

# Holz – ein zirkulärer Baustoff

Ergebnisse des EU Forschungsvorhabens RE<sup>4</sup> und deren Umsetzung in der Büropraxis

Andrea Klinge  
ZRS Architekten Ingenieure  
Berlin, Deutschland



Eike Roswag-Klinge  
Natural Building Lab, Universität Berlin  
ZRS Architekten Ingenieure  
Berlin, Deutschland





# Holz – ein zirkulärer Baustoff

## 1. Einleitung

In 2018 trug der Bausektor in Deutschland mit fast 600 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfällen erheblich zum nationalen Abfallaufkommen bei [1]. Die europäische Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) sah bis 2020 eine Reduzierung von nicht gefährlichen Abfällen aus Gebäudeabbruch um 70% (nach Gewicht) vor [2]. Auch wenn Recyclingraten in den letzten Jahren auf mehr als die geforderten 70% gesteigert werden konnten, so wird ein Großteil der rezyklierten Materialien nach wie vor in minderwertigen Anwendungen (Straßenbau, Verfüllung von Baugruben) eingesetzt oder thermisch verwertet [3]. Zudem werden beträchtliche Mengen von Gebäudeabriss auch weiterhin deponiert, da die Demontage von Gebäuden bei deren Planung nicht berücksichtigt wurde. Vor allem der Rückbau von Holzelementen wie Stützen, Balken, Holzböden etc. aus Bestandsgebäuden macht deutlich, dass die Idee des kreislaufgerechten Bauens von der Baubranche bislang nicht ausreichend umgesetzt wird. Um zeitaufwändige Untersuchungen bezüglich des Einsatzes von Holzschutzmitteln zu vermeiden, werden Holzelemente in der Regel in die Altholzkategorie AIV eingeordnet. Dies impliziert die Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen als übliche „Verwertungsmethode«. In der Folge geht nicht nur hochwertiges Holz für zukünftige Anwendungen im Baubereich und anderen Sektoren verloren, auch das im Bauteil gespeicherte CO<sub>2</sub> wird frühzeitig wieder freigesetzt. Die Baubranche benötigt dringend innovative Konzepte um das kreislaufgerechte Bauen zu stärken, die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen zu minimieren und die ambitionierten Ziele der Europäischen Union zu erreichen.

Diese Veröffentlichung präsentiert die Ergebnisse des europäischen Forschungsvorhabens RE<sup>4</sup> in Bezug auf die Wiederverwendung von Holzabbruch im Bausektor. Zudem werden Projekte dargestellt die Ansätze des RE<sup>4</sup> Forschungsvorhabens in der Praxis umsetzen.

## 2. Voraussetzungen

Wenngleich Holz neben Lehm einer der wenigen Baustoffe ist, der einzigartige Möglichkeiten für eine direkte Wieder- oder Weiterverwendung ohne großen Energieeinsatz bietet, wird Altholz bislang nicht als Ressource gesehen, sondern hauptsächlich der energetischen Verwertung zugeführt (Abbildung 1). Der Zugang zu günstigem Frischholz, geringe Entsorgungskosten, metallische Verunreinigungen und zeitaufwändige Nachweismethoden für die Anwendung von Holzschutzmitteln sind derzeit die Hauptgründe warum im Holzbau der kreislaufgerechte Ansatz aktuell so wenig verfolgt wird. Soll Altholz für Bauzwecke wiederverwendet oder rezykliert werden, so müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein. Wiedergewonnene Hölzer müssen frei sein von:

- Holzschutzmitteln;
- anderen Schadstoffe, die aus früheren Nutzungen stammen und möglicherweise in das Holz eingedrungen sind;
- holzerstörenden Pilzen und Insekten;
- Metallverunreinigungen, die Maschinen zur Wiederaufbereitung beschädigen könnten

Zudem müssen die gewonnenen Elemente eine ausreichende Festigkeit sowie ausreichend große Querschnitte und Längen aufweisen.

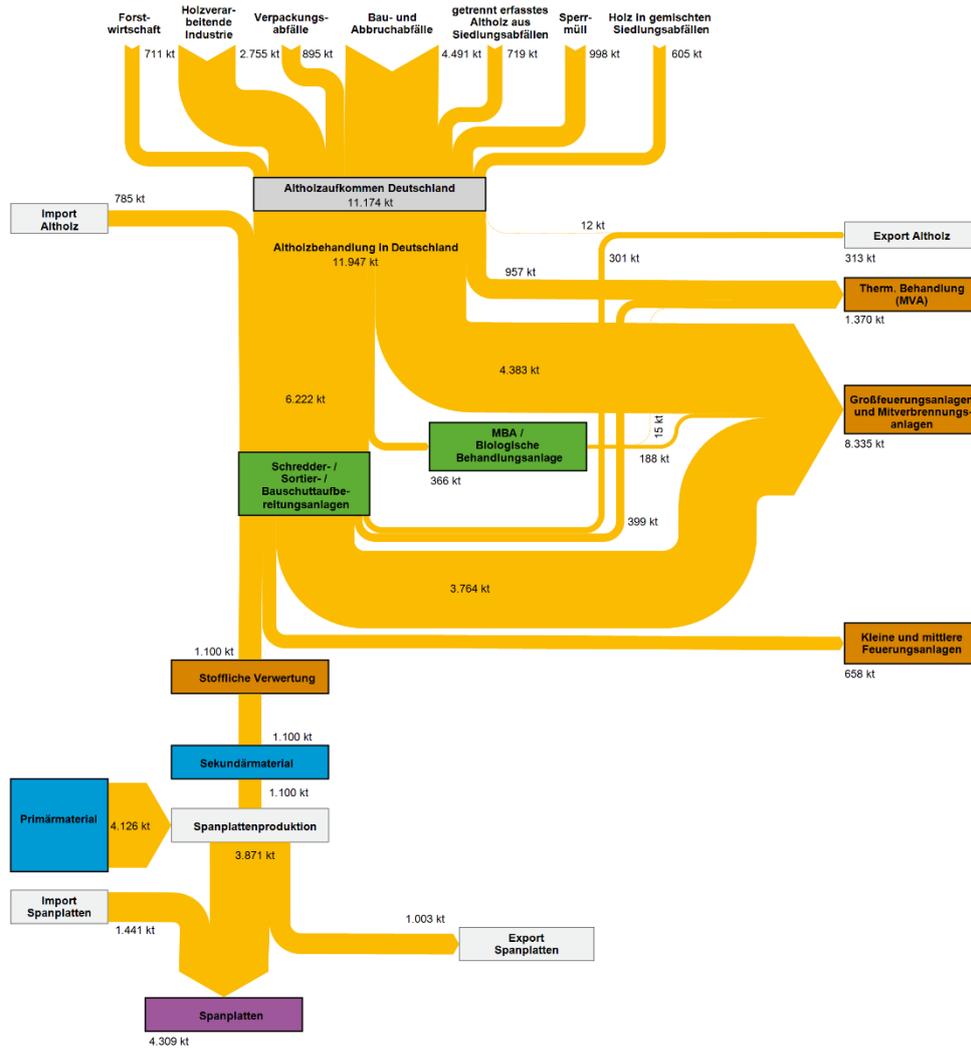


Abbildung 1: Stoffströme Altholzverwertung in Deutschland in 2015 [4]

### 2.1.1 Holzschutzmittel

Die Altholzverordnung regelt den fachgerechten Umgang mit Altholz und sieht den Nachweis der Schadstofffreiheit von verbotenen Substanzen vor, um eine Wiederverwendung oder Wiederverwertung zu ermöglichen [5]. Da es am Markt bislang keine umfänglichen In-Situ Tests gibt, werden Materialproben an Bauteilen entnommen (Abbildung 2) und von einem zertifizierten Labor untersucht. In den Fällen, in denen Holzschutzmittel nachgewiesen werden, kann anhand der Eindringtiefe definiert werden, wieviel vom Holzquerschnitt durch Sägen entfernt werden muss, um das Altholz nicht der thermischen Verwertung zuführen zu müssen.

### 2.1.2 Schadstoffe und Störstoffe aus früheren Nutzungen

Wurden in einem Gebäude Schadstoffe eingetragen, muss mittels geeigneter Untersuchungen nachgewiesen werden, dass das Holz, welches wiederverwendet oder rezykliert werden soll, nicht verunreinigt ist.

### 2.1.3 Metallische Verunreinigungen

Metallische Verunreinigungen sind einer der Hauptgründe warum sich die Wiederverwendung und das Recycling von Altholz bislang nicht etabliert hat. Werden solche Einschlüsse nicht detektiert, können sie Holzbearbeitungsmaschinen erheblich beschädigen. Im Rahmen des RE<sup>4</sup> Projektes wurden daher sämtliche Altholzabschnitte mit einfachen Metalldetektoren auf Metallverunreinigungen untersucht und diese anschließend mit Handwerkzeugen entfernt (Abbildung 3).

### 2.1.4 Festigkeitssortierung

Altholz, das für tragende Bauteile verwendet werden soll, muss nach harmonisierten Normen [6], [7], [8] und nationalen Regeln in Bezug auf seine Festigkeit sortiert werden. Um das Holz zu kategorisieren, wurden In-Situ-Inspektionen durchgeführt, verfügbare Abschnitte in Bezug auf seine Abmessungen aufgenommen sowie das Ausmaß an Mängeln und Schäden festgestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Hölzer vor Ort sortiert und für die weitere Aufbereitung und Festigkeitsklassifizierung getrennt. Sämtliche Verunreinigungen (Farben, Beschichtungen usw.) wurden entfernt, um sauberes Rohmaterial zu erhalten, das in rechteckige Querschnitte geschnitten und gehobelt wurde. Da der Zugang zu einer Trockenkammer nicht gegeben war, konnte das Holz nicht technisch getrocknet werden. Der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt von 20%, der für die Festigkeitsklassifizierung erforderlich ist, wurde somit nicht immer erreicht.



Abbildung 2: Altholz für die Wiederverwertung



Abbildung 3: Metalldetektor



Abbildung 4: Festigkeitsklassifizierung: Beurteilung von Fehlstellen, Zerfall, Rissen, Aufnahme Abmessungen, Lage + Ausrichtung von Ästen



Die eigentliche Festigkeitssortierung wurde an abgerichteten und gehobelten Holzlamellen durchgeführt, die hinsichtlich Abmessungen und Lage von Rissen, Ästen und Zerfall bewertet wurden (Abbildung 4). Die Einteilung nach DIN 4074-1: 2012 [9] in die jeweiligen Sortierklassen ergab wiederum die jeweilige Festigkeitsklasse nach EN 338: 2016 [10]. Weitere Anforderungen die für Brettschichtholz gelten und in übergeordneten Normen geregelt sind, wurden bei der weiteren Herstellung der Bauteile angewendet [8]. Aus den einzelnen Lamellen wurden Stützen sowie Schwelle und Rähm für ein nicht-tragendes Fassadenelemente gefertigt.

## 3. Entwurfskonzepte

### 3.1. Tragende Holzbalken und -stützen

Die allgemeine Konzeption für tragende Holzelemente für die Tragkonstruktion von Holzbauwerken entspricht der Norm EN 14080: 2013 [8] und folgt dem Prinzip von Brettschichtholz, bei dem einzelne Lamellen miteinander verbunden werden. Leimfreie Verbindungen einzelner Lamellen die im Rahmen des Projektes ebenfalls untersucht wurden, werden in dieser Studie nicht näher erläutert. Das Entwurfskonzept für die Bauteile verfolgt die Idee der Maximierung und Optimierung von Nutzabschnitten aus Altholz (Abbildung 5).

Für den Bau der Elemente wurden Risse aus den gewonnenen Lamellen herausgeschnitten und die sich ergebenden Abmessungen für den Einsatz in Trägern und Stützen bewertet. Lamellen mit den Abmessungen 4/6/12 cm x 4 cm wurden in vertikaler und horizontaler Richtung verleimt. (Abbildung 6 - Abbildung 8).

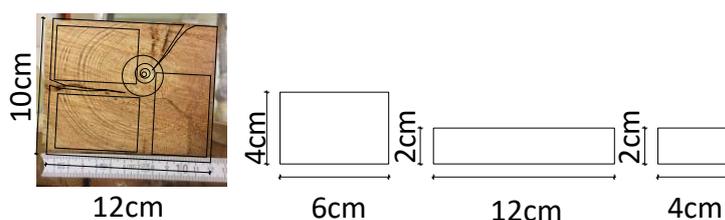


Abbildung 5: Materialeffiziente Aufteilung des gewonnenen Altholzes

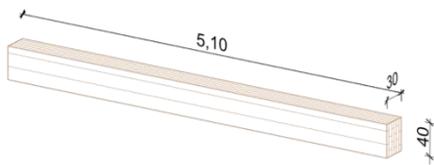


Abbildung 6: Designkonzept für Brett-schichtholzbalken aus Altholz



Abbildung 7: Brettschicht-holzbalken



Abbildung 8: Brettschichtholzbalken, Lamellen-verbund in vertikaler und horizontaler Richtung

### 3.2. Nicht lastabtragendes, vorgefertigtes Fassadenelement aus Altholz

Das Konzept für ein vorgefertigtes, reversibles, hinterlüftetes Fassadenelement aus Altholz sieht eine nichttragende Holzrahmenkonstruktion vor. Ein selbsttragendes Holzständersystem ist beidseitig mit Holzfaserverplatten bekleidet. In bestimmten Lastfällen kann aus statischen Gründen eine aussteifende Bekleidung wie z.B. eine Diagonalschalung erforderlich sein, die die innenseitige Holzfaserverplatte ersetzt. Das Element ist mit einer Einblasdämmung ausgedämmt, die auf rezyklierten Holzspänen oder -fasern basiert. Die Wetterschale wird mit Schrauben an einer Unterkonstruktion aus Latten befestigt, um eine spätere Demontage zwecks Wartung oder Reparatur zu ermöglichen. Ein Lehmputz auf Basis von rezyklierten Zuschlagstoffen wird als Endbeschichtung innenseitig verwendet, um ein gesundes und angenehmes Raumklima zu erzeugen. Sämtliche Verbindungen sind entweder verschraubt oder als Zimmermannsverbindungen gesteckt. Abbildung 9 zeigt das Gestaltungskonzept für das vorgefertigte Holzfassadenelement sowie die einzelnen Komponenten.

Ähnlich wie bei den Trägern und Stützen zielt die Konstruktion darauf ab, den Materialverbrauch für das Bauteil zu minimieren. Darüber hinaus verfolgt das Konzept den Ansatz einer Kaskadennutzung und untersucht Möglichkeiten zur Verwendung von Holzabschnitten aus der Aufbereitung und Fertigung für die Herstellung anderer Bauteilkomponenten. Exemplarische Untersuchungen zum Ausgangsmaterial (Abbildung 10) und zu möglichen nutzbaren Abschnitten (Abbildung 11) nach dem Zuschnitt wurden an Bohlen aus dem Rückbau einer Binderkonstruktion durchgeführt, die die Hauptquelle für die Herstellung des Fassadenelements darstellten. Zunächst wurden die Bohlen von metallischen Einschlüssen gereinigt, abgerichtet und gehobelt. In einem zweiten Schritt wurden die benötigten Profile für die Bauteile zugeschnitten. Im Ergebnis entstanden verschiedene nutzbare Querschnitte, Abschnitte, Sägespäne und auch Sägemehl. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Abschnitte sowie Einzelheiten zu Abmessungen und Mengen. Für die statisch wirksamen Komponenten des Bauteils (Schwelle, Rähm, Ständer) wurden größere Abschnitte verwendet, während kleinere Abschnitte als Wetterschale zum Einsatz kamen. Es ist vorgesehen, bei der Herstellung der aussteifenden Ebene (Holz-, Hartfaser-, oder OSB-Platten) Holzspäne oder Sägemehl und für die Dämmebene Hobel-späne oder Holzfasern (Holzweichfaserdämmatten) zu verwenden. Kleinere Abschnitte können für die Herstellung von Holzweichfaserplatten genutzt werden. Da die Produktion von aussteifenden Platten nicht im Projekt vorgesehen war, wurden für diese Komponenten vorerst handelsübliche Produkte eingesetzt.



Abbildung 9: Design Konzept für Fassadenelement, Model: M. 1:20



Abbildung 10: Ausgangsmaterial (Bohle)



Abbildung 11: Mengen an nutzbarem und nicht nutzbarem Material

Wenn das Fassadenelement das Ende seines Nutzungszyklus erreicht hat, kann es komplett oder einzelne Komponenten wiederverwendet werden. Die Wetterschale kann beispielsweise demontiert und abgerichtet werden, um verwitterte Schichten zu entfernen. Diese Resthölzer können dann weiter aufgespannt und für die Produktion von Grobspan-, Holzweichfaserplatten oder -matten recycelt werden. Die statisch wirksamen Komponenten bieten ein ähnliches Potenzial für eine solche Holzkaskade.

Tabelle 1: Mengen des verwendbaren Materials nach dem Reinigen und Besäumen

Abschnitt	Länge in dm	Breite in dm	Höhe in dm	Vol. in dm <sup>33</sup>	Vol. in %
<b>Gesamt</b>	<b>32.9</b>	<b>2.35</b>	<b>0.558</b>	<b>43.14</b>	<b>100</b>
Nutzbares Holz 1 (UW 1)	22.5	1	0.5	11.25	26
Nutzbares Holz 2 (UW 2)	19.73	0.92	0.55	9.98	23
Nutzbares Holz 3 (UW 3)	26	0.48	0.18	2.25	5
Restholz (Metall) (OC 1)	6.35	2.35	0.58	8.66	20
Restholz 2 (Metall) (OC 2)	6	0.95	0.58	3.31	8
Restholz 3 (Querschnitt) (OC 3)	4.1	1	0.5	2.05	5
Restholz 4 (Längsschnitt) (OC 4)	27.2	0.05	0.53	0.72	2
Restholz 5 (Querschnitt) (OC 5)	0.25	0.48	0.18	0.02	0.5
Restholz 6 (Längsschnitt) (OC 6)	26.7	0.05	0.22	0.29	0.5
<b>SUMME</b>				<b>38.53</b>	<b>90</b>
<b>Sägemehl</b>				<b>4.61</b>	<b>10</b>

Für die Produktion von materialeffizienten Ständern wurden verschiedene Designkonzepte entwickelt (Abbildung 13 - Abbildung 15). Ein Fachwerkständer ermöglicht die optimierte Nutzung verschiedener Holzquerschnitte aus der Bearbeitung von Altholz. Die Abmessungen und Anordnung der einzelnen Stäbe und Bretter werden nach statischen Berechnungen festgelegt, wobei die Größe der gewonnenen Querschnitte und die mögliche Unterteilung berücksichtigt werden (Abbildung 12). Für Schwelle und Rähm wurden massive Profile hergestellt.

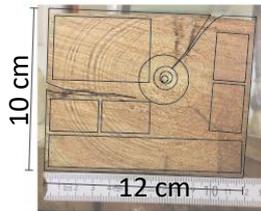


Abbildung 12: Rückgebaute Holzstütze, Unterteilung für materialoptimierte Ständer

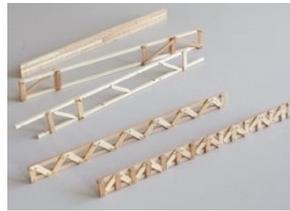


Abbildung 13: Modelle M 1:20 für materialeffiziente Ständer



Abbildung 14: Fachwerkständer, Stäbe mit unterschiedlichen oder gleichen Querschnitten, exzentrisch montiert



Abbildung 15: Fachwerkständer, Stäbe mit unterschiedlichen Querschnitten, zentrisch montiert

Für die endgültige Fertigung des Fassadenpaneels wurden die statisch wirksamen Komponenten (Schwelle, Rähm, Ständer) auf Basis üblicher Holzbauraster zu einem Rahmen zusammengefügt. Der Rahmen wurde außenseitig mit einer Holzfaser- bzw. innenseitig mit einer Hartfaserplatte beplankt, um die erforderliche Steifigkeit für das Element zu gewährleisten. Im nächsten Schritt wurde die Einblasdämmung eingebracht und eine finale Holzfaserplatte als Putzträger innenseitig auf die Hartfaserplatte aufgebracht (Abbildung 16 – Abbildung 17). Als finaler Schritt wurde die Wetterschale an einer Tragkonstruktion aus Latten und Konterlatten befestigt (Abbildung 18). Der rezyklierte Lehmputz wird auf der Baustelle aufgetragen. Reversible Verbindungen wurden mit Hilfe von Schrauben hergestellt. Um zukünftig die Anzahl der Metallbefestigungen zu minimieren sollen in einem nächsten Schritt Zimmermannsverbindungen zum Einsatz kommen.



Abbildung 16: Holzrahmen mit Ständern, Einbringen der Einblasdämmung



Abbildung 17: Befestigung der Holzweichfaserplatten (außenseitig)



Abbildung 18: Wetterschale

### 3.3. Reversible Verbindungen

Reversible Verbindungen auf Komponenten- und Elementebene sind von zentraler Bedeutung, wenn es um die Wiederverwendung und das Recycling von Bauteilen geht. Im Rahmen des Projektes wurden dazu verschiedene Untersuchungen auf Komponenten- und Elementebene durchgeführt. Es wurden verschiedene Holzverbindungen (Zimmermannsverbindungen) oder Metallverbindungen getestet. Für Eckverbindungen des Rahmens (Fassadenelement) wurden erste Versuche mittels Schwalbenschwanzverbindungen durchgeführt (Abbildung 19 – Bild 20). Für die Verbindung von tragenden Elementen wurden am Markt verfügbare Verbindungen in Betracht gezogen, die praktikable Optionen bieten (Abbildung 21 – Abbildung 22).

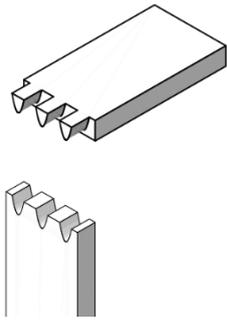


Abbildung 19:  
Zimmermanns-Ver-  
bindung (Schwalben-  
schwanz)



Abbildung 20:  
Geschraubte Verbindung  
Fassadenelement



Abbildung 21:  
Geschraubte Verbindung  
Stütze - Fundament



Abbildung 22:  
Reversibler Balken-  
schuh (© Sherpa)

## 4. Design Konzept für ein zirkuläres Gebäude

Das Entwurfskonzept für ein reversibles Gebäude konzentriert sich auf die Lebensdauer verschiedener Gebäudeteile und ermöglicht sinnvolle Systemtrennungen zwischen Bauteilen mit unterschiedlicher Lebensdauer, so dass Elemente mit einer deutlich kürzeren Lebensdauer relativ einfach gewartet oder ausgetauscht werden können. Darüber hinaus sollen ein hohes Maß an Flexibilität, ausreichende Deckenhöhen und Adaptionsmöglichkeiten die Nutzungsdauer eines Gebäudes erhöhen (Abbildung 23). Obwohl Bauelemente modular aufgebaut sind, weisen sie unterschiedliche Größen auf und müssen so ausgelegt sein, dass sie in zukünftigen Anwendungen leicht zerlegt und wiederverwendet werden können. Darüber hinaus folgen sie dem Konzept der Materialreinheit oder ermöglichen eine einfache Demontage, sodass verschiedene Komponenten getrennt und bei Bedarf wiederverwendet oder recycelt werden können [11]. Darüber hinaus sollen durch die Verwendung hochwertiger Materialien die Haltbarkeit sowie die Lebensdauer des Bauteils und damit auch des Gebäudes weiter erhöht werden.

Der Entwurf sieht eine Konstruktion in Form eines Holzskeletts mit reversiblen Verbindungen in Kombination mit einem aussteifenden Kern und einem nicht tragenden Holzfassadensystem vor (Abbildung 24). Alle Elemente und Komponenten sind aus Altholz gefertigt. Das Stützensystem bietet bei Grundrissgestaltung ein Höchstmaß an Flexibilität (Abbildung 26). Das nicht tragende Fassadensystem ermöglicht einen vollständigen Austausch der Bauteile, sollten diese das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben oder bei einem Nutzungswechsel des Gebäudes eine andere Konfiguration erforderlich sein. Für alle Verbindungen sind reversible Verbindungen geplant, die noch weiter untersucht werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass sie entweder als Zimmermannsverbindungen oder durch reversible Metallverbindungen realisiert werden können.

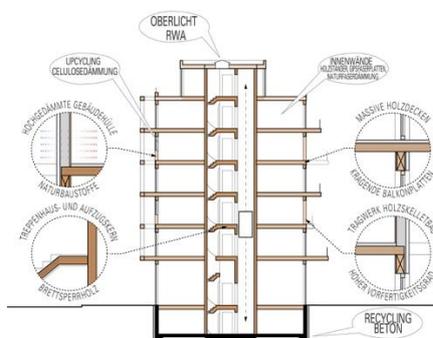


Abbildung 23: Entwurfskonzept für  
ein reversibles Holzskelettbauwerk



Abbildung 24: Skelettkonstruktion mit aussteifendem  
Kern

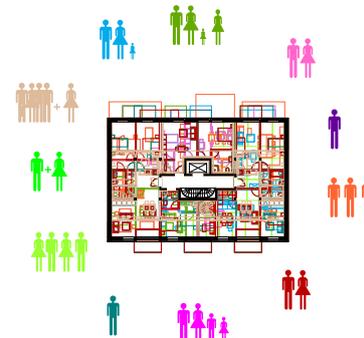


Abbildung 25: Adaptierbare  
Grundrisse bieten ein hohes Maß  
an Flexibilität

## **5. Ergebnisse und Diskussion**

### **5.1. Voraussetzungen**

Inspektionen vor Ort haben sich als geeignete Strategie erwiesen, um festzustellen, ob vorhandene Holzkonstruktionen für eine direkte Wiederverwendung oder ein Recycling geeignet sind. Obwohl bei gereinigten Holzteilen standardmäßig eine Festigkeitsbewertung durchgeführt wird, lieferten erste Beurteilungen vor Ort zuverlässige Ergebnisse hinsichtlich der allgemeinen Tragfähigkeit der verbauten Holzbauteile und -elemente. Darüber hinaus konnte durch Labortests festgestellt werden, dass nicht alle Konstruktionen mit Holzschutzmitteln behandelt wurden, so dass das Altholz direkt wiederverwendet werden konnte. In-Situ-Untersuchungen waren auch zur Beurteilung von Insekten- und Pilzbefall geeignet. Mittels einfacher Metalldetektoren konnten alle Metallverunreinigungen identifiziert werden. Die endgültige Festigkeitsklasse des bewerteten Holzes erreichte entweder C16 oder C24, was für die Entwicklung von konstruktiven Holzelementen geeignet ist.

### **5.2. Material- und Entwurfskonzept für lastabtragende Holzelemente**

Das Material- und Gestaltungskonzept für tragende Holzelemente konnte erfolgreich umgesetzt werden. Eine materialeffiziente Konstruktion könnte durch die Anwendung standardisierter Größen für Lamellen erreicht werden. Risse und Äste wurden ohne größere Materialverluste entfernt. Industriell gefertigte Keilzinkenverbindungen sind zwar nicht getestet worden, es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese die Nutzung kürzerer Abschnitte und deren Addition zu langen Lamellen ermöglichen. Die Verwendung von Leim zum Verbinden von Einzellamellen hat sich als sehr zeit- und kosteneffizient erwiesen und liefert auch für Altholz kraftschlüssige Verbindungen. Da gefertigte Elemente nach DIN 68800 der Verwendungsklasse 0 zugeordnet werden können, ist der Einsatz von Holzschutzmitteln nicht erforderlich [12].

### **5.3. Material- und Entwurfskonzept für ein nicht-lastabtragendes, vorgefertigtes Holzfassadenelement**

Das kaskadische von Altholz für das Fassadenelement erscheint sehr vielversprechend. Die Materialmenge, die aus Brettern rezykliert werden konnte, summierte sich nach Gewicht auf rd. 90%. Nagelplattenbinder wurden aus Zeitgründen vollständig herausgeschnitten. Obwohl bisher nur Vollprofile hergestellt wurden, scheint die Verwendung von Abschnitten für die Herstellung anderer Bauteile eine praktikable Lösung zu sein. Die Industrie folgt diesem Konzept bereits, allerdings auf Basis von Frischholz. Das Konzept für materialeffiziente Ständer lieferte ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Dieser Ansatz war jedoch zeitaufwendiger als die Herstellung von massiven Alternativen. Die Herstellung des finalen Elements wurde vollständig mit Handmaschinen ausgeführt. Ähnlich wie Balken und Stützen kann das Fassadenelement aufgrund besonderer konstruktiver Maßnahmen gemäß [12] nach DIN 68800 in die Nutzungsklasse 0 eingestuft werden. Daher ist der Einsatz von Holzschutzmitteln nicht erforderlich. Der Wirkungen auf die Umwelt hinsichtlich der Verringerung der Umweltbelastung durch Wiederverwendung und Recycling von Altholz wird derzeit untersucht.

Erste Studien wurden bislang nur im Labor durchgeführt. Beide Konzepte, Holz in Holz aber auch Metallverbindungen, sind jedoch geeignet, um reversible Verbindungen auf Bauteil- aber auch Elementebene zu ermöglichen. Zimmermannsverbindungen waren aufgrund des Mangels an geeigneten Maschinen zeitaufwändiger. Zusätzliche Studien und Tests sind erforderlich, um Lösungen für die verschiedenen Anwendungen zu untersuchen und bereitzustellen. Die bisherigen Ergebnisse ermöglichten jedoch die vollständige Demontage von Elementen und Bauteilen.

### **5.4. Entwurfskonzept für ein reversibles Gebäude**

Die Skelettbauweise zeichnet sich durch ein höheres Maß an Flexibilität aus. Auch die Möglichkeit der Trennung der unterschiedlichen Elemente nach ihrer Lebensdauer scheint die Nutzungsdauer von Gebäuden zu verlängern. Die Verwendung von Holz im Bauwesen

bietet im Allgemeinen ein deutlich höheres Potenzial für kreislaufgerechte Gebäude im Vergleich zu massiven Konstruktionen. Zum einen ist der Baustoff Holz sehr viel leichter und ermöglicht zudem trockene Verbindungen. Darüber hinaus ist das Konzept der Materialreinheit für tragende Bauteile sehr viel einfacher zu erreichen, da Holz Druck-, Zug- und Scherbelastungen aufnehmen kann.

In Bezug auf die Lebensdauer der entwickelten Einzelemente wird erwartet, dass die Verwendung von Altholz, das im Vergleich zu heutigem Holz unter weniger Umweltbelastungen gewachsen ist, die Lebensdauer der einzelnen Elemente und damit des gesamten Gebäudes verlängert. Diese These muss jedoch durch weitere Untersuchungen überprüft werden.

## 6. Praxisbeispiele

### 6.1. Neubau Konrad-Zuse-Schule, Berlin

Das neue Werkstattgebäude setzt die Ergebnisse des RE<sup>4</sup> Projektes in Bezug auf ein reversibles Tragwerk um. Der Neubau ergänzt das gründerzeitliche Schulgebäude, bildet einen gemeinsamen, baumbestandenen Pausenhof und eine neue straßenseitige Adresse für den Berufsschulstandort. Das Gebäude verdichtet so einen innerstädtischen Standort nach und beugt der Erschließung von neuem Bauland vor. Der zweigeschossige Holzbau beherbergt im Erdgeschoss Maschinenräume und im Obergeschoss Handarbeitsplätze für verschiedene Berufsgruppen.

Das Gebäude wurde in ressourcengerechter Weise geplant und realisiert. Die Innovation liegt in der ressourcenpositiven Errichtung der Gebäudehülle. Bezogen auf den Betrieb wurde eine hochgedämmte klimaaktive und diffusionsoffene Gebäudehülle aus nachwachsenden Rohstoffen realisiert, die auf Lüftungstechnik im Wesentlichen verzichten kann und so eine LowTech Bauweise ermöglicht. Aktuell ist das Gebäude an die Nahwärme der Schule angeschlossen, die noch nicht klimaneutral versorgt wird. Würde man das Gebäude mit einer eigenen Wärmepumpe ausstatten und über die hauseigenen PV versorgen wäre das Gebäude in der Jahresbilanz klimaneutral im Betrieb.

Das kreislaufgerechte Holzbaukonzept basiert auf den folgenden drei Prinzipien:

1. Langfristige Um- und Nachnutzbarkeit – Skelettbauweise
2. Kaskadische Wiederverwendung vom Bauelement bis zum Baustoff – reversible Konstruktion
3. Verzicht auf ressourcenintensive Baustoffe wie Beton – Nutzung nachwachsender Rohstoffe

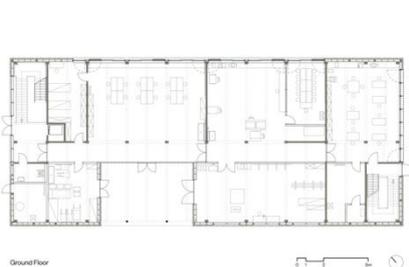


Abbildung 16: Grundriss EG

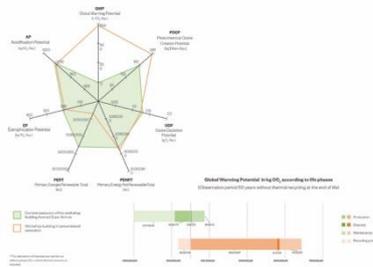


Abbildung 27: Ökobilanz

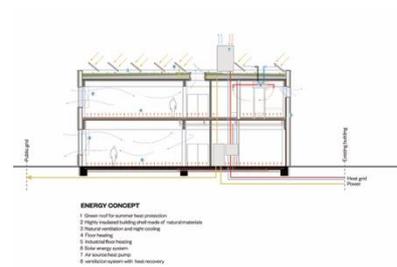


Abbildung 28: Klimaschnitt

#### 6.1.1 Langfristige Um- und Nachnutzung – Skelettbau

Das Gebäude ist als Holzskelettbau auf einer Grundfläche von ca. 44,5 x 19 m errichtet. Zwei Stützenreihen an den Außenwänden und eine Mittelachse ergeben eine Deckenspannweite quer zum Gebäude von 9 Metern. Die Lasten der Längsträger werden über Stützen im Raster von 4,5 m abgetragen. Die Deckenbalken sind seitlich über reversible Verbinder an den Längsträger angebunden und schließen unterkanten-gleich mit diesem ab. Die sich ergebende Konstruktionshöhe des Tragwerks wird zur Führung technischer Anlagen und zur Anordnung von Akustikdelementen, Beleuchtung etc. genutzt.

Die Queraussteifung übernehmen die Treppenhauskerne an den Gebäudequerseiten und zusätzliche Querwände aus Brettsperrholz. Die Deckenplatten bestehen ebenfalls aus aufgelegten Brettsperrholzplatten. Das so erzeugte raumbildende Skelett-Tragwerk ist langfristig flexibel, um- und nachnutzbar und ermöglicht theoretisch eine unendliche Nutzungsdauer. Den vertikalen Raumabschluss bilden nichttragende Fassadenelemente, die außenseitig vor das Tragwerk gehängt sind. Der Innenausbau besteht aus nichttragenden Innenwänden.

Bei dem Gebäude handelt es sich um einen Sonderbau, welcher in die Gebäudeklasse 3 eingestuft ist. Die geforderte Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden und aussteifenden Bauteile wird durch den Tragwerksplaner über Abbrand nachgewiesen. Durch die einfache, klare Wegeführung zweier baulicher

Rettungswege und eine Unterteilung in Teilnutzungseinheiten, kann die Holz-sichtigkeit in den Treppenträumen realisiert werden. Nur die Treppenläufe wurden als Betonfertigteile ausgeführt.



Abbildung 29: Konstruktion Module



Abbildung 30: Werkhalle EG, Rohbau nach Fertigstellung



Abbildung 31: Detail

### 6.1.2 Kaskadische Wiederverwendung vom Bauelement bis zum Material – Reversible Konstruktion

Das Skelett des Tragwerks, also Stützen und Unterzüge/ Deckenbalken sind mit verdeckten Schwerlastverbinder verbunden. Diese Metallverbinder werden über Haken eingehängt und mit einer Schraube in der Lage gesichert. Die queraussteifenden Brettsperrholzscheiben und Treppenhauskerne sind über Schrauben verbunden. Diese Verbindungsarten ermöglicht eine langfristige Reversibilität des Tragwerkes. So ließe sich das Tragwerk theoretisch als Ganzes oder in Teilen translozieren und wiederverwenden. Auch eine Wiederverwertung der Holzelemente in anderer Konfiguration ist in Zukunft möglich.

Die nichttragenden, vorgehängten Außenwände bestehen aus Holzwerkstoffen und eingblasener Naturfaserdämmung. Alle Verbindungen sind mechanisch lösbar hergestellt. Auch die Außenwand kann mit dem Gebäude transloziert, um- und nachgenutzt bzw. bei einer Rekonfiguration wiederverwertet werden. Die nichttragenden Innenwände wurden aus Kostengründen als Gipsfaserwände mit Naturfaserdämmung erstellt. Die Gebäudetechnik wurde als sichtbare Installation ausgeführt. Dies ermöglicht eine gute Revisionierbarkeit.



Abbildung 32: Neubau mit Bestandsgebäude und Außenanlagen



Abbildung 33: Große Werkstatt im Erdgeschoss



Abbildung 34: Werkstatt zur Straßenseite

### **6.1.3 Verzicht auf ressourcenintensive Baustoffe wie Beton – Nutzung nachwachsender Rohstoffe**

Beton wurde nur für das erdberührende Bauteil, also die Bodenplatte, die Treppenläufe und als Estrich eingesetzt. Das Tragwerk und die Gebäudehülle wurden weitestgehend aus Holz und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen errichtet.

Die Bodenplatte ist flügelgeglättet, bildet also den abschließenden Bodenaufbau in die eine wasserbasierte Bauteiltemperierung integriert ist. Das Tragwerk ist aus hochleistungsfähigem Brettschichtholz und Brettsperrholz errichtet. Die Außenwände sind schichtenarme, vorgehängte nichttragende Holztafeln. Die nichttragenden Innenwände sind klassische Metallständerwände mit Gipsfaserbekleidungen die mit Holzfaserplatten gedämmt sind. Im Gebäude kam bis auf den Bereich von Durchbrüchen wo Mineralwolle Pflicht Naturfasern als Dämmstoff zum Einsatz.

Im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse LCA wurde das realisierte Gebäude mit einem konventionellen Gebäude in Stahlbetonbauweise verglichen (e-LCA). Das konventionelle Gebäude hat im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ein Global Warming Potential (GWP) von 600 Tonnen t CO<sub>2</sub>-Äqv. Die realisierte Holzbauvariante hat in der Summe ein GWP von -300 Tonnen t CO<sub>2</sub>-Äqv. führt also zu einer CO<sub>2</sub> Senke wenn das Holz am End of Life nicht der thermischen Verwertung zugeführt, sondern in Nutzung verbleibt.

## **6.2. Experimentalgebäude Infozentrale auf dem Rollberg**

Das von Studierenden am Natural Building Lab der TU Berlin 2017/ 18 entwickelte Gebäude basiert auf den Ergebnissen des oben beschriebenen Forschungsvorhabens RE<sup>4</sup>. Die Studierenden haben in ihrem Entwurfsstudio mit der Suche nach Abfallmaterialien und der Nutzungen für diese begonnen, also Bauelemente aus Abfall entwickelt bevor sie begonnen haben für diese Elemente ein prototypisches Gebäude zu entwerfen.

Das Dachtragwerk ist analog der RE<sup>4</sup> Forschung aus dem Abbruch verschiedener Holzkonstruktionen entstanden. Da dies eher kurz Stäbe mit geringen Querschnitten waren basiert das Konzept auf einem Holzquerschnitt von 6 auf 11 cm. Aufgrund der kurzen Lamellen wurde ein Trägerrost konzipiert der vielfach gestoßen werden konnte, 8 x 10 Meter überspannt und auf vier eingespannten Kreuzstützen auflagert. Im inneren Bereich des Daches, zwischen den Stützen, wurden zur Ermöglichung einer ganzjährigen Nutzung Kästen mit Zellulosedämmung aufgesetzt. Da das Gebäude auf einer bestehenden Kellerdecke der ehemaligen Kindl Brauerei errichtet wurde sind die Stützenfüße durch die Decke verschraubt. Die Wände zur ganzjährigen Nutzung des Gebäudes wurden aus Gemüseboxen gebaut, die von den Studierenden als urbane Stohballen bezeichnet und über einen längeren Zeitraum in der Stadt gesammelt wurden. In die Pappboxen wurde geschreddertes Papier als Dämmstoff eingefüllt. Die Boxen wurden mit selber «geernteten» und angeweichten Werbeplakaten zu geschosshohen Wandelementen zusammengefügt. Die Wandelemente wurden von den Studierenden während der «Entwicklungsphase» in Bezug auf Entflammbarkeit und die Aufnahme von Windlasten getestet.

Ebenfalls aus Holzabfällen, gefundenem Glas und Fahrradschläuchen als Dichtung wurden Fenster und Türen hergestellt. Die Dachabdichtung ist aus neuem Material hergestellt das aber reversibel über Klettbander an der Konstruktion befestigt und nicht mit der Holzkonstruktion wie üblich verschweißt wurde. Das Gebäude, insbesondere die Außenwände aus Pappe und Papier haben die mindestens einjährig geplante Nutzung bislang erstaunlich gut überstanden. Die Notfalloption einer zusätzlichen Wetterbekleidung wurde bislang nicht notwendig. Das Gebäude dient heute als Nachbarschaftstreff für diverse soziale Gruppen im Umfeld des Rollberggeländes.



Abbildung 35: Trägerrost aus Altholz



Abbildung 36: Rohbau Holztragwerk aus Altholz

## 7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 7.1. Voraussetzungen

Bei der Untersuchung von Altholz müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Der Erhaltungszustand, Schäden durch den Rückbau und der vorherige Lastfall können die Tragfähigkeit des Holzes beeinflussen. In verschiedenen Forschungsprojekten wurde seit den 1950er Jahren festgestellt, dass der Einfluss des Alters vernachlässigt werden kann, wenn der Erhaltungszustand und andere Verunreinigungen sorgfältig untersucht werden [13].

Die Verwendung standardisierter Querschnitte kann dazu beitragen, Lagerkosten zu reduzieren und die Marktakzeptanz für Altholz zu erhöhen. Keilzinken machen das Recycling von Altholz sehr attraktiv, da Fehlstellen herausgeschnitten werden können und kürzere Stücke zu einer Endloslamelle verbunden werden können, die wiederum auf die erforderliche Länge zugeschnitten werden kann.

Die visuelle Festigkeitsbewertung kann heute maschinell unterstützt werden, was in höheren Festigkeitsklassen zu einer besseren Ausbeute führen kann. Üblicherweise arbeiten Sortiermaschinen damit, das Holz zu biegen und die Steifigkeit zu bewerten. Heutzutage umfasst die Maschinensortierung auch Technologien wie Biegeresonanzfrequenz, Röntgenmessungen und Ultraschallwellengeschwindigkeit.

Um das Problem der Holzschutzmittel aufzugreifen, wäre eine Art Schnelltest für die Baustelle wünschenswert, da Probenahme und Laboranalyse teuer und zeitintensiv sind. Das Fraunhofer-Institut entwickelte im Rahmen des EU finanzierten CaReWood Projektes einen Prototyp für ein Vor-Ort-Messgerät, mit dem die Klassifizierung von Altholz aus dem Rückbau von Gebäuden verbessert werden könnte [1].

### 7.2. Material- und Entwurfskonzept für lastabtragende und nichtlastabtragende Elemente aus Altholz

Der hohe Anteil an Altholz, der in alle Komponenten und Elementen integriert werden konnte, zeigt das enorme Potenzial dieses Ansatzes zur Minimierung sowohl in Bezug auf die Abfallerzeugung als auch den Ressourcenverbrauch. Solange jedoch keine ganzheitlichen Kostenermittlungen für die Errichtung und den Rückbau von Gebäuden angesetzt werden oder Anreize für nachhaltigere Lösungen geschaffen werden, werden solche Lösungen Schwierigkeiten haben, in den stark wirtschaftlich getriebenen Markt Einzug zu nehmen.

### 7.3. Reversible Verbindungen

Reversible Verbindungen auf Basis von Metallbeschlägen sind im modernen Holzbau bisher nicht üblich. Tischleranschlüsse sind ohne moderne Industrie-Abgratmaschinen wirtschaftlich nicht realisierbar. Wenn jedoch eine kreisförmige Konstruktion obligatorisch wird, soll eine geeignete Lösung relativ einfach implementiert werden können.

## 7.4. Entwurfskonzept für reversible Gebäude

Um die Flexibilität und Adaptionsfähigkeit von Gebäuden an sich verändernde Lebensbedingungen zu ermöglichen, bedarf es neuer Entwurfs- und Konstruktionskonzepte. Darüber hinaus muss der Planungsprozess für Holzbauten eine zukünftige Demontage und Wiederverwendung berücksichtigen. Reversible Verbindungen, die oftmals teurer sind, sind der Schlüssel zum Erfolg solcher Konzepte. Die zunehmende Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Building Information Modeling (BIM) im Bauwesen können die Implementierung des zirkulären Bauens unterstützen. Insbesondere im Holzbau ist die 3D-Planung bereits ein etablierter Ansatz. Engagierte Komponentenhersteller und -lieferanten bieten für Produkte Rücknahmesysteme für Baureste und möglicherweise nicht mehr benötigte Produkte an. Ohne gesetzgeberische Vorgaben werden Ansätze zum zirkulären Bauen jedoch auf Pilotenebene bleiben.

### Referenzen

- [1] <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/bauabfaelle-und-bodenaushub>, zuletzt besucht am 26.07.2021
- [2] <https://www.bmu.de/gesetz/richtlinie-2008-98-eg-ueber-abfaelle-und-zur-aufhebung-bestimmter-richtlinien>, zuletzt besucht am 26.07.2021
- [3] <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges>
- [4] <https://www.umweltbundesamt.de/altholz#hinweise-zum-recycling>, zuletzt besucht am 26.07.2021
- [5] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz (2003) *Altholzverordnung – AltholzV, Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz*
- [6] DIN EN 14081-1:2016. Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [7] DIN EN 14081-2:2018. Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung, Deutsches Institut für Normung, Berlin. 2018.
- [8] EN14080:2013. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen, Deutsches Institut für Normung, Berlin. 2018.
- [9] DIN 4074-1:2012. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz, Deutsches Institut für Normung, Berlin. 2012.
- [10] EN 338:2016. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen, Deutsches Institut für Normung, Berlin. 2016.
- [11] Weimann, K.; et al.: Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung, Umweltbundesamt (Federal Environment Agency), 2013, <http://www.uba.de/uba-info-medien/4430.html>
- [12] DIN 68800-2019. Holzschutz. Deutsches Institut für Normung, Berlin. 2019.
- [13] Cavalli A, Cibechhini D, Togni M, Sousa HS. 2016: A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber.
- [14] <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2017/oktober/alholz-neues-leben-als-sekundaer-rohstoff.html>, zuletzt besucht am 23.03.19 um 18:20