.

**Ergebnis:** Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 3 unten dargestellt:

Tabelle 3: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.2

Antwort	Punkte	Gewichtung
Komplex	0,0	2
Moderat	0,5	
Einfach	1,0	

### 3.2.3 Indikator: V.3 – Vorfertigungsgrad

**Ziel:** Durch einen höheren Vorfertigungsgrad können Montage- und Demontageschritte und -zeiten reduziert werden, was eine effiziente Konstruktion fördert. Zudem wird so eine spätere Demontage erleichtert und eine einfache Wiederverwendung begünstigt.

**Beschreibung:** Dieser Indikator bewertet, wie hoch der Anteil einer Verbindung ist, der im Werk vorgefertigt werden kann.

**Quantitative Abstufung:** Bei der Bewertung des Vorfertigungsgrades der Verbindung wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:

- Gering: Es werden keine oder nur wenige vorgefertigte Komponenten verwendet.
- Moderat: Ein Teil der Komponenten ist vorgefertigt.
- Hoch: Ein Großteil der Komponenten ist vorgefertigt.

**Ergebnis:** Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, siehe Tabelle 4:

Tabelle 4: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.3

Antwort	Punkte	Gewichtung
Gering	0,0	2
Moderat	0,5	
Hoch	1,0	

### 3.2.4 Indikator: V.4 – Montagefreundlichkeit

<p><b>Ziel:</b> Die einfache Montage von Verbindungen reduziert die Abhängigkeit von Spezialwerkzeugen und Facharbeitern, spart Zeit und Kosten bei der Konstruktion und ermöglicht eine einfachere Demontage und Wiederverwendung.</p>										
<p><b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet die Einfachheit der Montage in Hinblick auf die benötigten Werkzeuge und die Qualifikation der Monteure.</p>										
<p><b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung des Montagefreundlichkeit wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Komplex:</b> Die Montage erfordert Präzision und eine spezifische Ausbildung (z.B. spezielle Schulung für Facharbeiter*innen).</li> <li>• <b>Moderat:</b> Die Montage ist relativ einfach und erfordert nur Standardwerkzeug und eine grundlegende fachliche Ausbildung (z.B. Zimmererfacharbeiter*in).</li> <li>• <b>Einfach:</b> Die Montage ist einfach und schnell und erfordert nur einfache Werkzeuge und ein grundlegendes handwerkliches Geschick (keine facheinschlägige Ausbildung).</li> </ul>										
<p><b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, siehe Tabelle 5:</p> <p>Tabelle 5: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.4</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Antwort</th> <th>Punkte</th> <th>Gewichtung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Komplex</td> <td>0,0</td> <td rowspan="3">2</td> </tr> <tr> <td>Moderat</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Einfach</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>	Antwort	Punkte	Gewichtung	Komplex	0,0	2	Moderat	0,5	Einfach	1,0
Antwort	Punkte	Gewichtung								
Komplex	0,0	2								
Moderat	0,5									
Einfach	1,0									

### 3.2.5 Indikator: V.5 – Freiheitsgrade

<p><b>Ziel:</b> Die Maximierung des Freiheitsgrades soll die Flexibilität und die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass die Verbindung in Zukunft wiederverwendet werden kann.</p>		
<p><b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet, wie flexibel die Verbindung verwendet werden kann.</p>		
<p><b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung des Freiheitsgrades wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fest: Der Verbindung ist nur für spezielle geometrische Randbedingungen einsetzbar.</li> <li>• Eingeschränkt: Die Verbindung lässt gewisse geometrische Anpassungen zu.</li> <li>• Flexibel: Die Verbindung ist flexibel an unterschiedliche geometrische Randbedingungen anpassbar.</li> </ul>		
<p><b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 6 unten dargestellt:</p>		
<p>Tabelle 6: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.5</p>		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Fest	0,0	2
Eingeschränkt	0,5	
Flexibel	1,0	

### 3.2.6 Indikator: V.6 – Robustheit

<p><b>Ziel:</b> Die Maximierung der Robustheit verlängert die Lebensdauer von Holzstrukturen, wie auch den Bedarf an Ersatzteilen und erleichtert die einfache Demontage und Wiedermontage, ohne die Integrität zu gefährden.</p>		
<p><b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet die Robustheit und Widerstandsfähigkeit der Verbindungen im Holzbau.</p>		
<p><b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung der strukturellen Festigkeit wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gering: Die Verbindung ist wenig robust und weist beispielsweise nahezu keine weiteren Tragreserven auf bzw. kann keine ungeplanten äußere Einflüsse tolerieren.</li> <li>• Moderat: Die Verbindung ist bedingt robust und weist beispielsweise teilweise Tragreserven auf und kann ungeplante äußere Einflüsse teilweise tolerieren.</li> <li>• Hoch: Die Verbindung ist sehr robust und weist beispielsweise entsprechende Tragreserven auf und kann gut mit ungeplanten äußeren Einflüssen umgehen.</li> </ul>		
<p><b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 7 unten dargestellt:</p>		
<p>Tabelle 7: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.6</p>		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Gering	0,0	3
Moderat	0,5	
Hoch	1,0	

### 3.2.7 Indikator: V.7 – Schutz der Verbindung

<p><b>Ziel:</b> Eine geschützte Verbindung gewährleistet eine hohe Dauerhaftigkeit und lange strukturelle Integrität der Verbindung, auch unter widrigen Bedingungen wie unter anderem Feuchtigkeitseinfluss und Feuer.</p>		
<p><b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet wie gut die Verbindung gegen äußere Einflüsse (z.B. Feuchtigkeit oder auch Feuer) geschützt ist.</p>		
<p><b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung des Schutzes wird wie folgt unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gering: Die Verbindung ist zum größten Teil ungeschützt. Sie ist nicht durch umgebende Materialien oder Behandlungen z.B. Beschichtungen geschützt.</li> <li>• Moderat: Die Verbindung ist teilweise ungeschützt. Sie ist teilweise durch umgebende Materialien oder Behandlungen z.B. Beschichtungen geschützt.</li> <li>• Hoch: Die Verbindung ist gut geschützt. Sie ist gut durch umgebende Materialien oder durch Behandlungen z.B. Beschichtungen geschützt.</li> </ul>		
<p><b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 8 unten dargestellt:</p>		
<p>Tabelle 8: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.7</p>		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Gering	0,0	3
Moderat	0,5	
Hoch	1,0	

### 3.2.8 Indikator: V.8 – Demontierbarkeit

<b>Ziel:</b> Eine einfache Demontage ermöglicht einen einfachen Rückbau einer Konstruktion in einzelne Bauteile.		
<b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet die Einfachheit der Demontage im Hinblick auf die benötigten Werkzeuge und die Qualifikation der Monteure.		
<p><b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung der Demontierbarkeit wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Komplex:</b> Die Demontage erfordert spezielle Werkzeuge und eine spezifische Ausbildung (z.B. spezielle Schulung für Facharbeiter*innen).</li> <li>• <b>Moderat:</b> Die Demontage ist relativ einfach und erfordert nur Standardwerkzeug und eine grundlegende fachliche Ausbildung (z.B. Zimmererfacharbeiter*in).</li> <li>• <b>Einfach:</b> Die Demontage ist einfach und schnell und erfordert nur einfache Werkzeuge und ein grundlegendes handwerkliches Geschick (keine facheinschlägige Ausbildung).</li> </ul>		
<b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 9 unten dargestellt:		
Tabelle 9: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.8		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Komplex	0,0	3
Moderat	0,5	
Einfach	1,0	

### 3.2.9 Indikator: V.9 – Nicht wiederverwendbare Baukomponenten

<b>Ziel:</b> Die Reduktion der nicht wiederverwendbaren Baukomponenten am Ende der Nutzungsdauer.		
<b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator bewertet die Menge an Bauteilen/Materialien, die am Ende ihres Lebenszyklus aufgrund von Verschleiß, Beschädigung etc. nicht wiederverwendet werden können. Beispielsweise werden Verbindungsmittel und Bauteile verbogen bzw. beschädigt (z.B. Nägel und Schrauben verbogen, Holzbauteile teils gespalten oder beschädigt etc.), sodass sie nicht wiederverwendet werden können.		
<b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung der Menge an nicht wiederverwendbaren Baukomponenten am Ende des Lebenszyklus wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viel: Eine große Anzahl von Bauteilen kann aufgrund von erheblichem Verschleiß, Beschädigung und Verlust der Integrität nicht wiederverwendet werden.</li> <li>• Moderat: Eine moderate Anzahl von Baukomponenten kann aufgrund von Verschleiß, Beschädigung und Verlust der Integrität nicht wiederverwendet werden.</li> <li>• Wenig: Eine geringe Anzahl von Baukomponenten kann nicht wiederverwendet werden.</li> </ul>		
<b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, wie in Tabelle 10 unten dargestellt:		
Tabelle 10: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.9		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Viel	0,0	1
Moderat	0,5	
Wenig	1,0	

### 3.2.10 Indikator: V.10 – Wiederverwendbarkeit

<b>Ziel:</b> Die Maximierung der Wiederverwendbarkeit von Verbindungsmitteln und Bauteilen.		
<b>Beschreibung:</b> Dieser Indikator gibt an, ob die Verbindungsmittel bzw. auch die angrenzenden Bauteile wiederverwendet werden können und ist somit der Kehrwert von Indikator V.9. Rechtliche Rahmenbedingungen werden nicht berücksichtigt, da der Fokus ausschließlich auf der Funktionalität und Sicherheit der Komponenten in ihrer vorgesehenen Funktion liegt.		
<b>Quantitative Abstufung:</b> Bei der Bewertung der Wiederverwendbarkeit wird zwischen den folgenden Antwortmöglichkeiten unterschieden:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht: Die Verbindungsmittel bzw. die angrenzenden Bauteile können nicht wiederverwendet werden, da sie bei der Demontage irreparabel beschädigt werden.</li> <li>• Teilweise: Die Verbindungsmittel bzw. die angrenzenden Bauteile können teilweise wiederverwendet werden, nachdem kleinere Restaurierungen oder Anpassungen vorgenommen wurden.</li> <li>• Vollständig: Die Verbindungsmittel bzw. die angrenzenden Bauteile können ohne jegliche Adaption mehrfach wiederverwendet werden.</li> </ul>		
<b>Ergebnis:</b> Die Punktevergabe erfolgt auf der Grundlage der gewählten Antwortmöglichkeit, siehe Tabelle 11:		
Tabelle 11: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.10		
<b>Antwort</b>	<b>Punkte</b>	<b>Gewichtung</b>
Nicht	0,0	3
Teilweise	0,5	
Vollständig	1,0	

## 4 Ergebnisse der Bewertung ausgewählter Verbindungen

Mit Hilfe der in Kapitel 3 vorgestellten Methodik wurden testweise unterschiedliche Verbindungen bewertet. Der Fokus wurde dabei auf zimmermannsmäßige und Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln gelegt. Eine Großansicht der bewerteten Verbindungen kann dem Anhang entnommen werden.

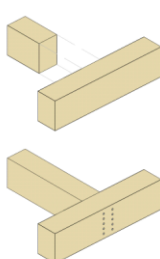
### 4.1.1 Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln

#### 4.1.1.1 Holzschraubenverbindung

Die in Tabelle 12 dargestellte Holzschraubenverbindung wird mit mehreren Schrauben hergestellt, die in der Regel eine einheitliche Dimension aufweisen. Die anzuschließende Komponente erfordert einen geraden Schnitt, der einfach durchzuführen ist. Das Ablängen der Teile kann in einer Werk- oder Industriehalle erfolgen, während die Verschraubung häufig erst auf der Baustelle stattfindet.

Es wird von einem mittleren Zeitaufwand bei der Montage und Demontage ausgegangen. Zusätzlich wird eine gute Zugänglichkeit angenommen, wodurch eine geringe Qualifikation und eine Schraubmaschine ausreichen, um die Montage und Demontage der Verbindung durchzuführen. Die Schrauben werden so eingedreht, dass nur der Schraubenkopf sichtbar bleibt. Die Verbindung wird nur als teilweise wiederverwendbar eingestuft, da beim Rückbau Schrauben beschädigt, abgerissen oder verbogen werden können, was dazu führt, dass die angrenzenden Bauteile abgeschnitten werden müssen.

Tabelle 12: Ergebnis für Holzschraubenverbindung

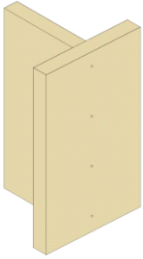
Holzschraubenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3	1,5
<b>Gesamt</b>					<b>0,50</b>	

#### 4.1.1.2 Gestellschraubenverbindung

Die in Tabelle 13 dargestellte Gestellschraubenverbindung erfordert wenige Elemente mit einheitlichen Dimensionen. Die Herstellung des stumpfen Stoßes und der vorgebohrten Löcher ist einfach. Analog zu der Holzschraubenverbindung erfolgt die Vorbearbeitung der Elemente im Werk und das Eindrehen der Schrauben findet auf der Baustelle statt. Für die Montage ist ein mittlerer Zeitaufwand erforderlich, und es genügen geringe Qualifikation und ein Schlagschrauber. Die Verbindung weist eine hohe Belastbarkeit auf, wobei die Schraubenköpfe teilweise sichtbar bleiben. Die Demontage kann schnell und unkompliziert

durchgeführt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Schrauben einfach lösbar und nicht beschädigt werden, wodurch die Verbindungsmittel und Bauteile mit hoher Wahrscheinlichkeit wiederverwendet werden können. Es ist zu beachten, dass das Holz und die Schrauben mit jedem zusätzlichen Zyklus mehr abgenutzt werden.

Tabelle 13: Ergebnis für Gestellschraubenverbindung

Gestellschraubenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3	1,5
<b>Gesamt</b>					<b>0,61</b>	

#### 4.1.1.3 Nagelplattenverbindung

Die Herstellung einer Nagelplattenverbindung (siehe Tabelle 14) erfordert nur wenige Elemente, wobei die Holzkomponenten stumpf gestoßen werden. Das Einpressen der Nagelplatten erfolgt im Werk. Die Montage erfordert einen geringen Zeitaufwand und eine niedrige Qualifikation, allerdings ist eine hydraulische Presse erforderlich. Zusätzliche Verschraubungen sind nicht notwendig. Die Verbindung ist steif und belastbar, jedoch bei einem Brand fast vollständig dem Feuer ausgesetzt. Die Demontage der Nagelplatten ist schwierig. Das Holz und die Nageplatte selbst werden beim Lösen mit großer Wahrscheinlichkeit beschädigt. Eine Wiederverwendung der Holzteile ist in den meisten Fällen möglich. Eine Wiederverwendung der Nagelplatte ist mit großer Wahrscheinlichkeit nicht möglich.

Tabelle 14: Ergebnis für Nagelplattenverbindung

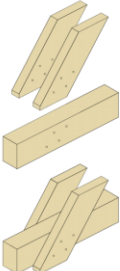
Nagelplattenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Gering	0,0	3	0,0
	V.8	Demontierbarkeit	Komplex	0,0	3	0,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Viel	0,0	1	0,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Nicht	0,0	3	0,0
<b>Gesamt</b>					<b>0,37</b>	

#### 4.1.1.4 Passbolzenverbindung

Die in Tabelle 15 dargestellte Passbolzenverbindung erfordert neben den Passbolzen auch Muttern und Beilagscheiben. Der Zuschnitt der Komponenten und die Bohrungen der Löcher lassen sich einfach im Werk vorfertigen, das Einbringen der Bolzen erfolgt auf der Baustelle. Die Montagefreundlichkeit ist wegen des geringen Zeitaufwands, der guten Zugänglichkeit,

der geringen erforderlichen Qualifikation der Monteur\*innen und des einfachen benötigten Werkzeugs sowohl bei der Montage wie auch bei der Demontage hoch. Des Weiteren ist diese Verbindung mehrere Zyklen belastbar und wiederverwendbar. Es ist zu erwarten, dass sich die Holzteile und auch die Passbolzen mit der Zeit abnutzen.

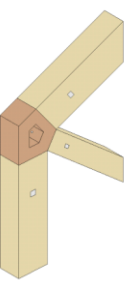
Tabelle 15: Ergebnis für Passbolzenverbindung

Passbolzenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,70</b>		

#### 4.1.1.5 Passverbindung mit Zugstange

Die in Tabelle 16 dargestellte Knotenverbindung des t-labs am Campus Diemerstein [45] erfordert neben den zu verbindenden Hölzern Muttern, Beilagscheiben, Gewindestangen, Kunstharzpressknoten und Quadratbolzen. Der stirnseitig Formschluss zwischen Knoten und Trägern sowie die erforderliche lange Bohrung für die Gewindestange, das Einstemmen oder Einfräsen des quadratischen Lochs für den Quadratbolzen und die Aussparung des Knotens machen die Verbindung komplex. Obwohl die Bauteile vorfertigbar sind, muss, bedingt durch die großen Abmessungen von Fachwerken in Kombination mit den Höhen- bzw. Längenbeschränkungen von LKW-Lieferungen, zusätzliche Montagearbeiten auf der Baustelle unternommen werden. Die gute Zugänglichkeit, die geringe Einschulungszeit des Personals und die Verwendung einfacher Werkzeuge gewährleisten eine unkomplizierte Montage und Demontage. Die hergestellte Verbindung ist steif und belastbar. Die Knotenverbindung gilt als vollständig wiederverwendbar [45].

Tabelle 16: Ergebnis für Passverbindung mit Zugstange

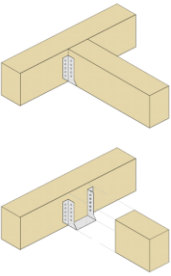
Passverbindung mit Zugstange			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Komplex	0,0	2	0,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,50</b>		

#### 4.1.1.6 Balkenschuhverbindung

Zusätzlich zu dem in Tabelle 17 abgebildeten Metallschuh sind mehrere Schrauben für die Herstellung der Balkenschuhverbindung erforderlich. Die Elemente müssen auf die richtige

Länge zugeschnitten werden. Während der Balkenschuh im Werk angebracht werden kann, erfolgt die Verschraubung zum anzuschließenden Balken auf der Baustelle. Aufgrund der Anzahl der benötigten Schrauben ist mit mittelhohem Zeitaufwand bei der Montage zu rechnen. Die Zugänglichkeit ist gewährleistet und es sind keine oder nur wenige Einweisungen des Personals erforderlich. Die Verbindung kann als steif und belastbar eingestuft werden. Des Weiteren handelt es sich um eine sichtbare Verbindung. Bei der Demontage können Balkenschuhe verbogen, die dann nicht mehr wiederverwendbar sind. Auch die Schrauben können beschädigt werden. Im schlechtesten Fall muss der Balkenschuh freigeschnitten werden. Die Verbindung wird daher als teilweise Wiederverwendbarkeit eingestuft.

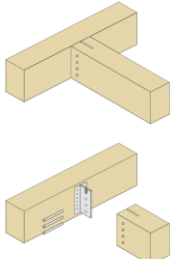
Tabelle 17: Ergebnis für Balkenschuhverbindung

Balkenschuhverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Gering	0,0	3	0,0
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3	1,5
<b>Gesamt</b>				<b>0,50</b>		

#### 4.1.1.7 Balkenträgerverbindung

Die in Tabelle 18 dargestellte Balkenträgerverbindung benötigt zur Herstellung einen Balkenträger, Schrauben und Stabdübel. Das anzuschließende Element muss geschlitzt und vorgebohrt werden. Bis auf das Einschlagen der Dübel kann die Vorfertigung vollständig im Werk erfolgen, was zu einer kurzen Montagezeit führt. Das Einschlagen der Stabdübel erfordert Geschick, kann jedoch mit einfachem Werkzeug durchgeführt werden. Die Verbindung selbst sperrt die Bewegungen in alle Richtungen und ist steif und belastbar. Das Schlitzblech ist durch das umgebende Holz geschützt, während der Übergang zum Balken zusätzlich zu den Stabdübel (stirnseitig) in vielen Fällen teils sichtbar bleibt. Bei der Demontage ist das Herausschlagen der Dübel kräfteaufwendend und erfordert Geschick. Für diese Arbeitsschritte werden mittlere Qualifikationen, Zeit und einfaches Werkzeug benötigt. Die Verbindung wird aufgrund schwierigen Lösbarkeit und der hohen Wahrscheinlichkeit für Beschädigungen als nicht wiederverwendbar eingestuft [46].

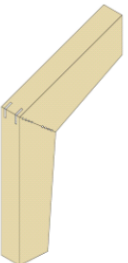
Tabelle 18: Ergebnis für Balkenträgerverbindung

Balkenträgerverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Komplex	0,0	3	0,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Viel	0,0	1	0,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Nicht	0,0	3	0,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,37</b>		

#### 4.1.1.8 GSA-LMV-Verbindung

Die in Tabelle 19 dargestellte GSA-Leisten-Montage-Verbinder (GSA-LMV) Verbindung besteht aus Stahlschwertern, Schrauben, Gewindebolzen, Beilagscheiben und Muttern. Die zu verbindenden Elemente müssen zugeschnitten, geschlitzt und mit Löchern für die Bolzen, Beilagscheiben und Muttern versehen werden. Da auf der Baustelle nicht nur die Bolzen eingebracht und die Muttern angezogen werden müssen, sondern auch eine präzise Ausrichtung und Sicherstellung der strukturellen Integrität erforderlich ist, wird die Montagekomplexität als Mittel eingestuft. Es werden spezielle Werkzeuge und Fachkenntnisse benötigt, um sicherzustellen, dass die Verbindungen korrekt installiert und belastbar sind. Die Verbindung ist steif und belastbar. Bolzen und Schwerter sind stirnseitig sichtbar und die Fuge zwischen den Elementen ist nicht vollständig geschlossen. Die Demontage der Verbindung ist einfach und die Verbindungsmittel und Bauteile über mehrere Zyklen wiederverwendbar.

Tabelle 19: Ergebnis für GSA-LMV

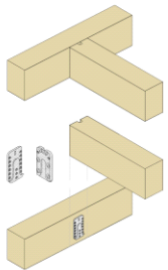
GSA-LMV-Verbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3	1,5
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,61</b>		

#### 4.1.1.9 Holzsystemverbindung

Die in Tabelle 20 dargestellte Holzsystemverbindung erfordert eine hohe Anzahl an Schrauben. Da nur eine einfach herzustellende Ausnehmung am Haupt- oder Nebenträger erforderlich ist kann die Verbindung fast zur Gänze im Werk vorgefertigt werden. Der geringe Zeitaufwand, die gute Zugänglichkeit, die niedrige erforderliche Qualifikation sowie die Möglichkeit der Montage und Demontage mit einfachem Werkzeug führen zu einer einfachen Handhabung vor Ort. Ein Sperrschraube sichert die Verbindung nach oben hin. Es gibt Verbinder, die eine charakteristische Tragfähigkeiten von ca. 300 – 380 kN (GL 24h) erreichen

[47]. Die Verbindung ist vollständig geschützt und alle Elemente sind über mehrere Lebenszyklen hin wiederverwendbar.

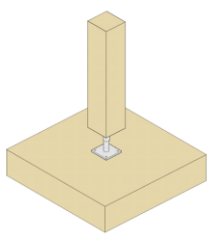
Tabelle 20: Ergebnis für Holzsystemverbinder

Holzsystemverbinder			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Eingeschränkt	0,5	2	1,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>					<b>0,87</b>	

#### 4.1.1.10 Stützenfußverbindung

Der in Tabelle 21 dargestellte Stützenfuß benötigt zur Befestigung acht Schrauben. Die Stütze muss stumpf auf Länge zugeschnitten werden. Die Verbindung kann nahezu vollständig im Werk vorgefertigt werden. Für die Montage und Demontage ist ein geringer Zeitaufwand zu erwarten, ebenso wie eine gute Zugänglichkeit, eine niedrige erforderliche Qualifikation und die Verwendung von einfachem Werkzeug. Eine Verschiebung der Stütze ist nicht möglich und die Verbindung gilt als belastbar. Der Stützenfuß ist sichtbar und nicht vor äußeren Einflüssen geschützt. Die Verbindung ist über mehrere Zyklen wiederverwendbar.

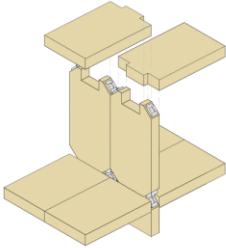
Tabelle 21: Ergebnis für Stützenfußverbindung

Stützenfuß			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Gering	0,0	3	0,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>					<b>0,70</b>	

#### 4.1.1.11 X-Rad Verbindung

Die in Tabelle 22 dargestellte X-Rad Verbindung besteht aus Schrauben, Bolzen, Muttern, Beilagscheiben, Verbindungsplatten und Schutzabdeckungen. Die Paneele müssen abgeschrägt und ausgenommen werden. Eine Anbringung der Verbindung im Werk ist vorgesehen, wodurch die Montage, Sicherung und Demontage einfach durchführbar sind. Für die Montage und Demontage ist mindestens eine mittlere Qualifikation erforderlich. Die Bewegung in alle Richtungen ist gesperrt, wodurch die Verbindung als steif und belastbar einzustufen ist. Die Schutzabdeckungen schützen die Verbindung vor Verunreinigungen und Feuer. Die Wiederverwendbarkeit über mehrere Zyklen ist problemlos möglich.

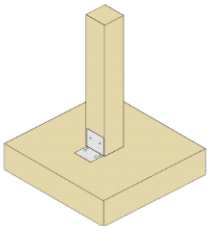
Tabelle 22: Ergebnis für X-Rad

X-Rad			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Hoch	1,0	3	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>					<b>0,72</b>	

#### 4.1.1.12 Zuganker- / Winkelverbindung

Für die Herstellung der in Tabelle 23 veranschaulichten Winkelverbindung sind eine Vielzahl von baugleichen Schrauben oder Kammnägeln erforderlich. Während die Elemente im Werk auf die richtige Länge oder Höhe zugeschnitten werden, erfolgt die Verschraubung größtenteils auf der Baustelle. Es ist von einem mittleren Zeitaufwand und einer einfachen Zugänglichkeit auszugehen. Für die Herstellung ist lediglich eine niedrige Qualifikation und einfaches Werkzeug erforderlich. Die Bewegung ist in eine Richtung gesperrt und Scher- und Druckkräfte können aufgenommen werden. Die Sicherheit gegenüber äußeren Einflüssen ist ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen nicht gegeben. Die Lösbarkeit der Schrauben kann aufgrund von Verschmutzungen und Klebebändern beeinträchtigt sein. Die Verbindung wird daher als „teilweise wiederverwendbar“ eingestuft.

Tabelle 23: Ergebnis für Zuganker / Winkel

Zuganker / Winkel			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	2	1,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Gering	0,0	3	0,0
	V.8	Demontierbarkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3	1,5
<b>Gesamt</b>					<b>0,43</b>	

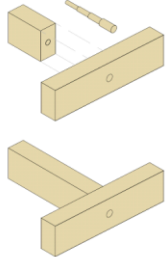
### 4.1.2 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen

#### 4.1.2.1 Holznagelverbindung

Die in Tabelle 24 veranschaulichte Holznagelverbindung erfordert neben dem abgestuften Holznagel auch Klebstoff zur Sicherung. Der Stoß der Elemente erfolgt stumpf, und die Bohrung kann mithilfe eines Stufenbohrers einfach hergestellt werden. Die Bohrung kann entweder im Werk oder auf der Baustelle erfolgen, wobei die Abstimmung Lage, Winkel und Tiefe der Bohrung unter den zusammenzufügenden Teilen entscheidend ist. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Bohrung auf der Baustelle durchgeführt wird, da die Teile dann nicht mehr auseinandergenommen werden müssen, wodurch ein Bearbeitungsschritt entfällt.

Aufgrund des erforderlichen Stufenbohrwerkzeugs und einer angenommenen mittleren Qualifikation der Arbeiter\*innen, wird die Montagefreundlichkeit als moderat eingestuft. Die Verbindung kommt ohne zusätzliche Schraubensicherung aus. Laut Hersteller ist der Buchennagel quer zur Faserrichtung mit bis zu ca. 10kN belastbar [41]. Die Auszugssicherung wird sichergestellt durch Einleimen. Bei der Bewertung der Demontagefreundlichkeit wird von einem mittleren Zeitaufwand für das Ausbohren oder Abtrennen des Nagels ausgegangen, beispielsweise mittels Stufenbohrer oder oszillierender Säge. Die Beschädigung des Holznagels führt jedenfalls dazu, dass dieser nicht wiederverwendet werden kann. Die angrenzenden Bauteile sind möglicherweise wieder verwendbar.

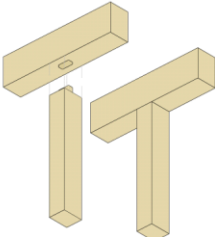
Tabelle 24: Ergebnis für Holznagelverbindung

Holznagelverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Einfach	1,0	2	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2	1,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Moderat	0,5	2	1,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Komplex	0,0	3	0,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Nicht	0,0	3	0,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,48</b>		

#### 4.1.2.2 Schlitz- und Zapfenverbindung

Die in Tabelle 25 dargestellte Schlitz- und Zapfenverbindung besteht bis auf die Schraubensicherung fast ausschließlich aus Holz und somit aus wenigen eher simplen Elementen. Sie kann mithilfe von Kettenstemmern, Sägen, Fräsmaschinen oder Abbundanlagen vorfertigt werden. Die Verbindung gilt als montagefreundlich aufgrund der guten Zugänglichkeit, der niedrig erforderlichen Qualifikation und der möglichen Verwendung von einfachen Werkzeugen. Das Ausziehen in eine Richtung wird durch die Schrauben verhindert. Auf Druck können vergleichsweise hohe Kräfte übertragen werden. Die Demontage ist einfach durchführbar. Probleme mit den Schrauben, wie Verschmutzung oder Abnutzung der Schraubenköpfe können dazu führen, dass die angrenzenden Bauteile abgeschnitten werden müssen. Wenn die Schrauben problemlos wieder ausgedreht werden können, ist die Wahrscheinlichkeit, dass man die Verbindung wiederverwenden kann, hoch.

Tabelle 25: Ergebnis für Schlitz- und Zapfen

Schlitz- und Zapfenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1	0,5
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3	1,5
<b>Gesamt</b>					<b>0,72</b>	

#### 4.1.2.3 Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung

Die in Tabelle 26 gezeigte Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung kommt ähnlich wie die Schlitz- und Zapfenverbindung mit den reinen Holzelementen und einer Schraubsicherung aus. Die Komplexität der Elemente ist aufgrund der Schwalbenschwanzform und der variablen Breite der Ausnehmung anspruchsvoll. Die Vorfertigung erfolgt mittels Oberfräse und Schablone oder Abbundanlage im Werk. Zeitaufwand und benötigte Qualifikation für die Montage sind gering da es sich um eine Steckverbindung handelt und lediglich einfaches Werkzeug erforderlich ist. Nach oben ist die Verbindung mittels Schrauben gesichert. Schwalbenschwanz-Zapfenverbindungen sind steif und belastbar. Der Zapfen ist durch das umliegende Holz geschützt. Die Demontage gilt als einfach und die Verbindung ist wiederverwendbar, wenn die Bauteildimensionen unverändert bleiben können.

Tabelle 26: Ergebnis für Schwalbenschwanz-Zapfen

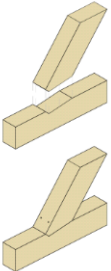
Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Strukturelle Festigkeit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Wenig	1,0	1	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Vollständig	1,0	3	3,0
<b>Gesamt</b>					<b>0,80</b>	

#### 4.1.2.4 Stirnversatzverbindung

Der in Tabelle 27 dargestellte Stirnversatz ist ein Verbindungstyp, der lediglich aus den beiden angrenzenden Bauteile besteht. Eine Lagesicherung kann mittels Schrauben und/ oder einem inkludierten Zapfen erfolgen. Ein inkludierter Zapfen erhöht die Komplexität der Verbindung, obwohl der Stirnversatz im Allgemeinen als Holzverbindung mit moderater Komplexität gilt. Die Verbindung ist nahezu vollständig vorfertigbar. Die Montagefreundlichkeit ist durch den geringen Zeitaufwand, die gute Zugänglichkeit, die niedrige Qualifikationsanforderung der Monteur\*innen und die Verwendung einfacher Werkzeuge gegeben. Die Köpfe der Schrauben, die für die Lagesicherung notwendig sind, können durch eingebaute Astkappen abgeschirmt werden oder auch sichtbar bleiben. Bei der Bewertung der Freiheitsgrade wird von einem

Stirnversatz ohne Zapfen ausgegangen. Die Demontage ist in der Regel, abhängig von der Lösbarkeit der Sicherungsschrauben, einfach. Aufgrund der geringen Anzahl an Schrauben wird die Wahrscheinlichkeit für eine Wiederverwendbarkeit als durchaus möglich eingestuft.

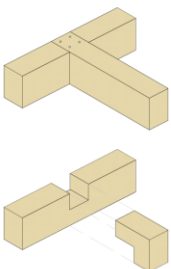
Tabelle 27: Ergebnis für Stirnversatz

Stirnversatz			Punkte	Gewichtung	Ergebnis
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,65</b>	

#### 4.1.2.5 Überblattungsverbindung

Überblattungen, wie in Tabelle 28 dargestellt, werden mit Hilfe von mehreren Schrauben gesichert. Die Komplexität der Elemente bleibt aufgrund der erforderlichen Bearbeitung übersichtlich. Abgesehen von der Verschraubung kann die Verbindung bereits im Werk vorgefertigt werden. Die Montage- sowie Demontagefreundlichkeit ist hoch, wenn eine gute Zugänglichkeit gegeben ist. Für die Montage- bzw. Demontage ist eine niedrige Qualifikation erforderlich und wird lediglich einfaches Werkzeug benötigt. Die Verbindung muss in zwei Richtungen mit Hilfe von Schrauben gesichert werden. Aufgrund der Querschnittsschwächung ist die Verbindung nur mäßig belastbar. Die Schraubenköpfe sind teilweise sichtbar. Auch diese Verbindung, abhängig von der Lösbarkeit der Schrauben, falls vorhanden, kann in den meisten Fällen wiederverwendet werden.

Tabelle 28: Ergebnis für Überblattung

Überblattung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis
	V.1	Anzahl der Elemente	Moderat	0,5	1,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Moderat	0,5	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3,0
	V.7	Schutz der Verbindung	Moderat	0,5	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Einfach	1,0	3,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Moderat	0,5	1,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Teilweise	0,5	3,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,57</b>	

#### 4.1.2.6 X-Fix L-Verbindung

Die in Tabelle 29 abgebildete X-fix L-Verbindung besteht aus zwei Holzverbindern und Klebstoff. Die Schwalbenschwanz-Fräsungen der zu verbindende Elemente ist anspruchsvoll und wird im Werk mittels Abbundmaschine vorgefertigt. Die Verbindung ist von der Innenseite aus zugänglich und kann auf der Baustelle mit geringem Zeitaufwand, niedriger Qualifikation und einfachem Werkzeug hergestellt werden. Die angrenzenden Bauteile (Platten) sind in alle

Richtungen gesichert. Es gelten Mindestanforderungen wie die 5-lagigkeit von Platten, generelle Mindeststärken von 100mm sowie eine Mindeststärken von 120mm bei Eckverbindungen [48]. Aufgrund des hohen Zeitaufwands, der schwierigen Zugänglichkeit, der erforderlichen hohen Qualifikation und der Notwendigkeit leistungsfähiger Sägen erscheint eine Demontage der Verbindung unrealistisch. Es ist zu erwarten, dass die Verbindungsmittel und auch die angrenzenden Bauteile bei der Demontage beschädigt werden, wodurch eine Wiederverwendung der Verbindung als unwahrscheinlich eingestuft wird.

Tabelle 29: Ergebnis für X-fix L

X-fix L-Verbindung			Punkte	Gewichtung	Ergebnis	
	V.1	Anzahl der Elemente	Wenige	1,0	2	2,0
	V.2	Komplexität	Moderat	0,5	2	1,0
	V.3	Vorfertigungsgrad	Hoch	1,0	2	2,0
	V.4	Montagefreundlichkeit	Einfach	1,0	2	2,0
	V.5	Freiheitsgrade	Fest	0,0	2	0,0
	V.6	Robustheit	Moderat	0,5	3	1,5
	V.7	Schutz der Verbindung	Hoch	1,0	3	3,0
	V.8	Demontierbarkeit	Komplex	0,0	3	0,0
	V.9	Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	Viel	0,0	1	0,0
	V.10	Wiederverwendbarkeit	Nicht	0,0	3	0,0
<b>Gesamt</b>				<b>0,50</b>		

### 4.1.3 Analyse und Diskussion der Ergebnisse

Bis auf Nagelplatten- und Balkenträgerverbindung, die beide mit 0,37 bewertet wurden, erreichen alle bewerteten Verbindungen einen Kreislaufscore von mindestens 0,43. Holzsystemverbinder mit 0,87 und Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung mit 0,80 erreichen die höchsten Werte in den Kategorien der Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln bzw. zimmermannsmäßigen Verbindungen. Darüber hinaus zeigen zimmermannsmäßige Verbindungen eine tendenziell etwas höhere Kreislauffähigkeit mit einem durchschnittlich um 8,23 % höheren Bewertungsergebnis im Vergleich zu Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln. Die Gegenüberstellung aller Ergebnisse ist in Abbildung 16 zusammengefasst.

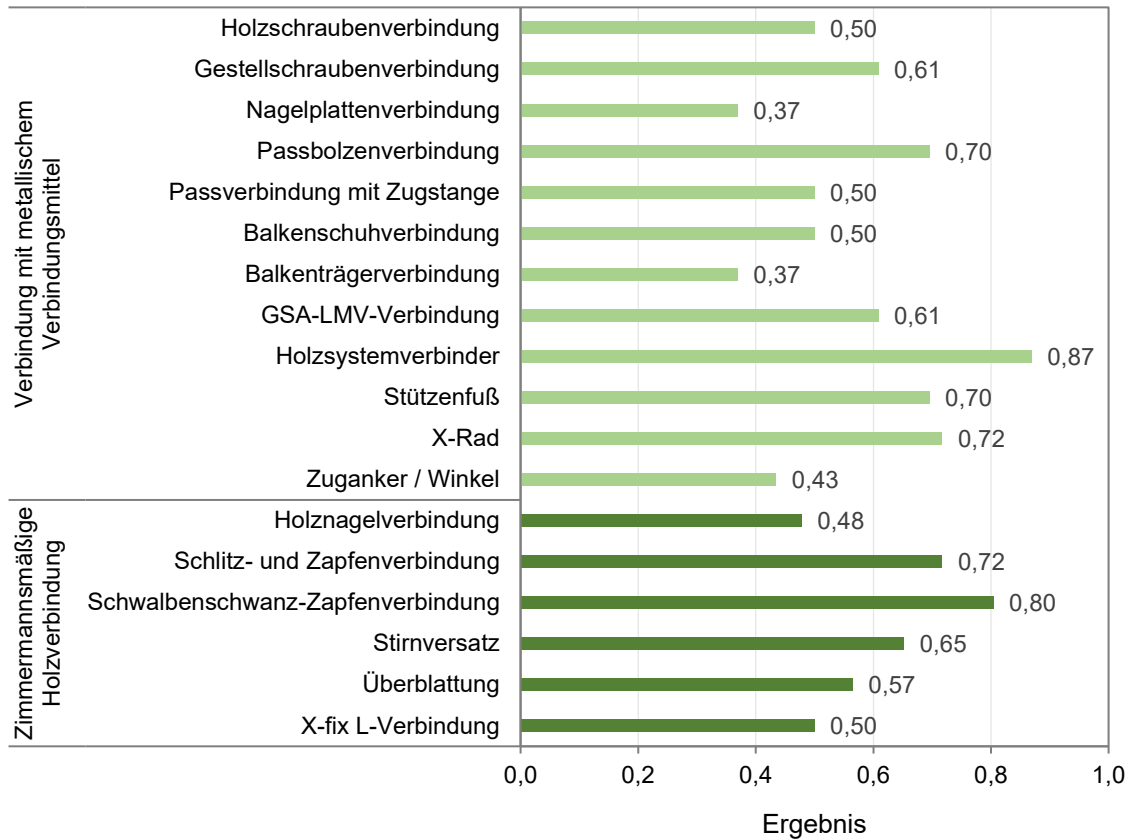


Abbildung 16: Bewertungsergebnisse der Verbindungen

Tabelle 30 stellt die Bewertung pro Indikator für die Verbindungen mit den schlechtesten und besten Ergebnissen prozentuelle gegenüber. Betrachtet man zum Beispiel Subindikator V.7. Schutz der Verbindung, bei dem eine maximale Punkteanzahl von 3 erreicht werden kann, so schneidet hier die Nageplattenverbindungen 0 % m schlechtesten ab. Diese niedrige Bewertung ist darauf zurückzuführen, dass die Verbindungsart vollständig etwigen äußeren Einflüssen ausgesetzt ist.

Hohe Werte sind hauptsächlich auf Faktoren wie einen hohen Vorfertigungsgrad, eine einfache Montage, hohe Sicherheitsstandards, und eine gute Wiederverwendbarkeit zurückzuführen. Umgekehrt sind niedrigere Werte mit Herausforderungen wie größerer Komplexität, geringerer Robustheit bzw. geringerem Schutz der Verbindung, eine hohe Menge an nicht wiederverwendbaren Materialien am Ende des Lebenszyklus verbunden.

Der Holzsystemverbinder erreicht bei 7 von 10 Subindikatoren die volle Punktezahl. Bis auf das Zusammenfügen der Teile und das Einschrauben des dazugehörigen Sperrschraubens kann die Holzsystemverbinder-Verbindung im Werk vollständig vorgefertigt werden. Das spart Zeit bei der Montage und minimiert den Aufwand bei der Demontage. Die Verbinder können auf Wunsch komplett demontiert oder auch auf dem Element verbleiben, um anschließend direkt wieder verbaut zu werden.

Tabelle 30: Vergleich der höchsten und niedrigsten Ergebnisse der Verbindungen

Indikator/ Verbindung	Nagelplattenverbindung	Balkenträgerverbindung	Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung	Holzsystemverbinder
Anzahl der Elemente	50%	50%	100%	50%
Komplexität	100%	50%	50%	50%
Vorfertigungsgrad	50%	50%	100%	100%
Montagefreundlichkeit	50%	50%	100%	100%
Freiheitsgrade	0%	0%	0%	50%
Robustheit	50%	100%	50%	100%
Schutz der Verbindung	0%	50%	100%	100%
Demontierbarkeit	50%	0%	100%	100%
Nicht wiederverwendbare Baukomponenten	50%	0%	100%	100%
Wiederverwendbarkeit	50%	0%	100%	100%
<b>Gesamt</b>	<b>0,37</b>	<b>0,37</b>	<b>0,80</b>	<b>0,87</b>

Die Vielseitigkeit einer Verbindung im Holzbau, d.h. seine Fähigkeit, verschiedene Bauelemente zu verbinden, ist zwar ein wichtiger Faktor, wurde jedoch nicht als Indikator aufgenommen. Vergleicht man die Vielseitigkeit von Verbindungen mit den Ergebnissen aus der präsentierten Bewertung (siehe Tabelle 31) so fällt auf, dass die vielseitigsten Verbindungen nicht die höchsten Bewertungen erhalten haben. Während beispielsweise der Holzsystemverbinder die höchste Bewertung erhält, kann er nur für Verbindungen von Balken verwendet werden. Im Gegensatz dazu kann die Balkenträgerverbindung, obwohl sie weniger gut abschneidet, Verbindungen von Balken mit Balken (BB), von Balken mit Stützen (BS) und von Knotenpunkten (Knoten) verwendet werden.

Tabelle 31: Vielseitige Verbindungen

	Verbindung	Platte	BB	BS	Knoten	Score
<b>Verbindung mit metallischem Verbindungsmittel</b>	Holzschraubenverbindung	x	x	x		0,50
	Gestellschraubenverbindung	x				0,61
	Nagelplattenverbindung			x	x	0,37
	Passbolzenverbindung				x	0,70
	Passverbindung mit Zugstange				x	0,50
	Balkenschuhverbindung		x	x		0,50
	Balkenträgerverbindung		x	x	x	0,37
	GSA-LMV-Verbindung				x	0,61
	Holzsystemverbinder		x			0,87
	Stützenfuß			x		0,70
	X-Rad	x				0,72
	Zuganker / Winkel	x	x	x		0,43
	<b>Zimmermannsmäßige Holzverbindung</b>	Holznagelverbindung	x		x	
Schlitz- und Zapfenverbindung				x	x	0,72
Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung			x			0,80
Stirnversatz					x	0,65
Überblattung			x			0,57
X-fix L-Verbindung		x				0,50

Eine statistische Analyse der Ergebnisse zeigt einen Durchschnittswert aller Verbindungen (0,59) und eine Standardabweichung (0,139) auf. Auf dieser Basis wurden die Verbindungen in drei Kategorien eingeteilt: Werte bis 0,45 – geringe Kreislauffähigkeit, Werte von 0,46 bis

0,72 – moderate Kreislauffähigkeit und über 0,73 als hohe Kreislauffähigkeit, klassifiziert. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Abbildung 17 dargestellt mit Verbindungen mit niedriger Kreislauffähigkeit in Rot markiert, mit mittlerer in Gelb und mit hoher in Grün.

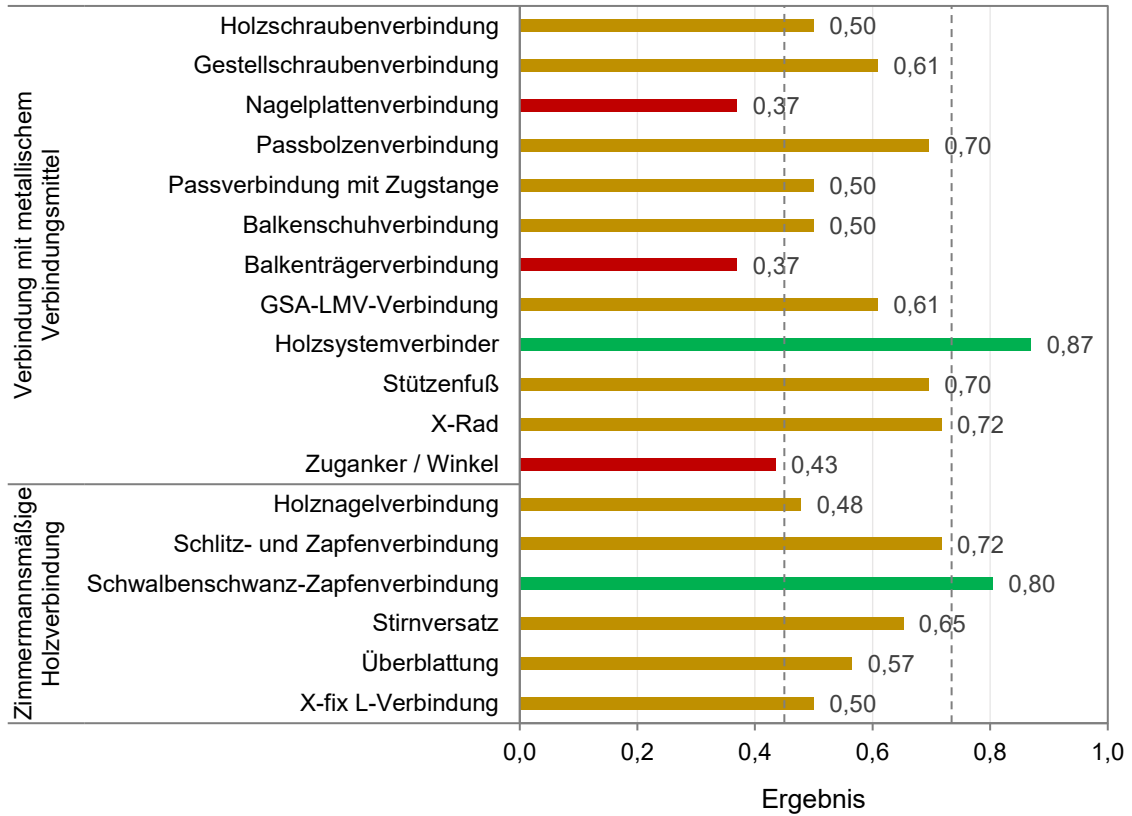


Abbildung 17: Kumuliertes Gesamtergebnis für alle Indikatoren

## 5 Fazit

Basierend auf einer Literaturrecherche sowie auch einer weiterführenden Forschungsarbeit, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde, wurde ein erster Entwurf für ein Bewertungssystem für die Kreislauffähigkeit von Verbindungsmitteln im konstruktiven Holzbau erarbeitet. Das Bewertungssystem besteht aus 10 Indikatoren ((V.1) Anzahl der Elemente, (V.2) Komplexität der Elemente, (V.3) Vorfertigungsgrad, (V.4) Montagefreundlichkeit, (V.5) Freiheitsgrad, (V.6) Robustheit, (V.7) Schutz der Verbindung, (V.8) Demontierbarkeit, (V.9) Nicht wiederverwendbare Baukomponenten und (V.10) Wiederverwendbarkeit. Diese können jeweils ein Bewertungsergebnis zwischen 0 und 1 erreichen und werden in weiterer Folge unter Berücksichtigung einer Gewichtung (0 – 3) zu einem kumulierten Gesamtergebnis zusammengefasst. Die Indikatoren V.6, V.7, V.8 und V.10 werden als am relevantesten angesehen und mit dem Faktor 3 gewichtet. V.9 wird aufgrund der geringeren Relevanz lediglich mit dem Faktor 1 gewichtet. Alle restlichen Indikatoren V.1, V.2, V.3, V.4 und V.5 werden mit dem Faktor 2 gewichtet.

Es ist anzumerken, dass die Bewertung teils subjektiv eingestuft werden muss. Für die Bewertung und auch eine realistische Einschätzung ist umfassendes Fachwissen notwendig. Dies betrifft die Planung und insbesondere die Ausführung. Es wird daher empfohlen die Indikatoren noch weiter zu detaillieren und somit zu objektivieren. Das vorliegende System umfasst einen Erstentwurf der mit beschränkten Mitteln erarbeitet wurde. Eine Detaillierung erfordert einen deutlich umfassenderen Zeit- und Ressourcenaufwand.

Im Rahmen der Studie wurden testweise 18 Verbindungstypen bewertet. Die Ergebnisse bewegen sich für die meisten Verbindungen in einem Kreislauffähigkeits-Score zwischen 0,45 und 0,74. Negative Ausreißer (0,37) sind Nagelplatten- und Balkenträgerverbindungen, während Holzsystemverbinder (0,87) und Schwalbenschwanz-Zapfenverbindungen (0,80) vergleichsweise gut abschneiden. Zimmermannsmäßige Verbindungen erreichen eine um 8,23 % bessere Bewertung im Vergleich zu Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln. Gute Gesamtbewertungsergebnisse, kumuliert aus den gewichteten Teilindikatoren, resultieren hauptsächlich aus einer guten Beurteilung bei V.3, V.4, V.6, V.9 und V.10. Im Gegensatz dafür führen niedrige Werte bei V.2, V.6, V.9 und V.10 zu den niedrigsten Bewertungen. Des Weiteren zeigt sich, dass die Lösbarkeit von Schrauben einen zentralen Fokus bei mehreren Indikatoren einnimmt. Aktuell liegt bei den Herstellern, zumindest soweit den Studienautor\*innen bekannt, keine zentraler Fokus auf einen mögliche Rückbau von Schrauben.

## 6 Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise

Es handelt sich hier um einen Erstentwurf eines Bewertungssystem für die Kreislauffähigkeit von Verbindungen im konstruktiven Holzbau. Vor einer breiteren Anwendung ist es notwendig dieses weiterzuentwickeln, zu optimieren und auch die Zusammenstellung und den Inhalt der Indikatoren nochmals kritisch zu hinterfragen. Ein zentraler Punkt ist auch die detailliertere Beschreibung der Indikatoren. Nur so kann gewährleistet werden, dass alle relevanten Aspekte abgedeckt sind und der subjektive Einfluss der Bewertenden minimiert wird.

Darüber hinaus sind umfassende praktische Versuche erforderlich, um die Indikatoren weiter zu schärfen und die Skalierung sowie die Grenzen der Bewertung klarer zu definieren. Solche praktischen Tests tragen wesentlich dazu bei, die Zuverlässigkeit und Anwendbarkeit des Bewertungssystems zu verbessern. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere Schrauben einen zentralen Fokus einnehmen und in diesem Bereich weiterer Forschungsbedarf besteht.

Die bisher vorgestellte Arbeit bezieht sich ausschließlich auf Verbindungen im Holzbau. Es ist von großer Bedeutung, diese Erkenntnisse in einem weiteren Schritt mit den parallel beauftragten Studien beim IBO (Fokus auf End-of-Life) und bei Koppelhuber und Partner (Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Bauteilen) zusammenzuführen und zu einem gesamtheitlichen Bewertungssystem für die Kreislauffähigkeit von Holzbauten weiterzuentwickeln.

## Anhang

### Holzschraubenverbindung

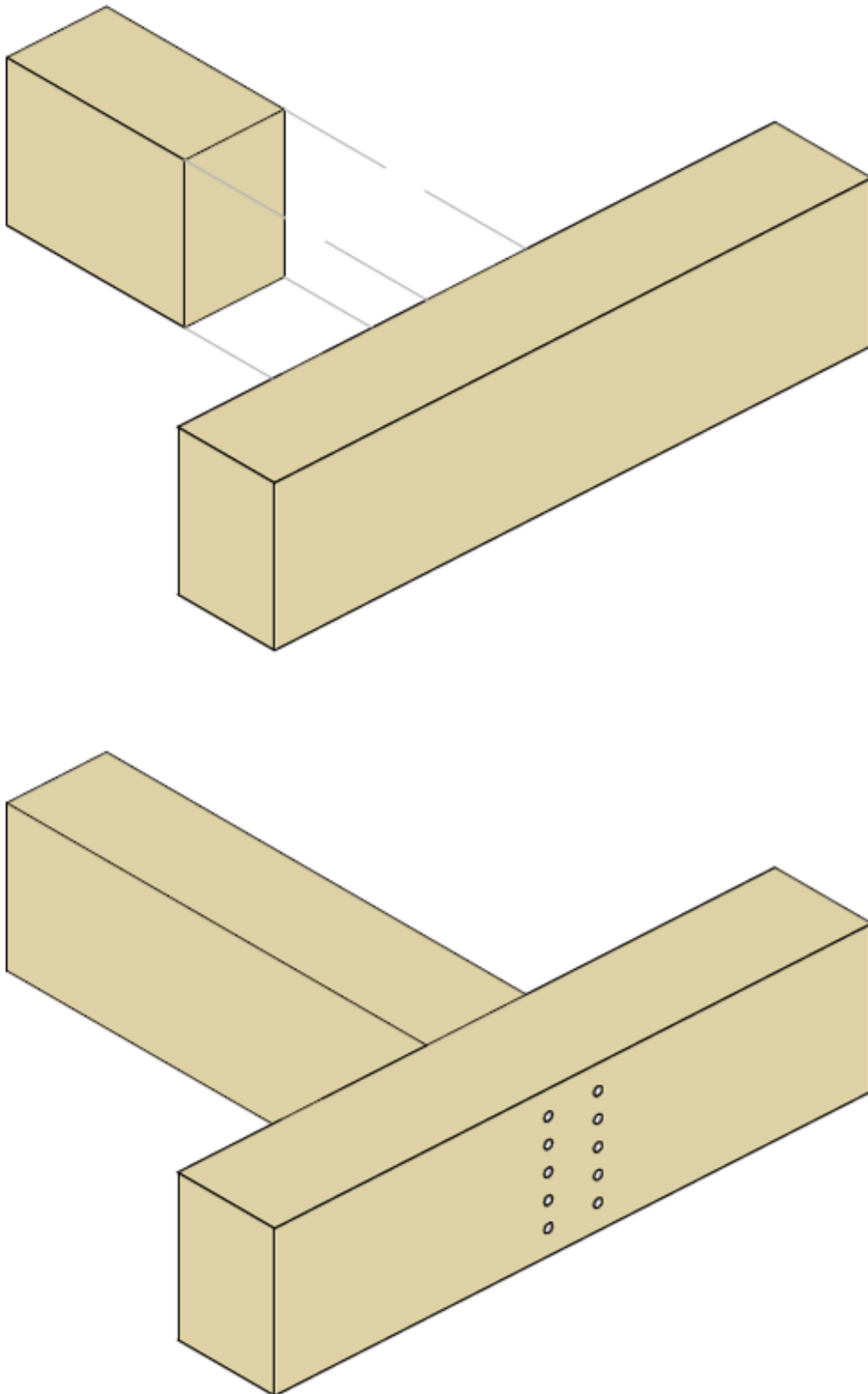


Abbildung 18: Holzschraubenverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Gestellschraubenverbindung

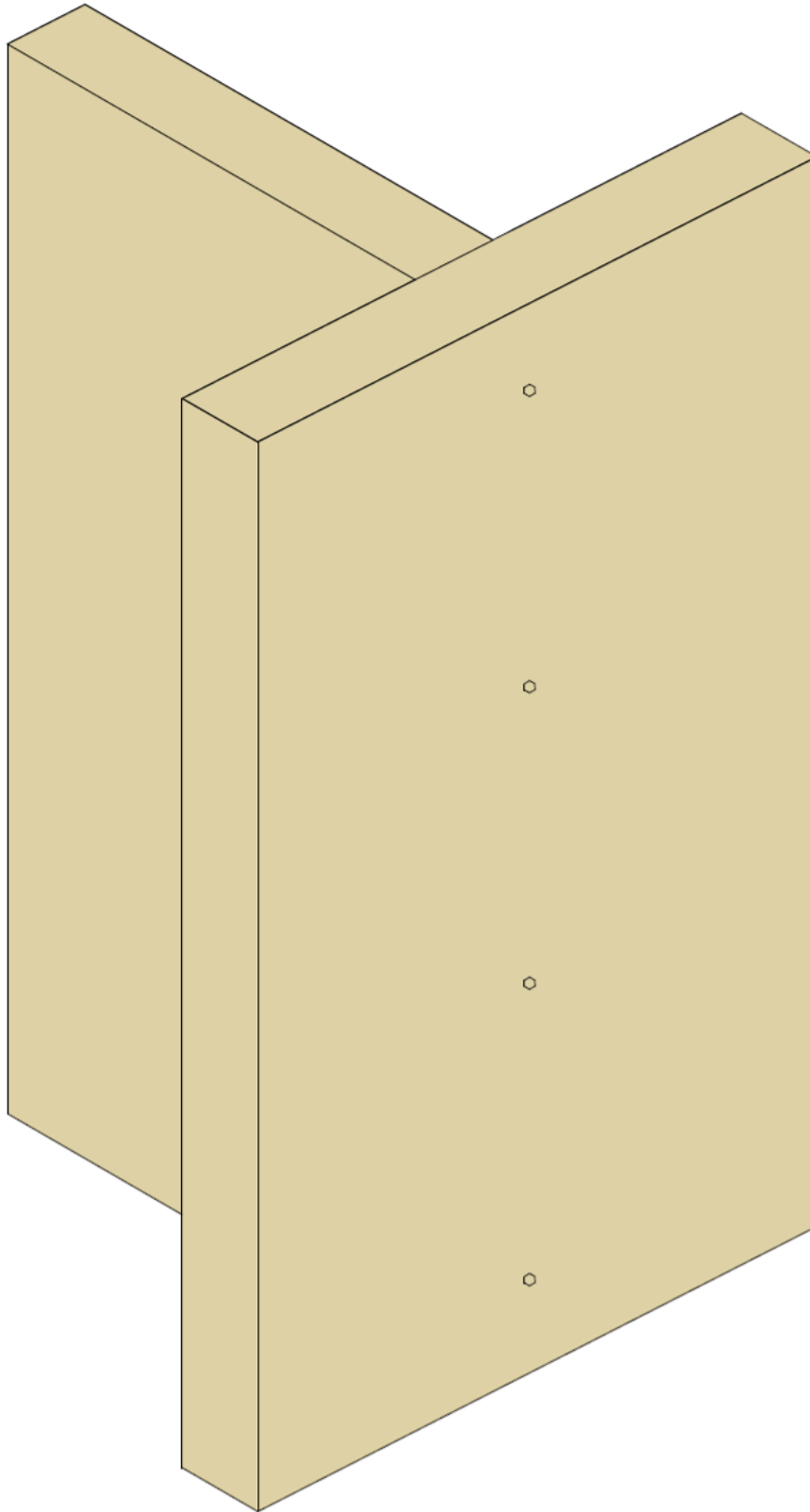


Abbildung 19: Gestellschraubenverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Nagelplattenverbindung

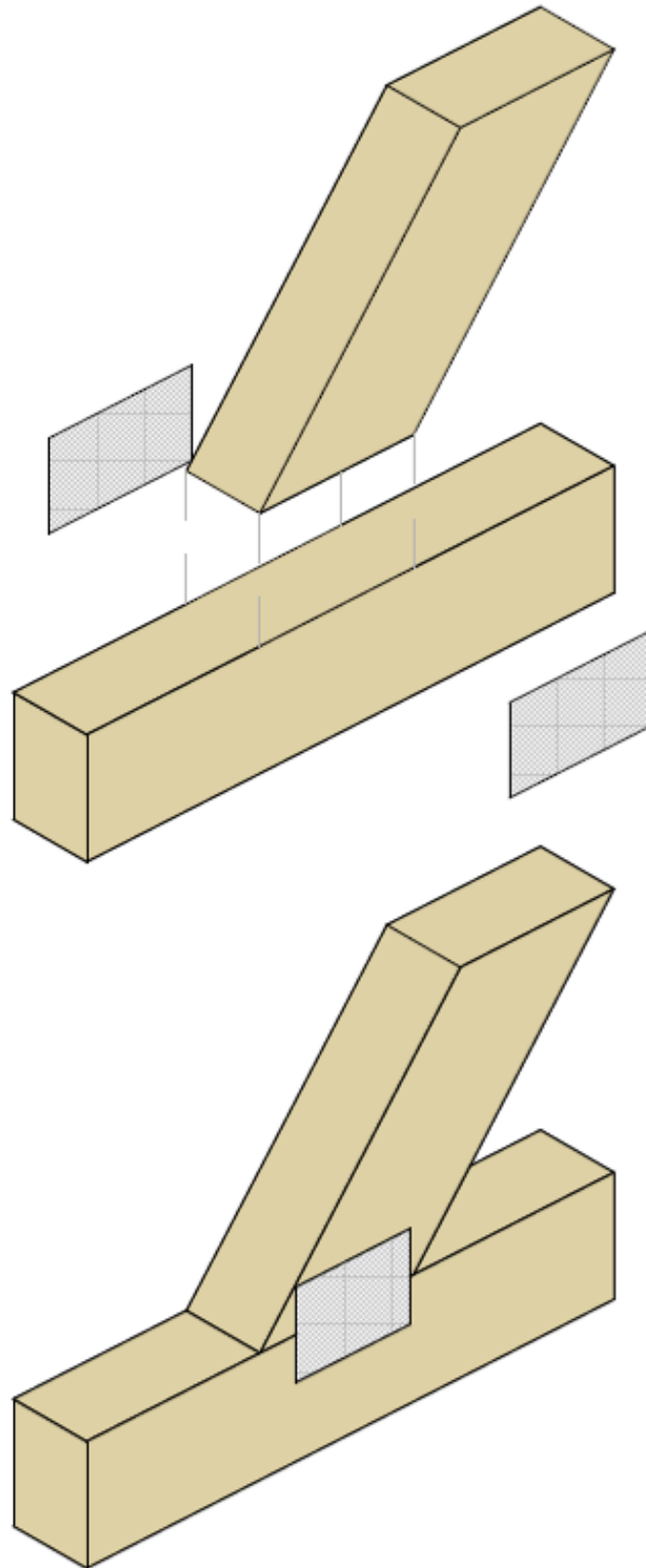


Abbildung 20: Nagelplattenverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Passbolzenverbindung

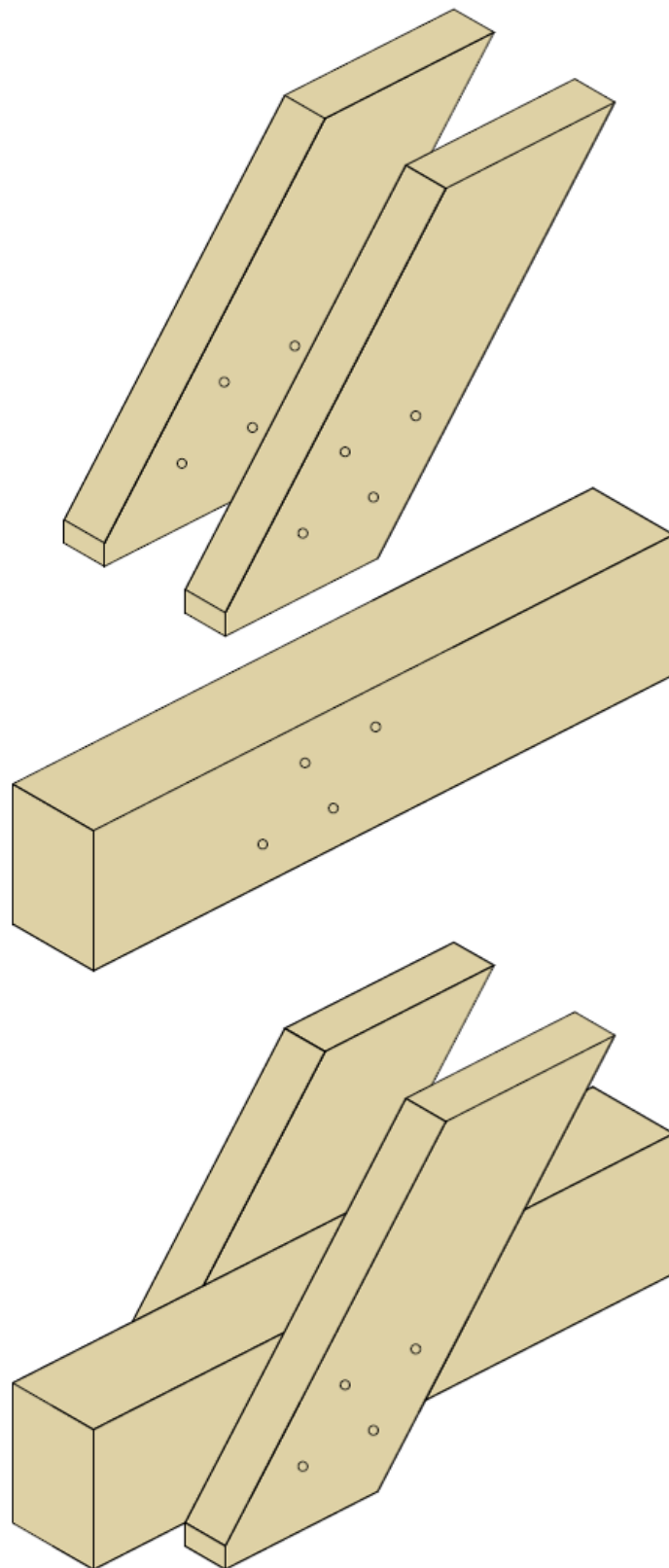


Abbildung 21: Passbolzenverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Passverbindung mit Zugstange

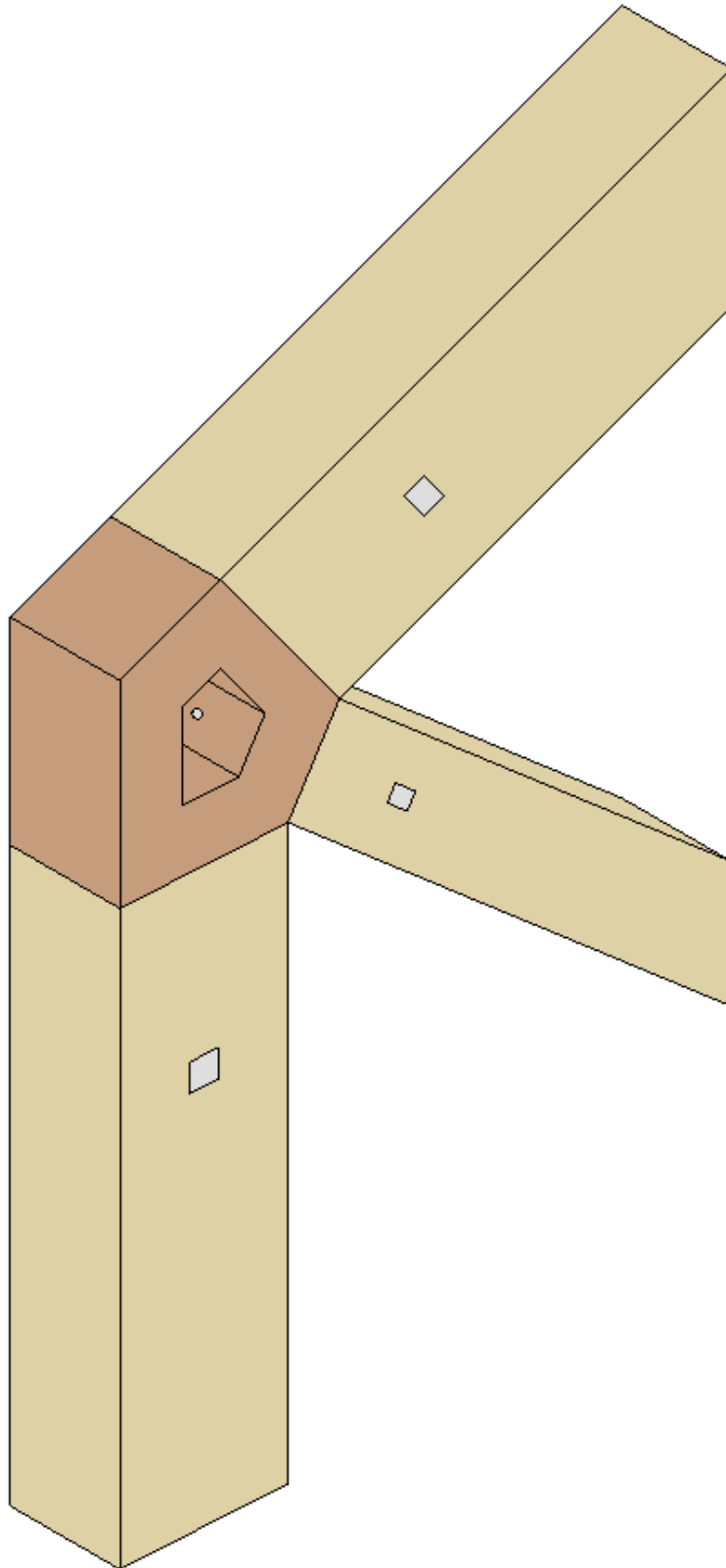


Abbildung 22: Passverbindung mit Zugstange (vergrößerte Ansicht)

## Balkenschuhverbindung

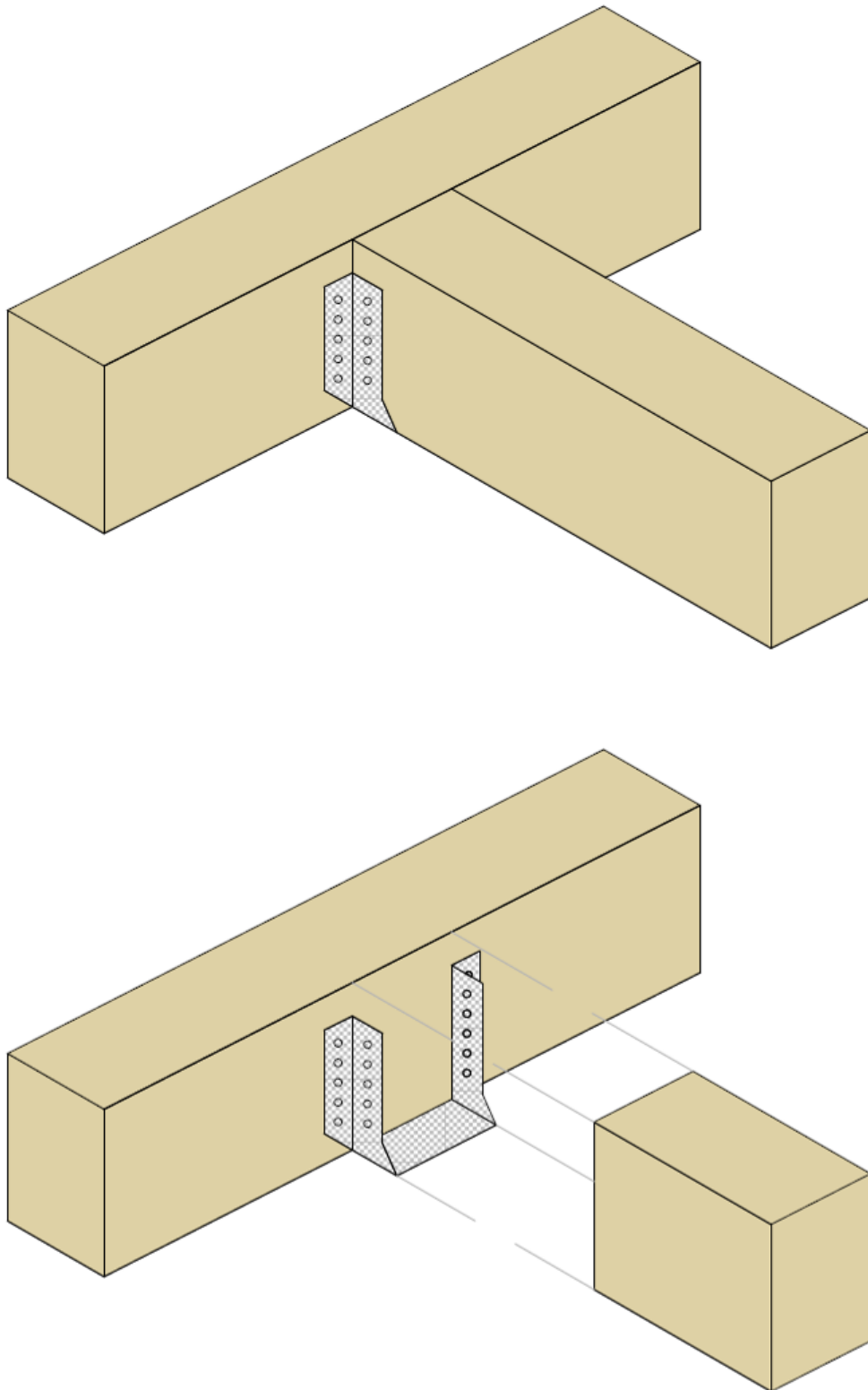


Abbildung 23: Balkenschuhverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Balkenträgerverbindung

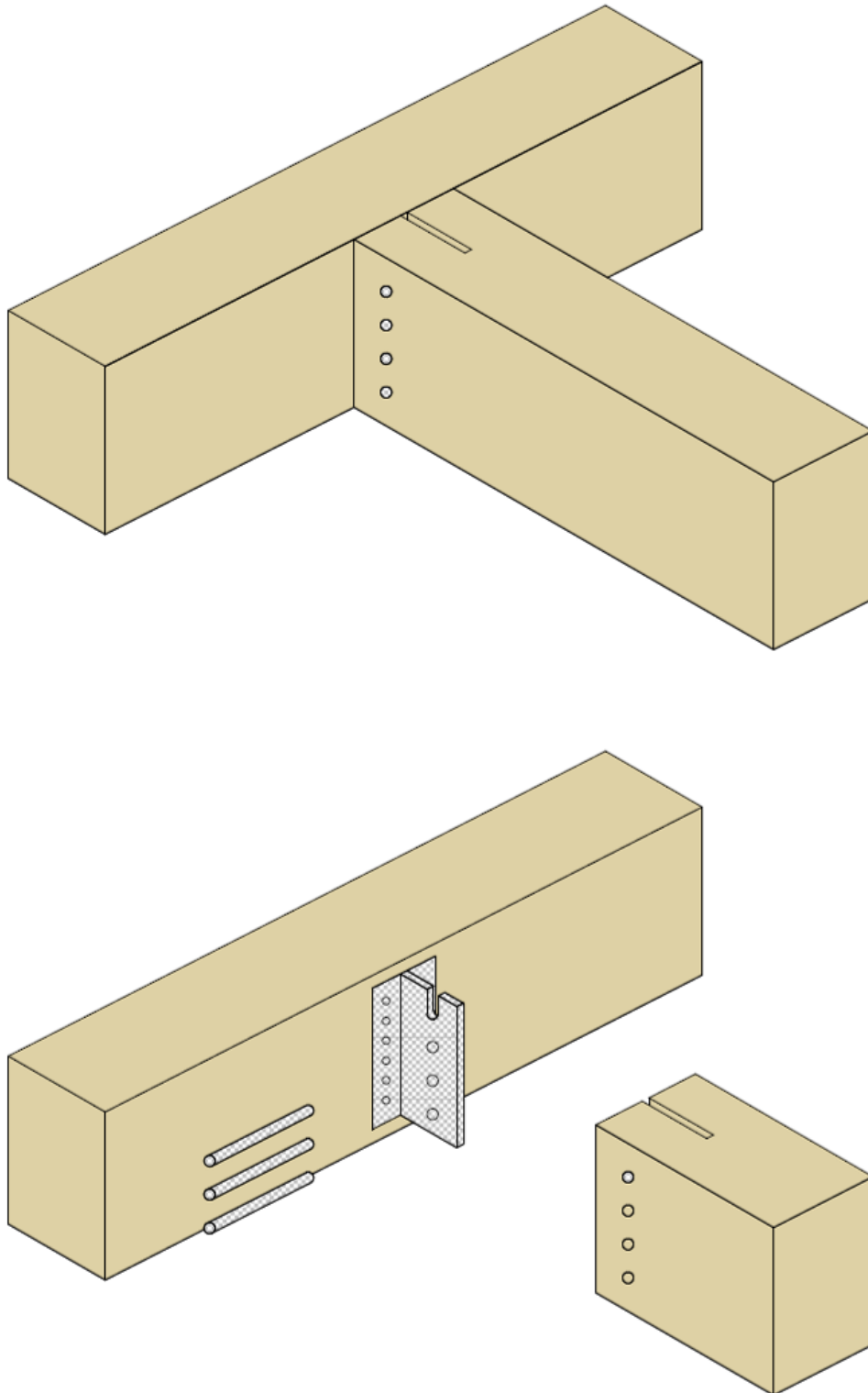


Abbildung 24: Balkenträgerverbindung (vergrößerte Ansicht)

## GSA-LMV-Verbindung

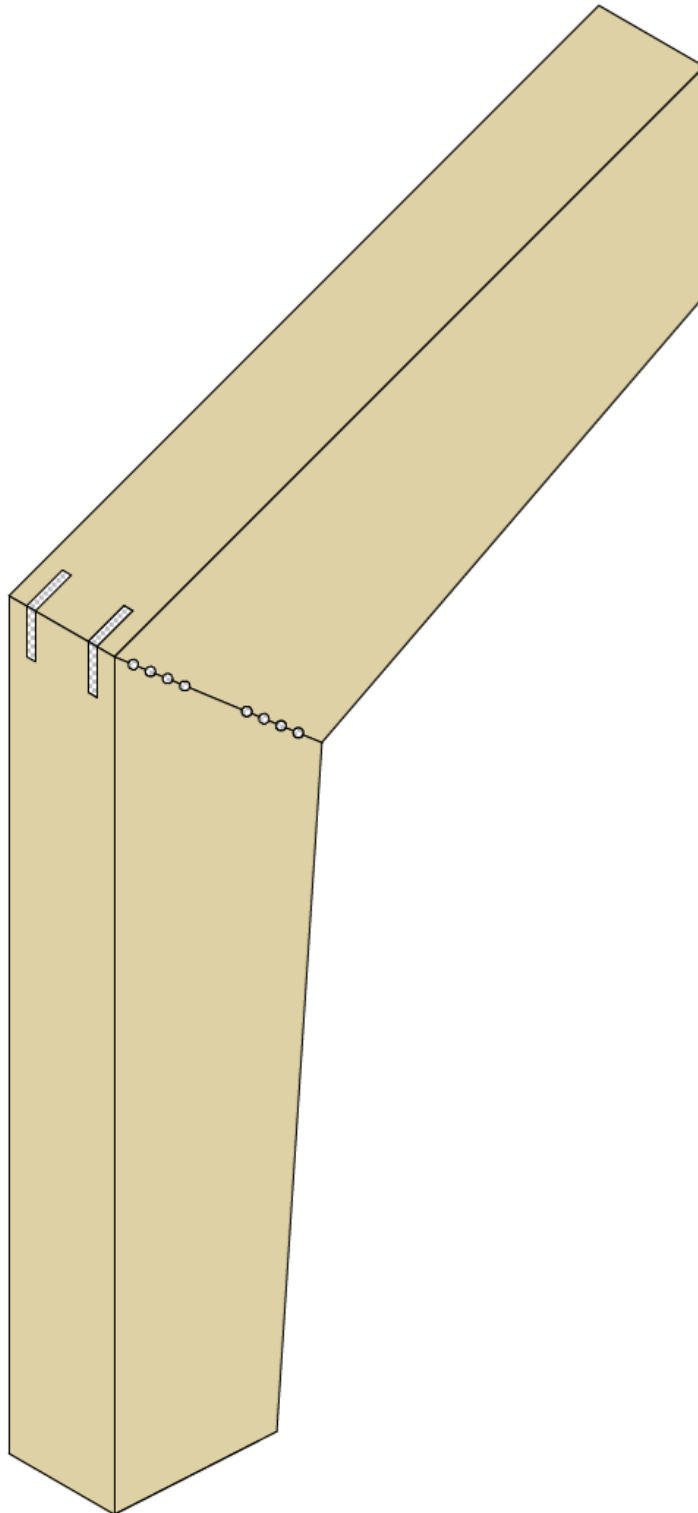


Abbildung 25: GSA-LMV (vergrößerte Ansicht)

## Holzsystemverbindung

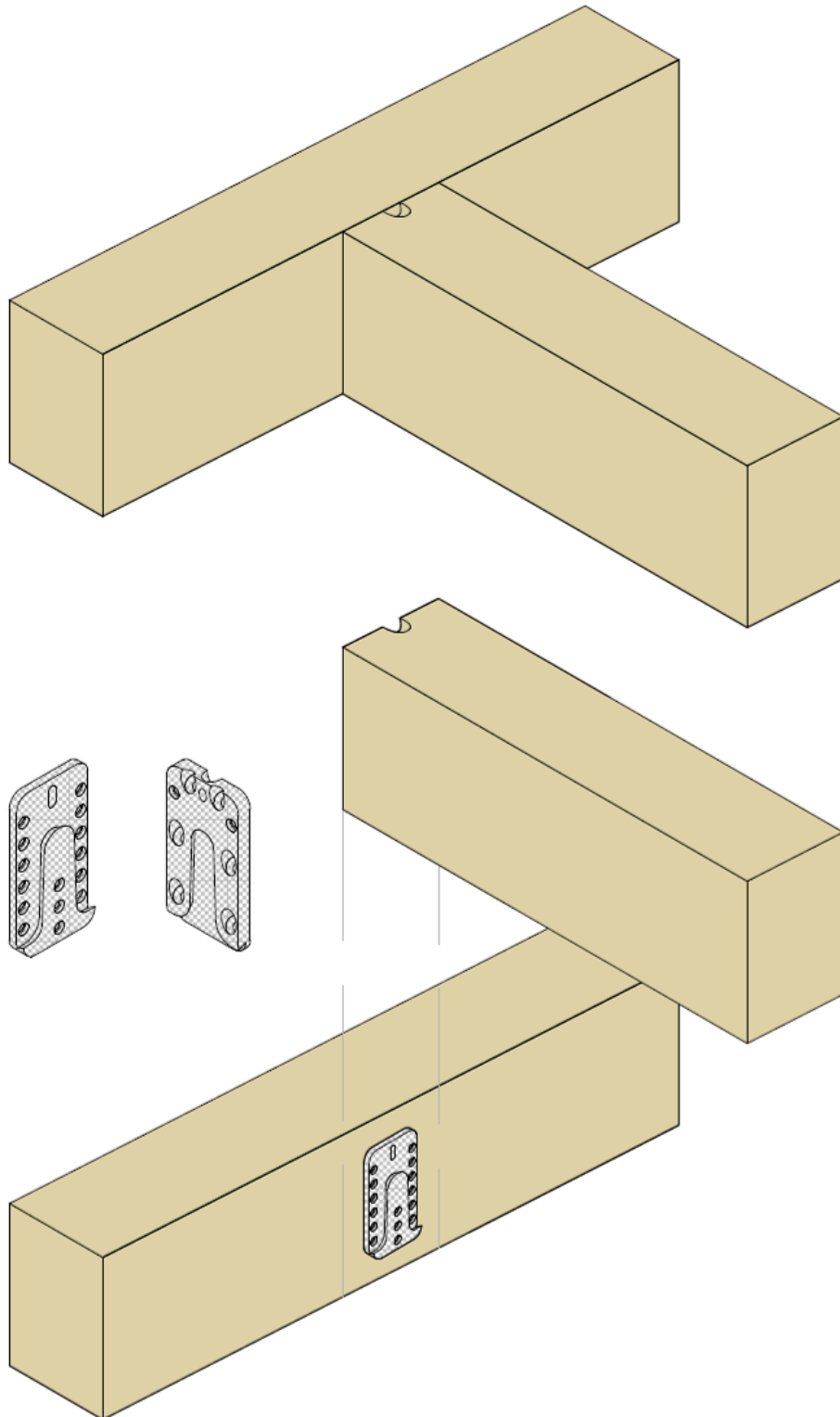


Abbildung 26: Holzsystemverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Stützenfußverbindung

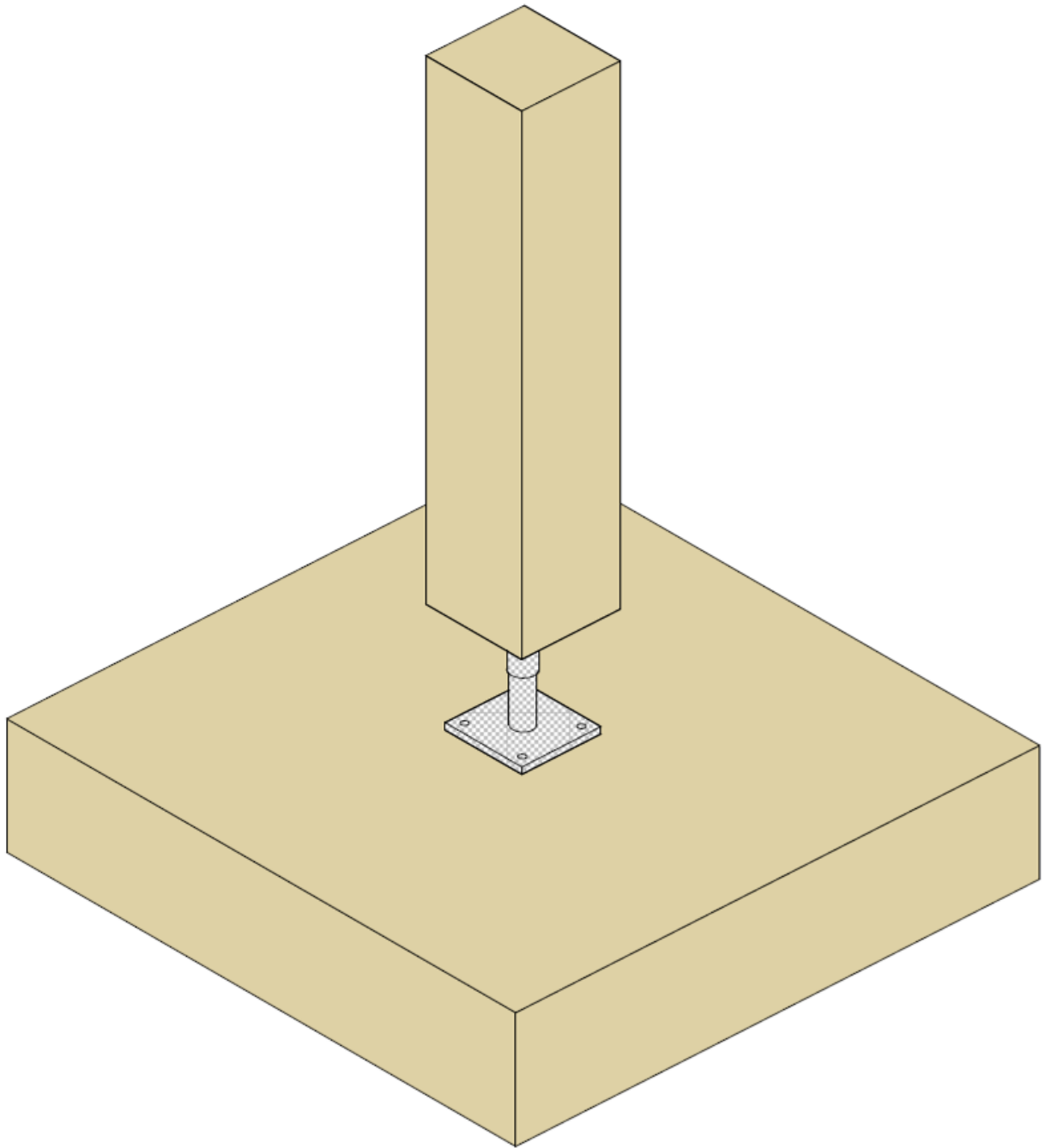


Abbildung 27: Stützenfußverbindung (vergrößerte Ansicht)

## X-Rad Verbindung

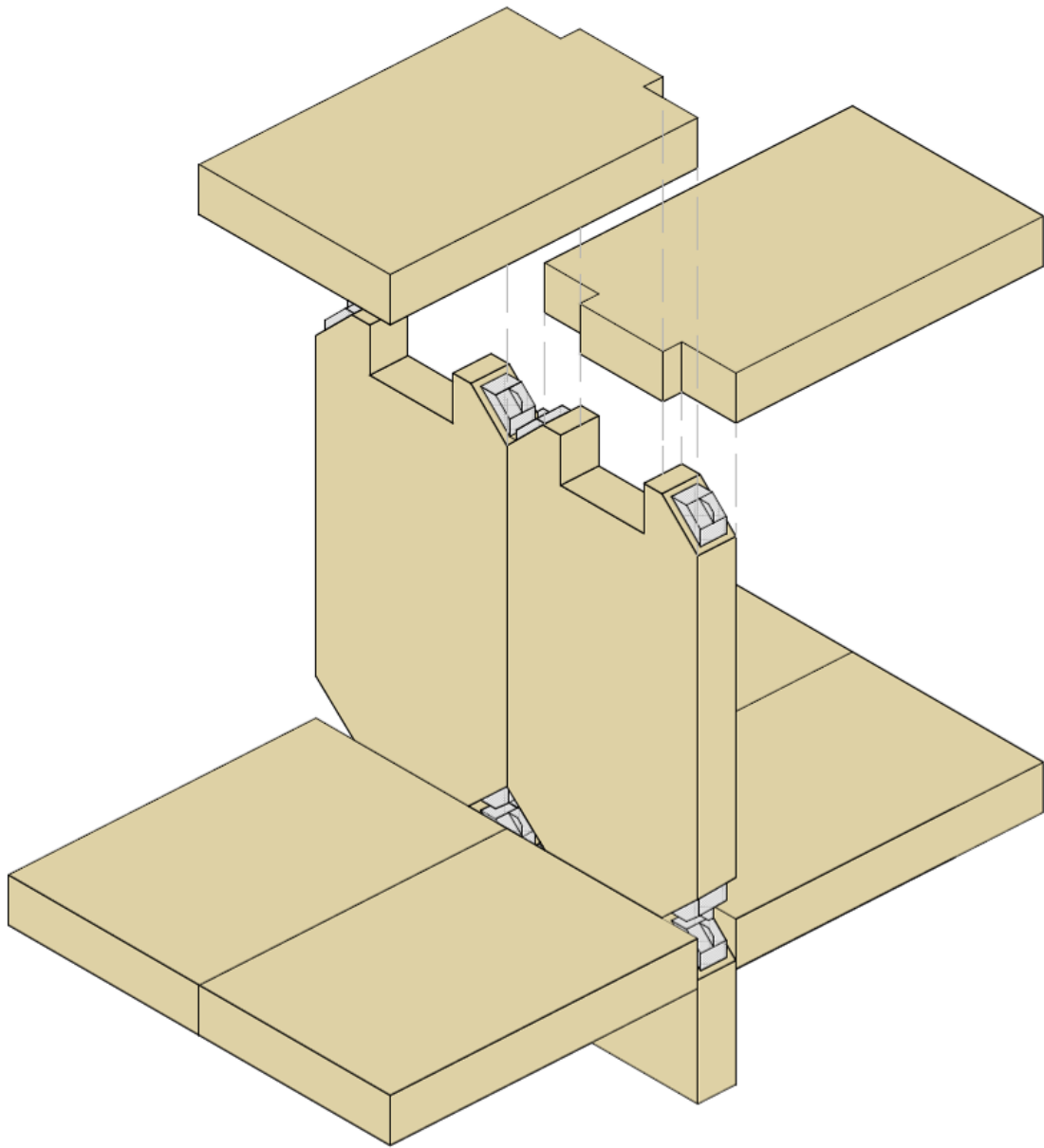


Abbildung 28: X-Rad (vergrößerte Ansicht)

## Zuganker- / Winkelverbindung

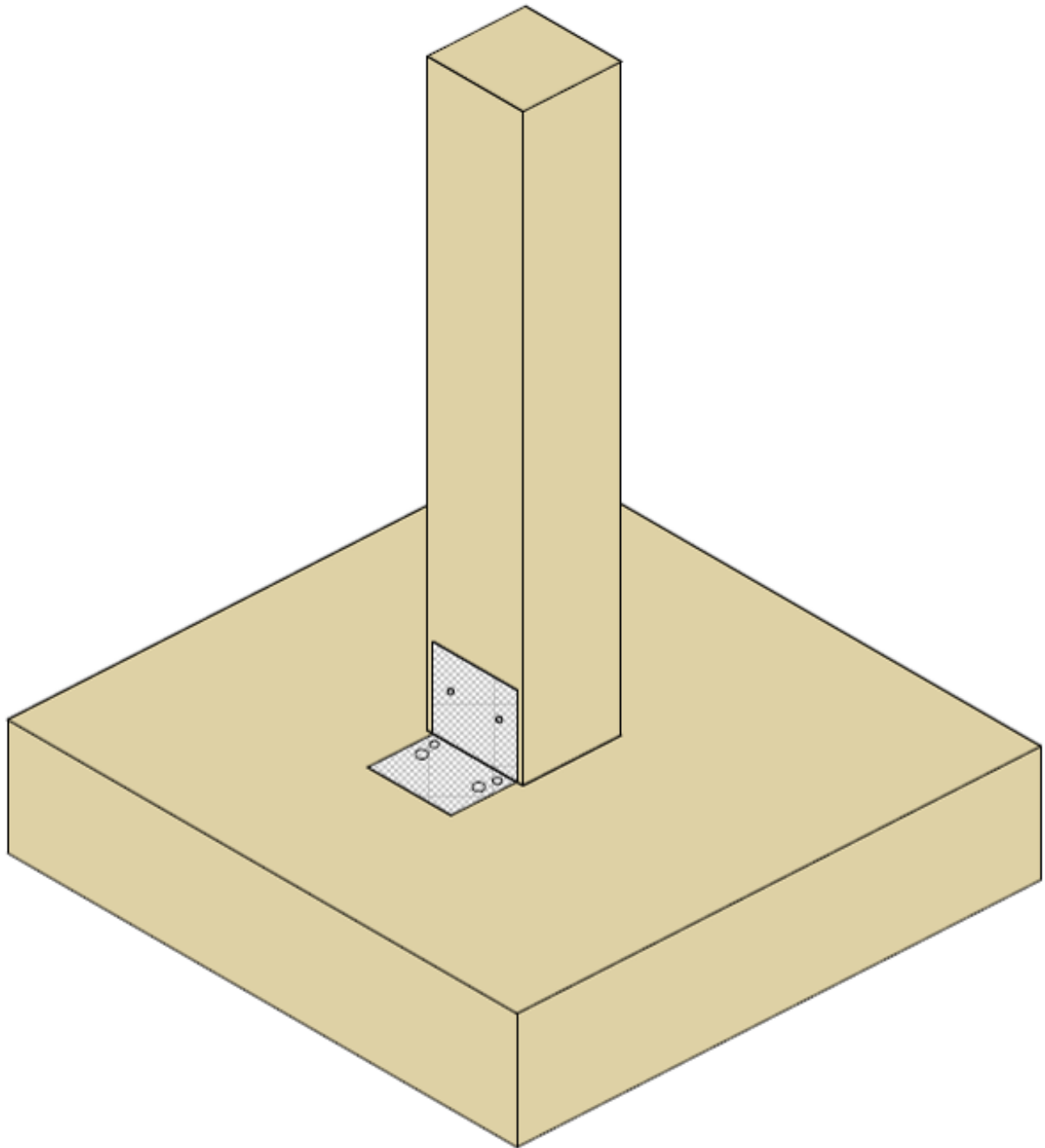


Abbildung 29: Zuganker / Winkel (vergrößerte Ansicht)

## Holznagelverbindung

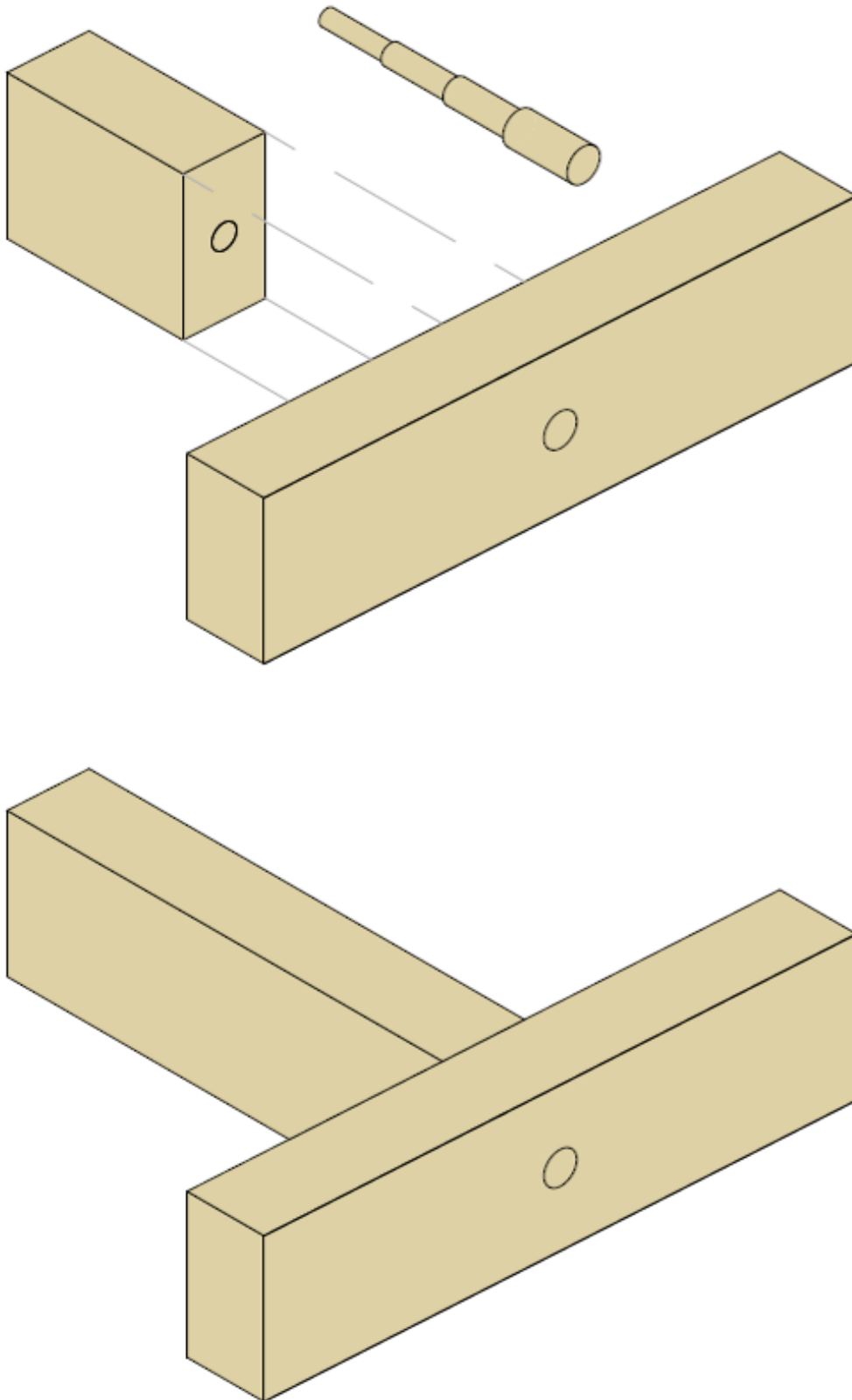


Abbildung 30: Holznagelverbindung (vergrößerte Ansicht)

## Schlitz- und Zapfenverbindung

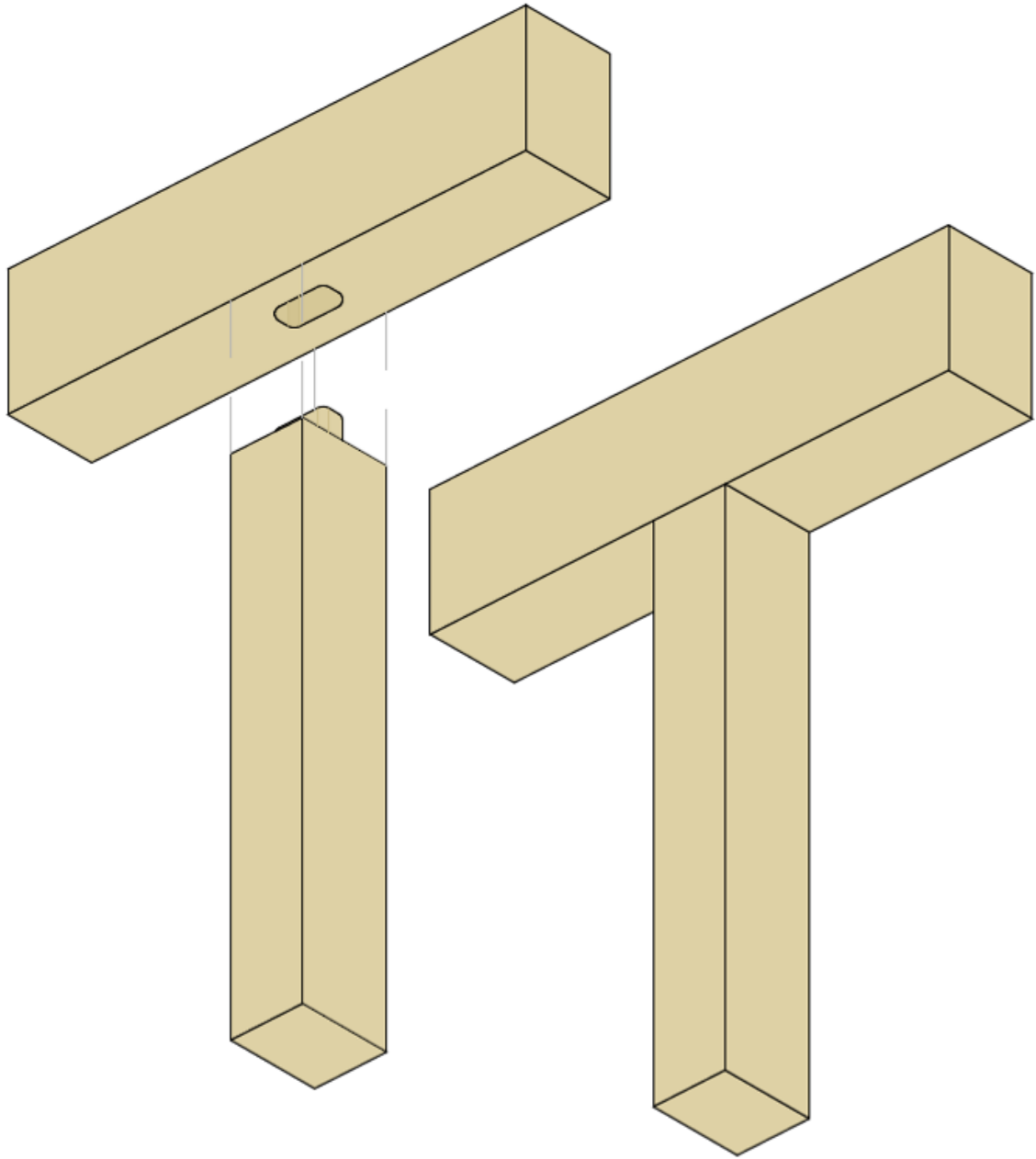


Abbildung 31: Schlitz- und Zapfen (vergrößerte Ansicht)

## Schwalbenschwanz-Zapfenverbindung

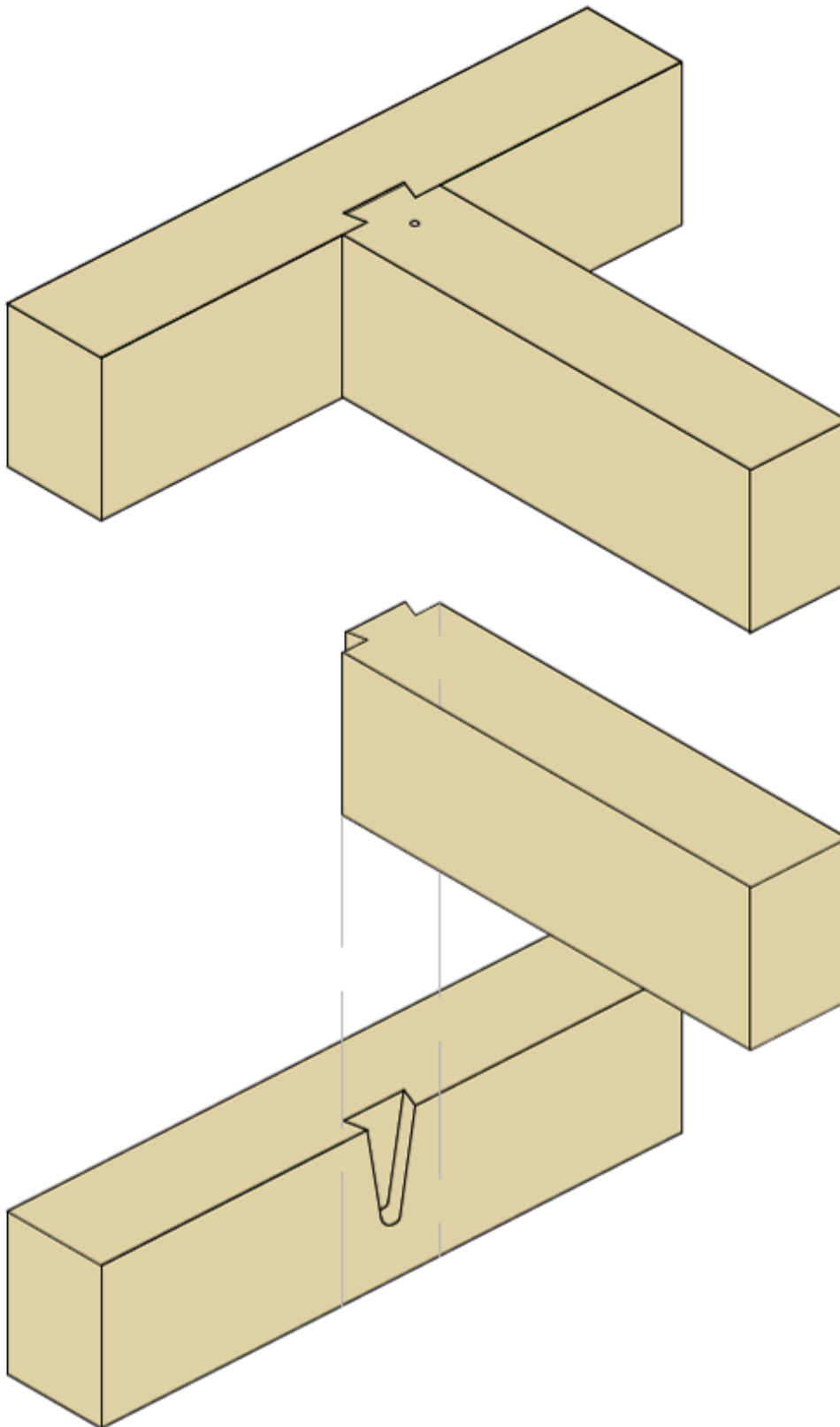


Abbildung 32: Schwalbenschwanz-Zapfen (vergrößerte Ansicht)

## Stirnversatzverbindung

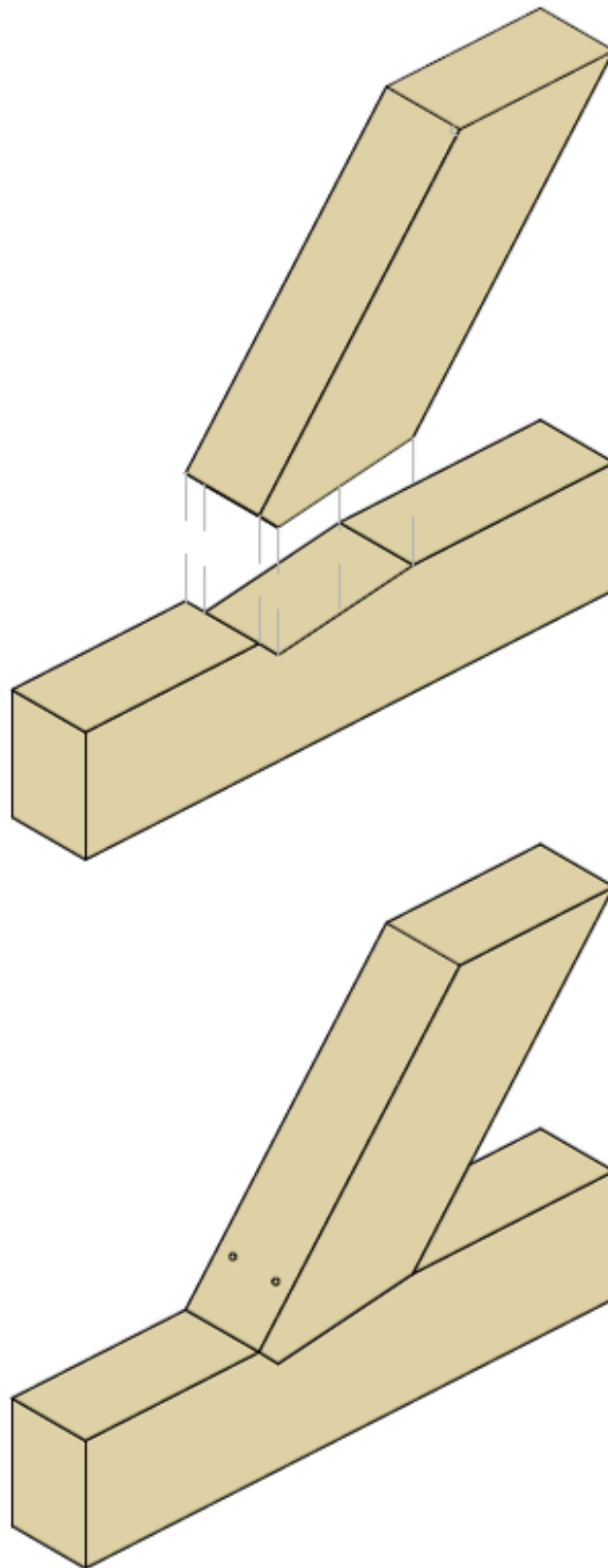


Abbildung 33: Stirnversatz (vergrößerte Ansicht)

## Überblattungsverbindung

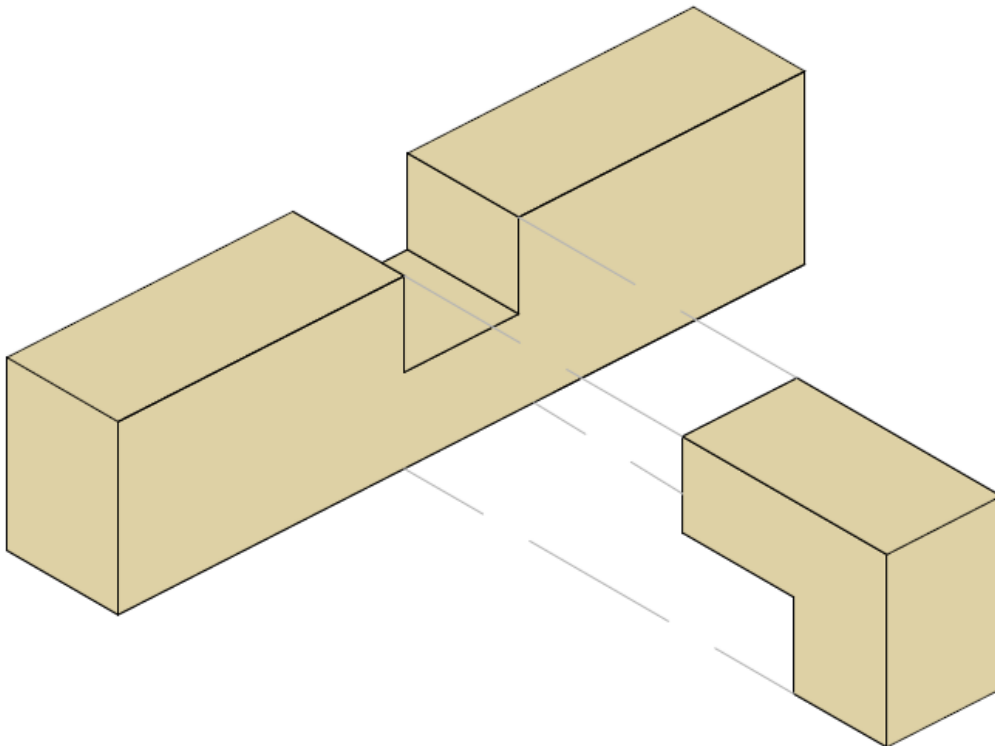
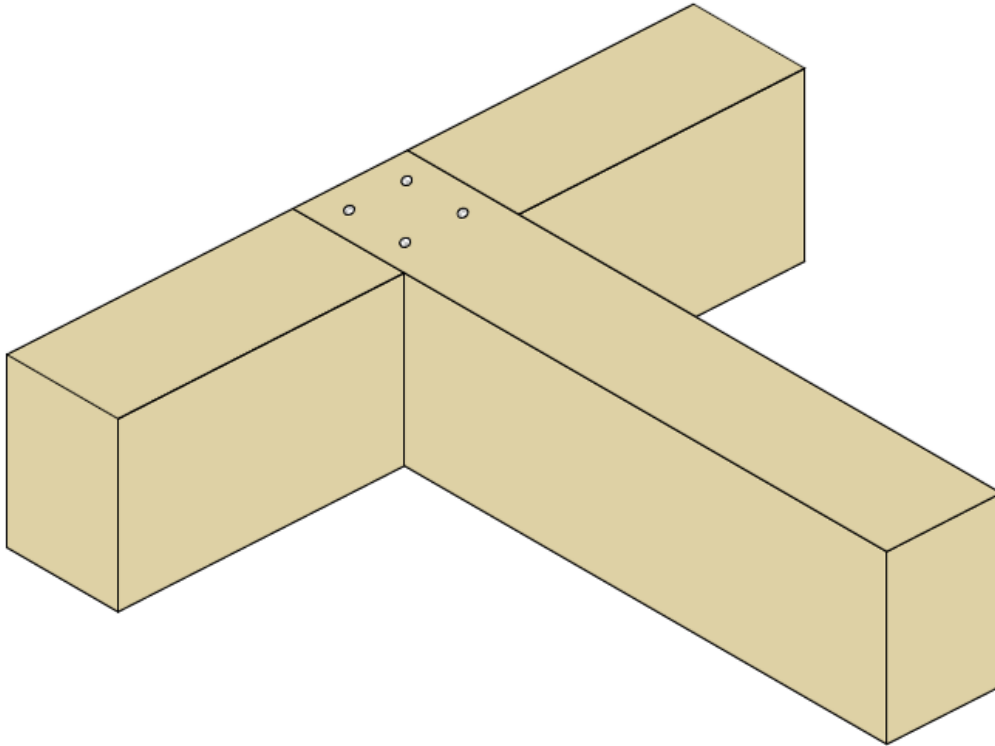


Abbildung 34: Überblattung (vergrößerte Ansicht)

## X-Fix L-Verbindung

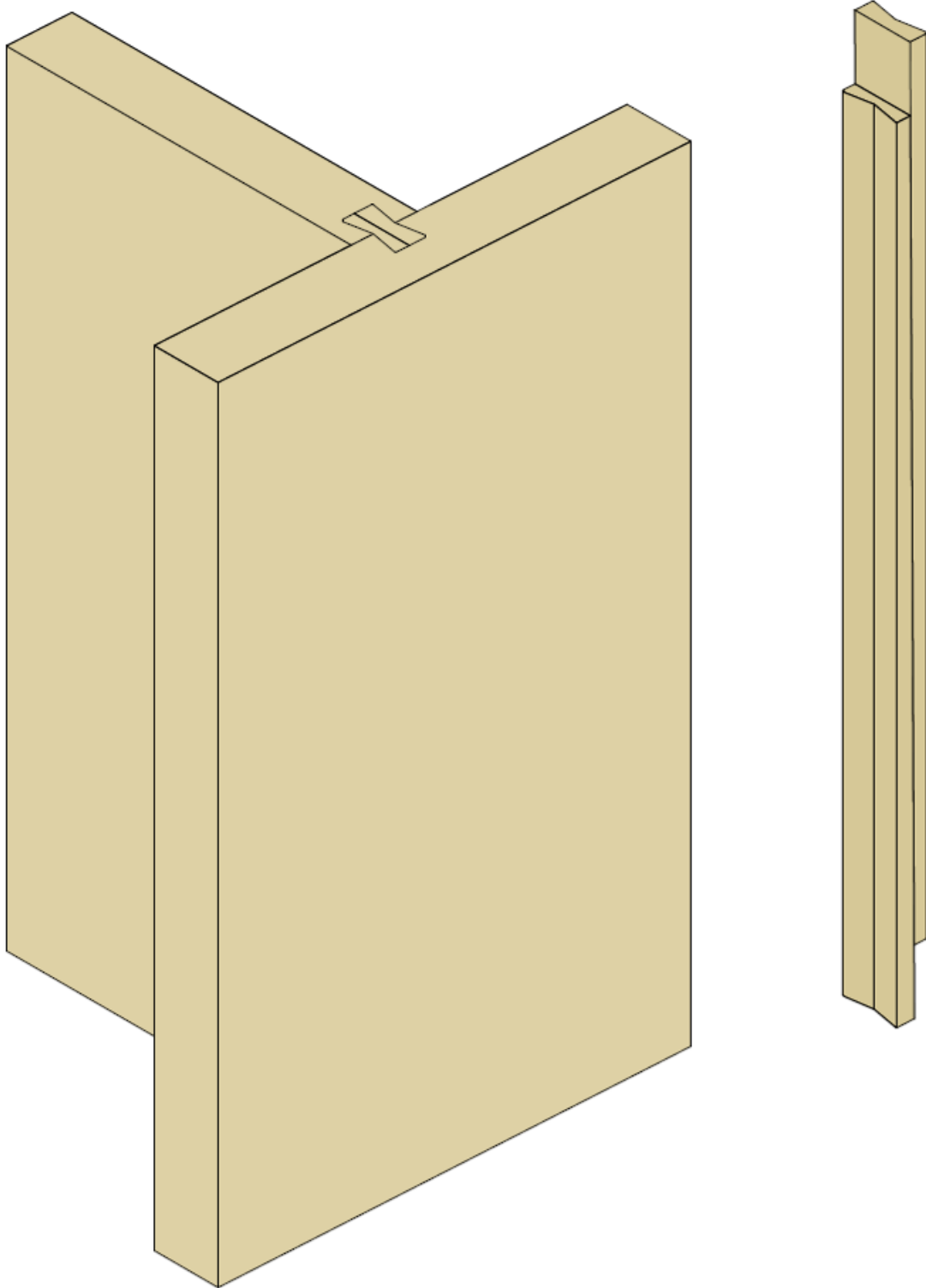


Abbildung 35: X-Fix L (vergrößerte Ansicht)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des ZiFa 1.0 Bewertungssystems - Orientierung der Indikatoren an der EU-Abfallrahmenrichtlinie	6
Abbildung 2: Österreichische Abfallverteilung nach Kategorien aus dem Jahr 2022 [%]; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)	9
Abbildung 3: Aufkommen, Import, Export und Verbleib von Holzabfällen in Österreich, 2022; Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)	11
Abbildung 4: Abfallhierarchie	11
Abbildung 5: Geklebte Holzverbindungen; Quelle: [28]	14
Abbildung 6: Stabdübel; Quelle: [30]	15
Abbildung 7: (a) Bolzen und (b) Passbolzen; Quelle: [32]	16
Abbildung 8: Gewindestangen; Quelle: [33]	17
Abbildung 9: (a) Nagel und (b) Nagelplatten; Quelle:[34], [35]	17
Abbildung 10: Holzschrauben; Quelle: [36]	18
Abbildung 11: Dübel besonderer Bauart; Quelle: [37]	19
Abbildung 12: Versatz; Quelle: [38]	19
Abbildung 13: Zapfen; Quelle: [39]	20
Abbildung 14: Holznägel; Quelle: [42]	20
Abbildung 15: Flussdiagramm zur Erläuterung des methodischen Prozesses	21
Abbildung 16: Bewertungsergebnisse der Verbindungen	46
Abbildung 17: Kumuliertes Gesamtergebnis für alle Indikatoren	48
Abbildung 18: Holzschraubenverbindung (vergrößerte Ansicht)	51
Abbildung 19: Gestellschraubenverbindung (vergrößerte Ansicht)	52
Abbildung 20: Nagelplattenverbindung (vergrößerte Ansicht)	53
Abbildung 21: Passbolzenverbindung (vergrößerte Ansicht)	54
Abbildung 22: Passverbindung mit Zugstange (vergrößerte Ansicht)	55
Abbildung 23: Balkenschuhverbindung (vergrößerte Ansicht)	56
Abbildung 24: Balkenträgerverbindung (vergrößerte Ansicht)	57
Abbildung 25: GSA-LMV (vergrößerte Ansicht)	58
Abbildung 26: Holzsystemverbindung (vergrößerte Ansicht)	59
Abbildung 27: Stützenfußverbindung (vergrößerte Ansicht)	60
Abbildung 28: X-Rad (vergrößerte Ansicht)	61
Abbildung 29: Zuganker / Winkel (vergrößerte Ansicht)	62
Abbildung 30: Holznagelverbindung (vergrößerte Ansicht)	63
Abbildung 31: Schlitz- und Zapfen (vergrößerte Ansicht)	64
	69

Abbildung 32: Schwalbenschwanz-Zapfen (vergrößerte Ansicht)	_____	65
Abbildung 33: Stirnversatz (vergrößerte Ansicht)	_____	66
Abbildung 34: Überblattung (vergrößerte Ansicht)	_____	67
Abbildung 35: X-Fix L (vergrößerte Ansicht)	_____	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufkommen der Holzabfälle in Österreich 2022, Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [1] (Datenstand Mai 2024)	10
Tabelle 2: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.1	25
Tabelle 3: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.2	26
Tabelle 4: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.3	27
Tabelle 5: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.4	28
Tabelle 6: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.5	29
Tabelle 7: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.6	30
Tabelle 8: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.7	31
Tabelle 9: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.8	32
Tabelle 10: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.9	33
Tabelle 11: Punktevergabe je Antwortmöglichkeit für V.10	34
Tabelle 12: Ergebnis für Holzschraubenverbindung	35
Tabelle 13: Ergebnis für Gestellschraubenverbindung	36
Tabelle 14: Ergebnis für Nagelplattenverbindung	36
Tabelle 15: Ergebnis für Passbolzenverbindung	37
Tabelle 16: Ergebnis für Passverbindung mit Zugstange	37
Tabelle 17: Ergebnis für Balkenschuhverbindung	38
Tabelle 18: Ergebnis für Balkenträgerverbindung	39
Tabelle 19: Ergebnis für GSA-LMV	39
Tabelle 20: Ergebnis für Holzsystemverbinder	40
Tabelle 21: Ergebnis für Stützenfußverbindung	40
Tabelle 22: Ergebnis für X-Rad	41
Tabelle 23: Ergebnis für Zuganker / Winkel	41
Tabelle 24: Ergebnis für Holznagelverbindung	42
Tabelle 25: Ergebnis für Schlitz- und Zapfen	43
Tabelle 26: Ergebnis für Schwalbenschwanz-Zapfen	43
Tabelle 27: Ergebnis für Stirnversatz	44
Tabelle 28: Ergebnis für Überblattung	44
Tabelle 29: Ergebnis für X-fix L	45
Tabelle 30: Vergleich der höchsten und niedrigsten Ergebnisse der Verbindungen	47
Tabelle 31: Vielseitige Verbindungen	47

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie., Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie., Wien, Österreich, 2024.
- [2] Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) 2002 – Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft, n.d.
- [3] Md.U. Hossain, C.S. Poon, Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities, *Journal of Cleaner Production* 177 (2018) 387–397. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.233>.
- [4] B. Rivela, M.T. Moreira, I. Muñoz, J. Rieradevall, G. Feijoo, Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture, *Science of The Total Environment* 357 (2006) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.04.017>.
- [5] M. Risse, G. Weber-Blaschke, K. Richter, Eco-efficiency analysis of recycling recovered solid wood from construction into laminated timber products, *Science of The Total Environment* 661 (2019) 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.117>.
- [6] M. Gorgolewski, Designing with reused building components: some challenges, *Building Research & Information* 36 (2008) 175–188. <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>.
- [7] I. Bertin, M. Saadé, R. Le Roy, J.-M. Jaeger, A. Feraille, Environmental impacts of Design for Reuse practices in the building sector, *Journal of Cleaner Production* 349 (2022) 131228.
- [8] C. Küpfer, M. Bastien-Masse, C. Fivet, Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents, *Journal of Cleaner Production* 383 (2023) 135235.
- [9] J. Brütting, C. De Wolf, C. Fivet, The reuse of load-bearing components, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019: p. 012025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/225/1/012025/meta> (accessed July 18, 2024).
- [10] M.J. Whittaker, K. Grigoriadis, M. Soutsos, W. Sha, A. Klinge, S. Paganoni, M. Casado, L. Brander, M. Mousavi, M. Scullin, R. Correia, T. Zerbi, G. Staiano, I. Merli, I. Ingrosso, A. Attanasio, A. Largo, Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling, *Advances in Building Energy Research* 15 (2021) 253–269. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1702586>.
- [11] Y. Niu, K. Rasi, M. Hughes, M. Halme, G. Fink, Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland, *Resources, Conservation and Recycling* 170 (2021) 105555. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>.
- [12] P. Crowther, Design for disassembly—themes and principles, *Environment Design Guide* (2005) 1–7.
- [13] P.S. Phillips, T. Tudor, H. Bird, M. Bates, A critical review of a key Waste Strategy Initiative in England: Zero Waste Places Projects 2008–2009, *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2011) 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.006>.
- [14] O.O. Akinade, L.O. Oyedele, M. Bilal, S.O. Ajayi, H.A. Owolabi, H.A. Alaka, S.A. Bello, Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS), *Resources, Conservation and Recycling* 105 (2015) 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.018>.
- [15] A.S. Allam, M. Nik-Bakht, From demolition to deconstruction of the built environment: A synthesis of the literature, *Journal of Building Engineering* 64 (2023) 105679. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105679>.
- [16] O.O. Akinade, L.O. Oyedele, S.O. Ajayi, M. Bilal, H.A. Alaka, H.A. Owolabi, S.A. Bello, B.E. Jaiyeoba, K.O. Kadiri, Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills, *Waste Management* 60 (2017) 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>.

- [17] A. Tleuken, B. Torgautov, A. Zhanabayev, A. Turkyilmaz, M. Mustafa, F. Karaca, Design for Deconstruction and Disassembly: Barriers, Opportunities, and Practices in Developing Economies of Central Asia, *Procedia CIRP* 106 (2022) 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.148>.
- [18] M.R. Munaro, S.F. Tavares, L. Bragança, The ecodesign methodologies to achieve buildings' deconstruction: A review and framework, *Sustainable Production and Consumption* 30 (2022) 566–583. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.032>.
- [19] D.D. Tingley, B. Davison, Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction, *Building and Environment* 57 (2012) 387–395.
- [20] J. Couto, A. Couto, Analysis of Barriers and the Potential for Exploration of Deconstruction Techniques in Portuguese Construction Sites, *Sustainability* 2 (2010) 428–442. <https://doi.org/10.3390/su2020428>.
- [21] L. Jaillon, C.S. Poon, Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong, *Automation in Construction* 39 (2014) 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.006>.
- [22] T. O'Grady, R. Minunno, H.-Y. Chong, G.M. Morrison, Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment, *Resources, Conservation and Recycling* 175 (2021) 105847. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105847>.
- [23] L.A. Akanbi, L.O. Oyedele, K. Omotoso, M. Bilal, O.O. Akinade, A.O. Ajayi, J.M. Davila Delgado, H.A. Owolabi, Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy, *Journal of Cleaner Production* 223 (2019) 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.172>.
- [24] H. Neuhaus, *Ingenieurholzbau*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14178-3>.
- [25] CEN, ÖNORM B 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Konsolidierte Version mit nationalen Festlegungen, nationalen Erläuterungen und nationalen Ergänzungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [26] CEN, ÖNORM EN 301: Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [27] CEN, ÖNORM EN 15425: Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis (PUR) für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [28] Wood Adhesive, Indiamart.Com (n.d.). <https://www.indiamart.com/proddetail/wood-adhesive-2852906311273.html> (accessed July 25, 2024).