

# Pragmatische Ansätze für eine Wiederverwendung von tragenden Holzbauteilen aus selektivem Rückbau

Matthias Frese, Judith Herrmann und Philipp Dietsch

## Zusammenfassung

Im Bauwesen vollzieht sich ein Paradigmenwechsel. Nachhaltigkeit und Klimaschutz verlangen dem Bau eine neue Form der Ressourcenschonung ab, die sich zukünftig nur unterstützt durch ein zirkuläres Wirtschaften verwirklichen lässt. Eine auf den Holzbau übertragene Kreislaufwirtschaft bedeutet, dass vor einem selektiven Rückbau der Wert von verbautem Holz rechtzeitig erkannt wird. Dann sollte solches Holz schonend geborgen und für eine Wieder- und Weiterverwendung beurteilt und aufbereitet werden.

Das Referat informiert über Ergebnisse eines vom Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen BW finanzierten Projekts zur Wieder- und Weiterverwendung von bestimmten Bauprodukten u. a. aus Holz. Der Schwerpunkt liegt auf der Beurteilung der Biegetragfähigkeit von Nadelschnittholz, die mit einfachen Mitteln nachgewiesen werden kann. Einige grundsätzliche Aspekte zur Tragfähigkeitsbeurteilung von Brettschichtholz und OSB-Platten aus selektivem Rückbau werden ebenfalls angesprochen.

Der Vortrag ist in einem mit den Zuhörerinnen und Zuhörern interaktiven Format angelegt, so dass sich am Thema Interessierte mit Ihren Erfahrungen einbringen können. Damit soll der Auffassung Rechnung getragen werden, dass ein zunehmendes zirkuläres Wirtschaften vor allem auch durch Kräfte aus der Handwerks- und Ingenieurpraxis befördert wird.

**Stichworte** Holzbauteile, Wiederverwendung, selektiver Rückbau, Tragfähigkeitsbeurteilung

## 1 Einleitung

Eine tatsächlich praktizierte Ressourcenschonung ist eine entscheidende Voraussetzung für Nachhaltigkeit im Bauwesen. Zirkuläres Wirtschaften schont Ressourcen und trägt damit zu einer nachhaltigen Entwicklung bei. Immer drängender wird die Notwendigkeit, allgegenwärtig anzutreffende Bekenntnisse zur Nachhaltigkeit durch ein entsprechendes Handeln auch aktiv zu leben. Viele Beispiele belegen, dass sich das Bauwesen für mehr Nachhaltigkeit, eine Wende und einen Umbruch im Bau entschieden hat und dies auch in gewissen Bereichen bereits umsetzt, z. B. [1] - [4]. Das betrifft das Material und die Herstellung von Bauprodukten, die Planung, den Entwurf, das Bauen selbst und das überdurchschnittlich langfristige Betreiben des Gebäudebestands. Wenn sich der so wichtige Erhalt des Bestands nicht durchsetzen lässt, weil Bemühungen für eine weitere Nutzung ausbleiben oder scheitern, erfolgt in vielen Fällen ein selektiver Abbruch oder Rückbau. Dann erfordert das zirkuläre Wirtschaften u. a., so viele tragende Bauteile wie technisch möglich schonend zu demontieren und sie im Sinne des zirkulären Wirtschaftens wiederzuverwenden. Bei näherer Betrachtung – was die praktische Umsetzung betrifft – ist das eine sehr schwierige und auch umfangreiche Aufgabe. Gegenwärtig stattfindende selektive Abbruch- und Rückbauprozesse sind in der Regel alles andere als schonende Demontagen, auch weil Abbruchunternehmen mit ihrem Instrumentarium und der personellen Ausstattung für jene nur selten ausgerüstet und ausgerichtet sind. Immer noch Standard ist der selektive Abbruch von Dachwerken mit dem kombinierten Abbruch- und Sortiergreifer, vgl. **Abb. 1**.



**Abb. 1:** Verlust eines innerstädtischen Gebäudeflügels bzw. der darin gebundenen baulichen Wertschöpfung

Bei ausgereiften Holzkonstruktionen, die nach dem jeweils geltenden Stand der Technik entworfen, berechnet, ausgeführt und errichtet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass Holzbauteile keine nennenswerten äußeren und inneren einwirkungsbedingten Schäden aufweisen. Sind auch keine außergewöhnlichen nutzungs-, instandhaltungs- und alterungsbedingten Schäden vorhanden, ist die Arbeitshypothese gerechtfertigt, dass solche Bauteile nach einer schonend durchgeführten Demontage ein zweites langes „Leben“ haben können. Damit wird neben der Güte-, Sortier- oder Festigkeitsklasse des Materials vor allem die Frage nach vorhandenen äußeren und inneren Schäden an wieder- und weiterzuverwendenden Bauteilen zum primären Gegenstand einer Bewertung für die Wiederverwendung. Inwiefern und inwieweit solche Schäden die technische Integrität eines Holzbauteils für ein zweites „Leben“ tatsächlich herabsetzen, ist dann ein essenzieller sekundärer Gegenstand einer Bewertung. Um hier zu angemessenen Entscheidungen zu gelangen, sind umfangreiche praktische und teilweise anspruchsvolle theoretische Aufgaben zu lösen. Dazu sollte man sich das vorhandene Wissen um Kriterien und Bedingungen für technische Integrität von Holzbauteilen vor Augen führen und für den konkreten Wiederverwendungsfall sinngemäß, mit Bedacht, aber auch mit Pragmatismus anwenden. Für ein solches vom Wesen her ingenieurtechnisch-sparsames Vorgehen zu werben, ist die Absicht dieses Referats. Hinweis: Wiederverwendung (ein weiteres Mal mit der ursprünglichen Funktion) und Weiterverwendung (ein weiteres Mal in einer anderen Funktion) sind zweierlei. Aus Gründen der Lesbarkeit wird nachfolgend der Begriff Wiederverwendung synonym für beides verwendet.

## 2 Wiederverwendung im Holzbau

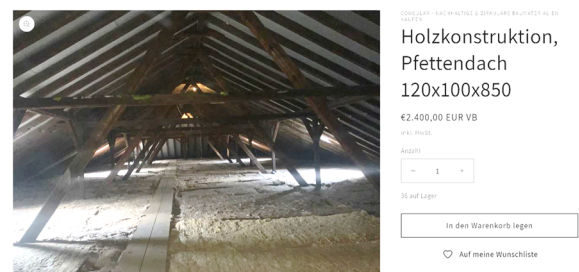
Die für die Gegenwart relevanten Aspekte zur Wiederverwendung von tragenden Holzbauteilen werden im Bericht des Umweltbundesamtes [1] bereits weitgehend erschöpfend dargestellt. Baustoffübergreifende Feststellungen finden sich dort im Abschnitt 1, S. 16ff, im Abschnitt 6, S. 79 und jene, die das Holz im Einzelnen betreffen, im Abschnitt 6.3, S. 104ff. Es gibt zu denken, dass die dort angeführten Erkenntnisse und Handlungs-

empfehlungen bereits zehn Jahre alt sind. Zwischenzeitlich erschienene umfangreiche Werke zum Thema sind [5] - [19]. Einen aktuellen Überblick, nicht nur über die Situation in der Schweiz, gibt Steckel [20]. Trotz des mittlerweile sehr gut erforschten Umfelds und neuerer Handlungsempfehlungen, z. B. [15], ist das Maß der Wiederverwendung von Holzbauteilen und Holzbaustoffen für tragende Zwecke heute noch gering. Dieser Zustand ist direkt beeinflusst und bedingt durch:

- Gesellschaft (u. a. Haltung gegenüber dem Bestand; Bewusstsein und Gewissen der Bauherrenschaft; gegenwärtige Wertschätzung für baulich gebundene Ressourcen und diesbezügliche Wahrnehmungslücken; Wechselwirkung aus Akzeptanz gegenüber Kreislaufprodukten und Ausbau des Angebots)
- Abbruchindustrie und starke etablierte Entsorgungs- und Verwertungswege, die keine bzw. wenig Kompatibilität mit einer Wiederverwendung besitzen
- Bautechnik des Bestands (Fügen und Verbinden) → technischer Einfluss auf Demontage und die demontagebedingten Zusatzschäden und Verluste
- Kosten-, Zeit- und Personalaufwand als Entscheidungskriterium für das Ausbleiben/Durchführen einer schonenden Demontage und behutsamen Bergung
- Verfügbarkeit, Eignung und Nutzen demontierter Bauteile für neue tragende Zwecke (Angebot, Relevanz und Nachfrage)
- Fehlende oder unvollständige erforderliche Daten
- Ungewissheit hinsichtlich Qualität und durchzuführender Prüfungen für Bauteileigenschaften
- Unklarheit bezüglich Gewährleistungs- und Haftungsfragen
- Beprobung von Baumaterialien und -stoffen im Zusammenhang mit heute nicht mehr zulässigen oder unerwünschten Holzschutzmitteln
- Fehlende Prozesskette und logistische Herausforderungen (Bergung, Transport, Inventarisierung, Lagerung und Vertrieb) und Aufwand für Aufbereitung

- Derzeitiger Erfahrungsschatz im Zusammenhang mit Wiederverwendungsprojekten
- Aufklärung zu Vor- und Nachteilen von wieder- und weiterzuverwendenden Holzbaustoffen
- Bislang noch unzureichend genutzte ökologische Vorteile der Wieder- und Weiterverwendung, die aus Einsparpotenzial an Rohstoff und Energie resultieren
- Neuauslegung der gestalterischen Freiheit beim Bauen mit Holzbauteilen und Holzbaustoffen aus dem selektiven Abbruch bzw. Rückbau
- Normen für Wiederverwendung und labelbestimmte Einflussfaktoren, z. B. aus diversen Gebäude-Zertifizierungen

Im Zusammenhang mit der zirkulären Bauwirtschaft gibt es seit Mitte der 1990er Jahre Bauteilbörsen, Kattaster und Angebote im Internet. So genannte Baustoffbörsen wie beispielsweise *restado*, *Concular* oder allgemein *ebay* vermitteln oder verkaufen gebrauchte Baustoffe, wobei Holzbaustoffe und Holzbauteile für tragende Zwecke, siehe **Abb. 2**, eher selten auf den Angebotsseiten anzutreffen sind. Solche Börsen bieten vor allem mannigfaltige Baustoffe und Bauteile für den nicht tragenden Bereich an. Gut organisiert über den Unternehmerverband Historische Baustoffe e. V. ist seit 1992 der Handel u. a. mit entsprechenden Holzbauteilen. Da Unternehmen, Verbände und Börsen private Interessen, unternehmerische Absichten und gesellschaftliche Anliegen relativ schnell erkennen bzw. pragmatisch umsetzen können, sind ihre Formate, z. B. [21] - [23], schon heute ein Vorbild für die Organisationsstrukturen des zukünftigen Handels bzw. des Arbeitens mit gebrauchten Bauteilen.



**Abb. 2:** Beispiel eines Concular-Angebots für eine Holzkonstruktion, Quelle: Concular (2024)

### 3 Selektive Abbrüche mit Potenzial

#### 3.1 Einführung

Gegenwärtige Verfahren beim selektiven Abbruch oder selektiven Rückbau stehen noch im Widerspruch zur Kreislaufwirtschaft. Betrachtet man sie aber genau, zeigen sich Chancen und Potenziale, die sie für Holztragwerke heute schon mit sich bringen können. Vier selektive Abbruch- bzw. Rückbauprozesse, die im Karlsruher Stadtgebiet stattgefunden haben, belegen das nicht nur für den Holzbau. Sie wurden im Zuge einer nicht kontrollierbaren Erhebung entdeckt, beschrieben und analysiert, um für Handlungsmöglichkeiten zu sensibilisieren und Lösungen zur Überwindung von begleitenden Problemen anzustoßen. Sie zeigen vor allem, dass die zimmermanns- und ingenieurmäßige Wahrnehmung für die baulichen Gegebenheiten und für die gebundenen Baustoffe zu einer Wertschätzung und einem Umdenken beim selektiven Abbruch führen können. Daher müssen Verfahren eines schonenden selektiven Rückbaus und einer behutsamen Bergung der Holzbauteile sowie Regeln einer technischen Bewertung für die Wiederverwendung aufeinander abgestimmt sein. Die zweite Wertschöpfung beginnt im materiellen Sinne mit dem Zeitpunkt der Demontage zum Zwecke einer Wiederverwendung. Zuvor muss im baulich intakten Zustand das quantitative und qualitative Wiederverwendungspotenzial erahnt und festgestellt worden sein. Daraus ergibt sich dann, welche Bauteile schonend demontiert, behutsam geborgen und für die Wiederverwendung technisch zu bewerten sind. Die Transformation eines heute praktizierten selektiven Abbruchs hin zu einer schonenden Demontage mit behutsamer Bergung sollte – wo erforderlich und möglich – zügig begonnen bzw. verbessert werden. Es ergibt keinen Sinn, jetzt Zeit verstreichen zu lassen, bis heute bereits gegebene pragmatische Möglichkeiten der Reklassifikation erst mittelbar zu ressourcenschonenden Veränderungen bei den Abbruch- und Rückbauprozessen führen werden, siehe [20]. Die vier nachfolgend vorgestellten Studienobjekte zeigen fallweise ein gutes quantitatives und/oder qualitatives Wiederverwendungspotenzial auf. Sie sollen ein ausdrücklicher Anreiz für die Beschleunigung der beschriebenen Transformation sein. Im Mittelpunkt des Wiederverwendungspotenzials stehen Kantholz und Brettschichtholz.

#### 3.2 Siedlungshaus, Neureut

In Neureut wurde im Sommer 2023 ein um 1932 errichtetes Siedlungshaus mit Holzbalkendecken selektiv abgebrochen, siehe **Abb. 3**. Aufgrund der verständnisvollen Unterstützung durch die Bauherrenschaft, die das Haus zu Gunsten eines Neubaus entfernen ließ, konnten von den insgesamt 36 Dach- und Deckenbalken drei Dachbalken (rund  $12 \times 20 \times 860 \text{ cm}^3$ ) und ein Kellerdeckenbalken (rund  $12 \times 22 \times 740 \text{ cm}^3$ ) einigermmaßen schonend mit dem Sortiergreifer aus dem Baugefüge „entnommen“ werden.



**Abb. 3:** Siedlungshaus in Stockwerksbauweise im OG und Abbruchprozess

Sie wurden behutsam für Prüfw Zwecke geborgen, siehe **Abb. 4**. Weitere zwölf Balken wurden für ein studentisches Bauvorhaben beiseitegelegt, danach zur zukünftigen Baustelle transportiert und dort sachgerecht gelagert.



**Abb. 4:** Brustriegel, Ständer, Dach- und Kellerbalken für Prüfw Zwecke

Die gesamte Holzmenge der Dach-, Erd- und Kellergeschossbalken betrug etwa  $7 \text{ m}^3$ . Da die Dachbalken nur mit Dollen auf den Rähmen fixiert waren und die übrigen in Aussparungen und Mauernischen lagen, konnten sie mit etwas „Gefühl“ vom Baggerführer



aus dem Gefüge gehoben werden. Ausbauschäden ließen sich dabei nicht gänzlich vermeiden, hielten sich aber im Sinne einer Wiederverwendung in Grenzen. Das für Prüfzwecke gesicherte Material wurde vor Ort von den seitlich aufgenagelten Latten befreit, gesäubert und je nach Zustand für gut befunden. Davon abhängig wurde das Material sofort nach DIN 4074-1 (2012) [24] sortiert.

### 3.3 Markgräflichen Palais, Innenstadt

Die Fotografien in **Abb. 5** und **Abb. 6** zeigen den im Sommer 2023 durchgeführten selektiven Abbruch des Dachwerks über dem Ostflügel, einem von zwei Seitenflügeln des Markgräflichen Palais' am Rondellplatz, vgl. **Abb. 1**. Ursprüngliches Baujahr der Seitenflügel ist 1960. Nachweislich **60 m<sup>3</sup>** dem Augenschein nach technisch einwandfreies trockenes Bauholz wurden aus dem Gefüge der beiden Dachwerke gerissen, in Containern gesammelt und mutmaßlich thermisch verwertet. Bei der zweimaligen Begehung des Dachwerks und der handnahen Begutachtung der Hölzer zeigten sich diese in einem tadellosen Zustand.



**Abb. 5:** Ostflügel nach dem Entfernen der Schiefereindeckung



**Abb. 6:** Dachwerk des Ostflügels während des Abbruchs

Mit qualifiziertem Personal und Hilfskräften hätte sich der Anschauung nach mit einer schonenden Demontage ein großer Teil des verbauten Kantholzes für eine Wiederverwendung realisieren lassen können.

### 3.4 Caritas Waldheim, Hardtwald

Im Frühjahr 2024 liefen die selektiven Abbrucharbeiten des im Jahre 1969 in Betrieb genommenen Waldheims. Eine Besonderheit waren die baugleich ausgeführten Gespärre, deren Dachschub über Stahlbetonbalken an den Traufen und -zuglieder kurzgeschlossen werden, siehe **Abb. 7**. In den Gespärren der ursprünglich neun Gebäudeteile sind insgesamt rund 480 ähnlich bearbeitete Kanthölzer mit einem Querschnitt von 12 x 24 cm<sup>2</sup> verbaut worden.



**Abb. 7:** Blick unter die Gespärre

Ausnahmen sind die Dachflächen mit Oberlichtern. Jeweils ein Sparren wird hier über den First hinweg verlängert. Die Sparren messen zwischen Firstgelenk und Ende Fußpunkt ungefähr 4,6 m. Das Gesamtvolumen des Holzes beträgt damit rund **65 m<sup>3</sup>**. Die Kanthölzer stammen nach stichprobenartiger Sichtung aus einem zweistieligen Einschnitt und sind daher spannungs- bzw. rissarm geschwunden. Die vorgefundenen Ästigkeiten, Baumkanten und Faserabweichungen lassen keine Zweifel an S10 aufkommen. Drehwuchs war nicht zu beobachten. Der technische Zustand wirkt einwandfrei. Sehr nachteilig im Sinne der Wertschöpfung für eine Wiederverwendung ist das Verfahren mit dem kombinierten Abbruch-Sortiergreifer. Das Zerreißen des Bolzens im Firstpunkt eines Gespärres oder das Abreißen der Winkelverbindung (mit Nagel) zwischen der Sparrenklaue und der Mauerlatte führten in vielen Fällen zu einer starken Entwertung der Kanthölzer am First und Fußpunkt, vgl. **Abb. 8**. Angesichts der relativ

niedrigen Höhe des Firstpunktes böte sich alternativ ein Lösen des Bolzens oder Abtrennen an.



Abb. 8: Ausbauschaden infolge Zerreißen der Verbindung am First

### 3.5 Pavillon KA300, Schlosspark

Anlässlich des 300. Karlsruher Stadtgeburtstags wurde im Schlosspark nördlich des Schlosses der so genannte Pavillon KA300 errichtet. Neben etlichen Tonnen Stahl wurden **338 m<sup>3</sup>** Brettschichtholz verbaut. Die Standzeit des Bauwerks beschränkte sich auf die Sommermonate im Jahr 2015. Die Montage begann im Frühjahr 2015; der Abbau erfolgte im darauffolgenden Herbst, siehe **Abb. 9**. Das grau lasierte Brettschichtholz war etwa acht Monate lang der Witterung ausgesetzt, erfuhr dadurch eine gewisse Verschlechterung, war aber deshalb keinesfalls wertlos geworden.



Abb. 9: Selektiver Abbruch im November 2015

Aus einem Teil der nach dem Abbruch realisierten Brettschichtholzträger wurden quaderförmige Sitzbänke hergestellt, die im Karlsruher Stadtgebiet aufgestellt wurden. Rückwirkend betrachtet sind der selektive Abbruch des Pavillons und die Wiederverwendung ein wichtiger Beleg dafür, dass bei gegebenem Willen und Inkaufnahme von demontage-

bedingten Verlusten Mittel und Wege gefunden werden, Holz- und Holzwerkstoffe für die Wiederverwendung zu realisieren. Der selektive Abbruch zeigt auch, dass hinsichtlich der Demontage neben verlustbehafteten Sägeschnitten, vor allem dem Lösen von Verbindungsmitteln Aufmerksamkeit zu schenken ist. Wenn man von der Verschlechterung durch die mehrmonatige Bewitterung einmal absieht, spricht eine kurze erste Nutzungsdauer des Materials mit Herstellung unmittelbar vor 2015 für eine einfache Reklassifikation im Sinne einer zweiten Wertschöpfung.

### 3.6 Fazit

Die Kurzanalysen zeigen, dass schonende Demontage und anschließende behutsame Bergung mit kleinen oder großen Mengen an bisweilen qualitativ hochwertigem Material belohnt wird. Es wird in Form von Kollektiven vorliegen, wobei große Stückzahlen gleichartiger Holz- und Holzwerkstoffe mit jeweils konstanten Querschnittsmaßen und Längen für ein hohes Wiederverwendungspotenzial entscheidend sind. In der Regel wird eine obligatorisch durchzuführende Reklassifikation vor einer Wiederverwendung durch die Tatsache erleichtert, dass angetroffenes Nadel-schnittholz vor der Erstverwendung in S10 sortiert wurde oder im Zuge einer Nachsortierung in nennenswerten Teilen der Sortierklasse S10 entsprechen wird. Bei Brettschichtholz wird im Zuge der Herstellung in der Regel eine entsprechende Sortierung stattgefunden haben. Angesichts der nach einer Bergung häufig zu erwartenden Kleinkollektive ist es wünschenswert, über pragmatische, zerstörungsfreie und damit verlustarme Verfahren zur Reklassifikation zu verfügen.

### 3.7 Empfehlungen

Aufgrund der mit den Studienobjekten gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse wird zur zügigen Veränderung der gegenwärtig praktizierten selektiven Abbruchprozesse empfohlen, siehe auch [25]:

- 1 Vor-Ort Begehung mit dem Ziel der Einschätzung des Potenzials zur Wiederverwendung. Erstprüfung, ggfs. ergänzt durch Detailprüfung
- 2 Baustoffanalyse (Schad- und Störstofferkundung) in Abhängigkeit vom erwarteten quantitativen und qualitativen Wiederverwendungspotenzial,

- z. B. durch Beprobung im Labor auf Basis von Bohrkernen oder durch mobile Laboreinheit [26]
- 3 Entscheidung für oder gegen eine behutsame Bergung unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien (z.B. Holzschutzmittel, Anstriche, Harnstoffharz, siehe Abs. 4.3) und der Lösbarkeit von Verbindungsmitteln
  - 4 Entscheidung dagegen → Abbruch/Rückbau
  - 5 Entscheidung dafür → weiter mit Schritt 6
  - 6 Massenermittlung, Holzqualität, verwendete Verbindungsmittel
  - 7 Organisatorische, technische und handwerkliche Planung der schonenden Demontage und der behutsamen Bergung. Auf einen durchgängigen Schutz der Holzbauteile gegen Niederschläge ist zu achten
  - 8 Abtransport in ein naheliegendes Lager zur weiteren Untersuchung und Aufbereitung

## 4 Möglichkeiten der Reklassifikation

### 4.1 Vorbemerkung

Prüfverfahren vor einer Wiederverwendung können im Zusammenhang mit drei unterschiedlichen Fallkonstellationen gesehen werden, die sich angesichts der im Abschnitt 3 beschriebenen selektiven Abbruch- und Rückbauprozesse im Holzbau immer einmal wieder einstellen werden. Die den Fallkonstellationen zugrundeliegende mengenmäßige Unterteilung hat zunächst einen sondierenden Charakter.

- Im Zuge einer schonenden Demontage werden Kleinkollektive geborgen, die jeweils einige wenige gleichartige Bauteile enthalten (insbesondere *b/h/l*/Holzart/Holzwerkstoff identisch). Der Umfang beträgt bis zu 100 Stück.
- Es werden zahlenmäßig sehr umfangreiche Kollektive geborgen, die unter Umständen mehrere Tausend gleichartige Bauteile enthalten.
- Der Umfang der Kollektive liegt zwischen demjenigen der Fallkonstellationen 1 und 2.

Wer Ressourcenschonung tatsächlich praktizieren will, sollte einfache zerstörungsfreie Prüfverfahren

anwenden. Bei Kleinkollektiven gilt das allemal, weil der Schwund an Bauteilen nicht vertretbar ist, wenn man einen Prüfumfang von mindestens 20 oder sogar 40 festlegt, um einen 5%-Quantilwert verteilungsfrei auszuweisen, siehe z. B. DIN EN 384 (2010) [27]. Auch die Kosten für Bauteilprüfungen müssen im Verhältnis zum Ertrag stehen. Vor der Anwendung der im Folgenden beschriebenen Verfahren sind die Bauteile auf Ausschlusskriterien wie unerwünschte Holzschutzmittel oder Anstriche zu prüfen.

### 4.2 Auswirkung abträglicher Einflüsse auf die Bauteilwiderstände und die physikalischen und mechanischen Eigenschaften

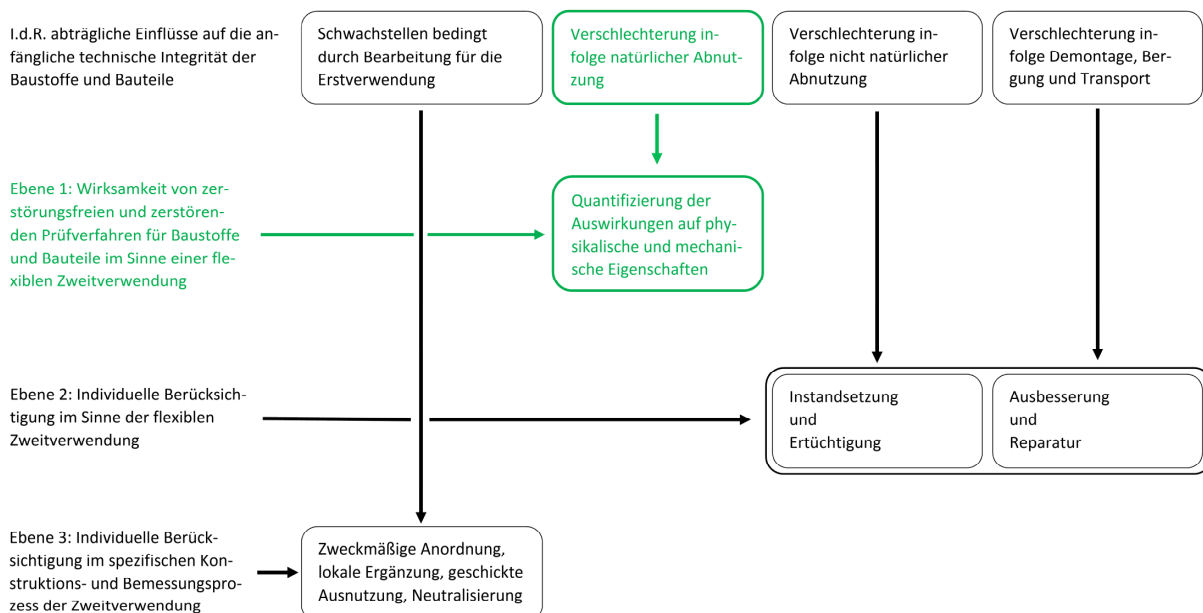
Zerstörende Prüfverfahren vor einer Wiederverwendung werden grundsätzlich mit jenen in DIN EN 408 (2012) [28] zur Ermittlung von Bauteilwiderständen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Bauholz und Brettschichtholz identisch sein. Sie werden im Zusammenhang mit der Wiederverwendung jedoch ihr ursprüngliches Ziel verfehlen, wenn Stücke geprüft werden, die aufgrund der Erstverwendung z. B. durch Bohrungen, Zapfenlöcher und Schlitzte entsprechende Schwachstellen aufweisen und/oder nicht natürlicher Abnutzung unterlagen. Die Stücke werden sehr wahrscheinlich auch durch Demontage, Bergung und Transport weitere Verschlechterungen erfahren, die auf diesbezügliche Schäden zurückzuführen sind. Diese drei Einflüsse führen zu einer Verringerung der Bauteilwiderstände und daher zu einer schwer zu quantifizierenden Veränderung insbesondere der mechanischen Eigenschaften. In **Abb. 10** sind in der ersten Zeile diese drei abträglichen Einflüsse in der zeitlichen Abfolge dargestellt, in der sie zu wirken beginnen. Die Ebenen 2 und 3 der **Abb. 10** zeigen Vorschläge für Maßnahmen, wie diesen Einflüssen bei einer Wiederverwendung zu begegnen ist.

Es sollte nicht das Ziel einer Baustoff- und Bauteilprüfung sein, zum Zwecke der Bewertung eines geborgenen Kollektivs eine Stichprobe von Baustoffen oder Bauteilen mit Schwachstellen und/oder den vorgenannten Verschlechterungen zu prüfen. Da die zu erwartenden Schwachstellen aus der Erstverwendung und die Verschlechterungen infolge nicht natürlicher Abnutzung und ab Demontage vielfältig sind, werden entsprechende Kollektive hinsichtlich der qualitativ unterschiedlichen Einflüsse auf die

technische Integrität zu heterogen sein. Eine Übertragbarkeit von der Stichprobe auf das Kollektiv wird daher nicht gegeben sein. Ein solches Übertragungsproblem ließe sich auch nicht mit der Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten zuverlässig lösen, z. B. in Anlehnung an Abminderungsfaktoren in DIN EN 384 (2010) [27]. Auch die Auswirkungen solcher Schwachstellen und Verschlechterungen auf die Bauteilwiderstände und Baustoffeigenschaften lassen sich nicht pauschal abschätzen.

Mit Prüfverfahren sollten daher nur physikalische und mechanische Eigenschaften und Bauteilwider-

stände solcher Baustoffe bzw. Bauteile ermittelt werden, die sich lediglich infolge natürlicher Abnutzung über die Jahre hinweg verschlechtert haben. Den entsprechenden Zusammenhang zwischen Wirksamkeit der Prüfverfahren, Verschlechterung nur infolge natürlicher Abnutzung und Quantifizierung der Auswirkungen zeigt **Abb. 10** in der ersten Ebene in Grün. Nur in diesem Zusammenhang sind die nachfolgend dargestellten Prüfverfahren zu sehen und gültig. Das Niveau der physikalischen und mechanischen Eigenschaften und der Bauteilwiderstände sollte primär durch zerstörungsfreie Verfahren ermittelt oder durch Erwartungswerte ausgedrückt werden.



**Abb. 10:** Drei Ebenen des technischen Umgangs mit Holzbaustoffen und -bauteilen aus dem selektiven Abbruch oder Rückbau

### 4.3 Zerstörungsfreie Prüfungen

Es ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren vor allem Kantholz und Brettschichtholz in nennenswertem Maße im selektiven Abbruch oder Rückbau anfallen werden. Zerstörungsfreie Verfahren für eine (Re)Klassifikation von Nadelschnittholz und Brettschichtholz sollten zum jetzigen Zeitpunkt an pragmatischen, wirtschaftlichen und ganzheitlichen Gesichtspunkten ausgerichtet werden. Bei unspezifischem Nadelschnittholz ist mindestens eine visuelle Sortierung erforderlich. Bei Brettschichtholz sollte die ursprüngliche Klassifikation herausgefunden oder – falls keine Informationen vorhanden sind – konser-

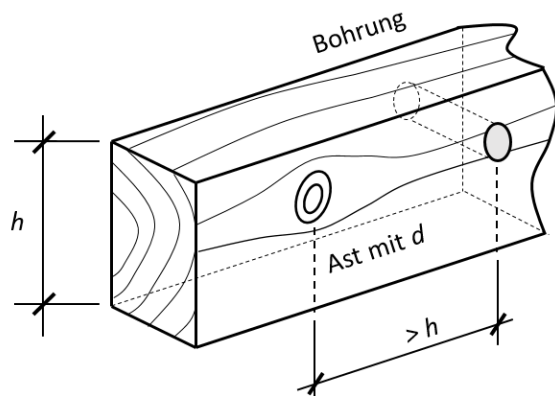
vativ geschätzt werden. Der Schwerpunkt zerstörungsfreier Verfahren liegt bei Brettschichtholz dann auf der Feststellung einer etwaigen Verschlechterung infolge natürlicher Abnutzung. Die Holzfeuchte sollte für beide Holzprodukte nach dem Verfahren der elektrischen Widerstandsmessung ermittelt werden.

#### Visuelle Sortierung von Nadelschnittholz

Für Bretter und Bohlen ist DIN 4074-1 (2012) [24] anzuwenden. Ein auf die Wiederverwendung abzielendes zusätzliches Sortierkriterium muss vor allem ausschließen, dass in unmittelbarer Nähe zu Einzelästen oder im 15-cm-Bereich von Astansammlungen dem Augenschein nach tragfähigkeitsmindernde



Schwächungen infolge Erstnutzung oder vor allem Verschlechterungen infolge Ausbauschäden vorliegen. Andernfalls würde die visuelle Sortierung an Wirksamkeit im Zusammenhang mit der Tragfähigkeit einbüßen. Das erfordert noch aufzubauende Erfahrung. Alle anderen Schwächungen infolge Erstnutzung oder Verschlechterungen infolge Ausbauschäden dürfen dem Augenschein nach die Tragfähigkeit nicht stärker als die größte Ästigkeit herabsetzen. Der Anschauung nach wird man viele solcher Schwächungen oder Verschlechterungen nicht tragfähigkeitsneutral reparieren können. Für vorwiegend hochkant beanspruchte Bretter und Bohlen sowie für Kantholz gilt bei einer alleinigen visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 (2012) [24] das vorgenannte zusätzliche Sortierkriterium sinngemäß, vgl. **Abb. 11**. Ein Beispiel für einen oberflächlichen und daher unkritischen Ausbauschaden verdeutlicht das Foto in **Abb. 12**. Teil der visuellen Sortierung zur (Re)Klassifikation von Nadelholz nach DIN 4074-1 (2012) [24] sind auch Verfärbungen, Fäule und Insektenfraß.



**Abb. 11:** Beispielhafte Empfehlung für Mindestabstände zwischen Ast und mittiger Bohrung infolge Erstnutzung, hier: hochkant beanspruchtes Kantholz



**Abb. 12:** Ausbauschaden an Kantholz, bei S10 tolerierbar

### Kombinierte visuelle und maschinelle Sortierung von Brettern, Bohlen und Kantholz

Aus der maschinellen Sortierung eignen sich für Bretter, Bohlen und Kantholz zusätzlich zur visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 (2012) [24] die Ermittlung der Brutto Rohdichte mit einer Waage und die anschließende Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls auf Grundlage einer Längsschwingung 1. Ordnung. Das vorgenannte zusätzliche Sortierkriterium gilt auch hier sinngemäß.

Mit dieser Kombination ist die Möglichkeit gegeben, für Bretter und Bohlen (jeweils flachkant beansprucht) und Kanthölzer mit einem relativ einfachen Instrumentarium für jedes individuelle Stück einen Erwartungswert der Biegefestigkeit zu berechnen. Dieser Erwartungswert muss zur Berücksichtigung des statistischen Rauschens zu einem Lagemaß im Bereich des 5%-Quantils verringert werden. Das Ergebnis entspricht dann einem individuellen Rechenwert bzw. einer individuellen charakteristischen Biegefestigkeit, damit im Sinne des Sicherheitskonzepts während der fernerer Nutzungsdauer eine angemessene Zuverlässigkeit gewährleistet bleibt. Das Format des individuellen Rechenwerts ist nicht neu. Es liegt beispielsweise dem Pilodyn-basierten Verfahren zur Bestimmung des 5%-Quantils der Rohdichte eines individuellen Nadelholzes aus Fichte, Tanne oder Kiefer zugrunde, siehe [29] und [30].

Aus der Forschungsarbeit [31] ist die Regressionsbeziehung (1) bekannt. Mit ihr kann der Erwartungswert der Biegefestigkeit ( $f_{m,p}$  in  $\text{N/mm}^2$ ) von Fichtenbrettern, -bohlen und -kantholz in Übereinstimmung mit der Biegefestigkeit ( $f_m$  in  $\text{N/mm}^2$ ) nach DIN EN 408 (2012) [28] berechnet werden. Erklärende Variablen sind die Querschnittsbreite ( $b$  in mm), Querschnittshöhe/-dicke ( $h$  in mm), Brutto Rohdichte ( $\rho_{\text{brutto}}$  in  $\text{kg/m}^3$ ) und der dynamische Elastizitätsmodul ( $E_{\text{dyn}}$  in  $\text{N/mm}^2$ ), ermittelt aus einer Längsschwingung 1. Ordnung. Antwortvariable ist die Biegefestigkeit nach DIN EN 408 (2012) [28].

$$f_{m,p} = 13,4 - 0,0132b - 0,0449h - 0,0414 \rho_{\text{brutto}} + 0,00454E_{\text{dyn}} \quad (1)$$

Die Regressionsbeziehung (1) beruht auf einer multiplen linearen Regressionsanalyse. Der Mittelwert der

Abstandsquadrate der zufälligen Fehler  $e_i$  beträgt 86,84. Das entspricht einer Normalverteilung mit Mittelwert 0 und Standardabweichung  $s_e = 9,32 \text{ N/mm}^2$  der zufälligen Fehler. Gleichung (1) gilt für S10-sortierte Bretter bzw. Bohlen mit Breiten von 100-220 mm und Dicken von 20-48 mm und S10-sortierte Kanthölzer mit Breiten von 50-80 mm und Höhen von 100-240 mm. Der Gesamtumfang der ausgewerteten Beobachtungen beruht auf 274 Brettern und 127 Kanthölzern.

Zur exakten Ermittlung des Erwartungswerts und des Lagemaßes im Sinne eines individuellen Rechenwertes der Biegefestigkeit ist folgendermaßen vorzugehen: Das Nadelschnittholz ist so schonend wie möglich auszubauen und zu bergen und sofort unter Dach trocken zu lagern. Es ist gemäß DIN 4074-1 (2012) [24] in S10 und besser einzusortieren. Die Holzfeuchte ist mittels elektrischer Widerstandsmessung zu ermitteln. Es werden Breite ( $b$ ), Höhe/Dicke ( $h$ ), Länge ( $\ell$ ), Masse ( $m$ ) und die Frequenz einer Längsschwingung 1. Ordnung ( $f_0$ ) gemessen. Die Bruttorechtdichte und der dynamische Elastizitätsmodul sind nach Gleichung (2) bzw. (3) zu berechnen.

$$\rho_{\text{brutto}} = m/(b h \ell) \quad (2)$$

$$E_{\text{dyn}} = (2 f_0 \ell)^2 \rho_{\text{brutto}} \quad (3)$$

In Gleichung (4) wird von jedem Erwartungswert ein Vielfaches ( $x$ ) der Standardabweichung  $s_e$  der zufälligen Fehler abgezogen, so dass die „wahre“ unbekannte Biegefestigkeit den individuellen Rechenwert ( $f_{m,\text{in}}$  in  $\text{N/mm}^2$ ) mit einer festzulegenden geringen Wahrscheinlichkeit unterschreitet. Da Gleichung (1) auf einer Analyse mit 401 Schnitthölzern beruht, bleiben statistische Unsicherheiten unberücksichtigt.

$$f_{m,\text{in}} = 13,4 - 0,0132b - 0,0449h - 0,0414 \rho_{\text{brutto}} + 0,00454 E_{\text{dyn}} - x \cdot s_e \quad (4)$$

Mit der Empfehlung  $x = 1,65$  bzw.  $x \cdot s_e = 1,65 \cdot 9,32 = 15,4 \text{ N/mm}^2$  beträgt die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für jedes individuelle Stück nominell 5 %. Für die individuelle charakteristische Biegefestigkeit ( $f_{m,k,\text{in}}$  in  $\text{N/mm}^2$ ) gilt dann Gleichung (5).

$$f_{m,k,\text{in}} = 13,4 - 0,0132b - 0,0449h - 0,0414 \rho_{\text{brutto}} + 0,00454 E_{\text{dyn}} - 15,4 \quad (5)$$

Zur einstweiligen Validierung wurden zwei als Zweifeldträger verbaute Dachbalken (D2 und D5) und ein als Zweifeldträger verbauter Kellerbalken (K2), die beim selektiven Abbruch des über 90 Jahre alten Siedlungshauses geborgen wurden (siehe Abschnitt 3.2), jeweils in eine Nord- und Südhälfte getrennt. An den Hälften wurden die für Gleichung (1) erforderlichen Werte der erklärenden Variablen gemessen bzw. ermittelt und individuelle Werte  $f_{m,k,\text{in}}$  berechnet. Die Biegefestigkeit wurde für alle sechs Balkenhälften in Anlehnung an DIN EN 408 (2012) [28] in Vier-Punkt-Biegeversuchen bestimmt. **Tab. 1** enthält für jede Balkenhälfte die Ausprägungen der erklärenden Variablen, die individuelle charakteristische Biegefestigkeit und die Versuchswerte. Nur in einem Fall (in Rot) ist die experimentelle Festigkeit etwas geringer als der individuelle charakteristische Wert. Trotz Einflüssen aus Bearbeitung für die Erstnutzung, Verschlechterung und Ausbauschäden, liegt der Mittelwert der Versuchswerte deutlich über demjenigen der individuellen charakteristischen Werte.

**Tab. 1:** Gegenüberstellung zwischen individuellen Rechenwerten und Versuchswerten

Balken	$b$	$h$	$\rho_{\text{brutto}}$	$E_{\text{dyn}}$	$f_{m,k,\text{in}}$	$f_m$ (Versuch)
D2/Nord	118	192	415	10580	18,7	<< 32,0
D2/Süd	118	192	380	10440	19,5	<< 30,1
D5/Nord	117	192	415	11610	23,4	<< 41,2
D5/Süd	117	191	409	10440	18,4	<< 29,1
K2/Nord	115	229	475	12230	22,1	<< 42,1
K2/Süd	115	229	462	13810	29,8	> 29,6
					MW: 22,0	< MW: 34,0
					MIN: 18,4	

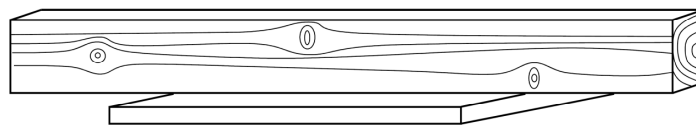
Mit dem auf individuellen Rechenwerten beruhenden Verfahren ist man in der Lage niedrige, aber auch hohe Festigkeitswerte stückbezogen auszuweisen. Da das Konstruieren und Bemessen mit Bauteilen aus dem selektiven Abbruch und Rückbau, verglichen mit neuen Baustoffen und Festigkeitsklassen, individueller ist, wird eine besondere Berücksichtigung der verfügbaren Bauteile mit ihren Eigenarten zur Voraussetzung. Die Kenntnis stückbezogener physikalischer und mechanischer Eigenschaften könnte dann ein gewisses Potenzial besitzen und eine weniger distanzierte Form des Gestaltens, was die Beziehung zwischen Mensch und Material betrifft, befördern, vgl. hierzu die Überlegungen zur „Architektur im Rückwärtsgang“ [32]. Für eine Bemessung sollte festgelegt werden: Die entsprechende Reklassifikation von Schnittholz erfolgt bei großer Streuung

der Rechenwerte unter Zugrundelegung des Minimalwerts (MIN) oder bei kleiner Streuung unter Zugrundelegung des Mittelwerts (MW) der Werte  $f_{m,k,in}$  für ein geborgenes Kleinkollektiv. Im Falle der sechs untersuchten Kanthölzer, deren Rechenwerte zwischen 18,4 und 29,8 N/mm<sup>2</sup> liegen, entspräche der Mittelwert C22. Die Brutorohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul sind ebenfalls bekannt. Mit diesen Werten kann ein Festigkeitsprofil individuell vervollständigt werden. Es sind auch strengere Kriterien wie z. B. der Minimalwert der Rechenwerte für eine Klassifikation möglich. Eine Reklassifikation sollte im Sinne der jetzt gebotenen Ressourcenschonung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit vorgenommen werden. Eine praktische Umsetzung des Verfahrens, z. B. in einem Unternehmen für gebrauchte Holzbauteile, könnte prinzipiell nach dem in **Abb. 13** dargestellten Ablauf erfolgen.

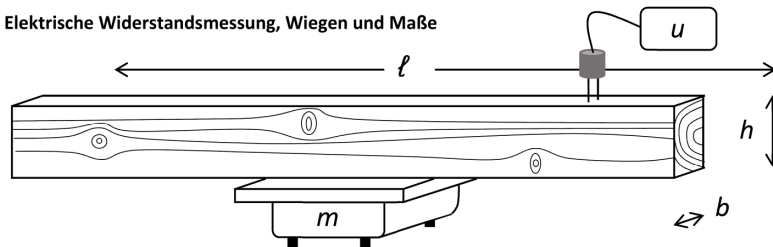
### Brettschichtholz

Bretter für Brettschichtholz werden herstellungsbedingt in vielen Fällen bereits visuell oder maschinell sortiert worden sein. Soweit es gelingt, die ursprüngliche Klassifikation eindeutig festzustellen, liegt der Schwerpunkt zerstörungsfreier Verfahren auf der Feststellung einer etwaigen Verschlechterung der Klebfugen (Flächenverklebung und Keilzinken) und des Holzes infolge Rissbildung in Faserrichtung, Ringschäle, latente Risse, z. B. [33] und [34], oder Scherversagen. Damit sind Tragfähigkeitseinbußen zu quantifizieren. Feststellungen zur Verschlechterung der Klebfugen und des Holzes werden – soweit für sinnvoll und notwendig erachtet – ebenfalls für den Umfang und die Art und Weise von Instandsetzungs- und Reparaturarbeiten am BS-Holz-Bauteil ausschlaggebend sein.

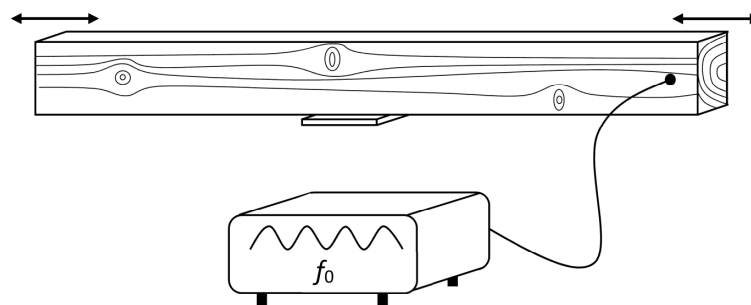
#### 1. Visuelle Sortierung in S10



#### 2. Elektrische Widerstandsmessung, Wiegen und Maße



#### 3. Längsschwingung 1. Ordnung



#### 4. Individuelle geometrische, physikalische und mechanische Eigenschaften

S10 nach DIN 4071-1

Holzfeuchte, Masse, Länge, Breite, Dicke → Brutorohdichte

Frequenz → dynamischer Elastizitätsmodul ≈ 105 % des statischen Elastizitätsmoduls

→ Erwartungswert und Rechenwert der Biegefestigkeit in Übereinstimmung mit DIN EN 408

**Abb. 13:** Praktische Schritte der kombinierten visuellen und maschinellen Sortierung

Im Idealfall wird man Brettschichtholz demontieren und bergen können, das nach MBO [35] ein dauerhaft befestigtes und noch lesbares Übereinstimmungszeichen aus Aluminium o. ä. trägt. Sehr selten wird man kurz- und mittelfristig im selektiven Abbruch oder Rückbau bereits mit dem CE-Kennzeichen versehenes Brettschichtholz antreffen, vgl. **Abb. 14**. Das gilt auch deswegen, weil eine dauerhafte CE-Kennzeichnung seit dem Jahr 2013 nicht einheitlich gehandhabt wird. Selbstklebend am Hirnholz aufgebrachte Kennzeichen aus Papier werden relativ schnell abfallen oder unleserlich werden. In Zukunft ist daher bei entsprechendem Material, verbaut ab dem Jahr 2013, zunehmend mit Einschränkungen bei der unmittelbaren Identifikation der Festigkeitsklasse zu rechnen.



**Abb. 14:** Selbstklebend aufgebrachte CE-Kennzeichnung, GL24c

Beim dauerhaft am BS-Holzbauteil befestigten Ü-Zeichen hingegen ist eine Übereinstimmung mit einer technischen Regel o. ä. formal festgehalten. Zunächst sollten daher einfache Sichtkontrollen auf die Flanken, die Hirnholzflächen und die Decklamellen durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob die im Ü-Zeichen angegebene Festigkeitsklasse plausibel erscheint. Neben der Holzfeuchte sind im Zweifelsfall die Bruttoreohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul in Längsrichtung in Übereinstimmung mit dem in **Abb. 13** dargestellten Verfahren zu ermitteln. Die Bruttoreohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul können dann einer Orientierung für eine Reklassifikation in Anlehnung an DIN EN 14080 (2013) [36] dienen. Dabei sind die Bruttoreohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul mit den Tabellenwerten  $\rho_{g,mean}$  bzw.  $E_{0,g,mean}$  zu vergleichen, siehe DIN EN 14080 (2013) [36] Tabelle 5 für homogenes Brettschichtholz. Bei kombiniertem Brettschichtholz wird der aus einer Längsschwingung ermittelte Elastizitätsmodul in der

Regel etwas geringer ausfallen als derjenige, der aus einer statischen Biegebeanspruchung herrührt. Die dadurch bedingte Unterschätzung des tatsächlichen Biege-Elastizitätsmoduls führt daher zu einer auf der sicheren Seite liegenden Reklassifikation.

Nach der Sichtkontrolle sind folgende Überprüfungen für die Beurteilung der Tragfähigkeit vor einer potenziellen Wiederverwendung unabdingbar. Hierbei wird zwischen zwei Quellen für Verschlechterungen und Ausschlusskriterien bzw. weiteren Einschränkungen unterschieden:

1. Einschränkungen infolge herstellungsbedingter Gegebenheiten und Verschlechterung infolge natürlicher Abnutzung

- außergewöhnlich große Ästigkeiten oder kritisch anmutende Häufungen von übereinanderliegenden Ästigkeiten in den ersten zwei Randlamellen
- offene Keilzinkenverbindungen in den Randlamellen
- äußere (nicht latente) Schwindrisse und offene Klebfugen, Empfehlung:  $\leq b/8$  je Seite mit 0,1-mm-dicker Fühlerblattlehre gemessen
- Bei Verdacht auf umfangreichere, innere (latente) Schwindrissbildung oder Ringschäle, siehe **Abb. 15**, welche durch eine Begutachtung der Hirnholzflächen nur sehr eingeschränkt erkannt werden können, kann das in Abs. 5 beschriebene Verfahren angewendet werden.
- Verformungen wie Krümmungen u. Verdrehungen
- mechanischer Verschleiß, z. B. infolge Abrieb, Reinigung, Verkehr
- Verfärbung

2. Einschränkungen infolge nicht natürlicher Abnutzung

- Feuchteschäden, z. B. infolge Dachundichtigkeit oder unplanmäßigem Tauwasser
- Pilzbefall bzw. Fäulnis
- Insektenbefall
- Beeinträchtigungen infolge nicht bestimmungsgemäßer Nutzung, z. B. Fahrzeuganprall



- Beeinträchtigungen infolge unzureichender Instandhaltung, z. B. Verschmutzung, abgeblätterte Anstriche, fehlende Verstöpselungen
- Schäden infolge Vernachlässigung/Vandalismus

### 3. Ausschlusskriterien und weitere Einschränkungen

- Brettschichtholz mit Harnstoffharz-Klebstoffen, d. h. Verbundbauteile mit UF-Klebfugen und mit für UF-Klebfugen abträglichen Nutzungsbedingungen wie vorausgegangenen hohen Feuchtebeanspruchungen, siehe [37]
- Holzschutzmittel und Anstriche
- innenliegende Störstoffe, die beim Auftrennen zu kleineren Bauteilen und beim Hobeln besonders zu berücksichtigen sind, z. B. eingeklebte Gewindestangen, abgebrochene Schrauben

Weiterführende Hinweise sind im Brettschichtholz-Merkblatt zur Bewertung von Klebfugen in Brettschichtholzbauteilen im Bestand zu finden [38].



**Abb. 15:** Prüfkörperquerschnitt eines Brettschichtholzes mit inneren (latent) Querszugrissen infolge äußerer Feuchteinwirkung, Hirnholz abgedichtet, Rissbreite = jeweiliger Abstand zwischen zwei Markierungen, Quelle [33] (links) und Hirnholz eines im Alpenraum verbauten Brettschichtholzträgers mit natürlicher äußerer Rissbildung (rechts)

### OSB-Platten

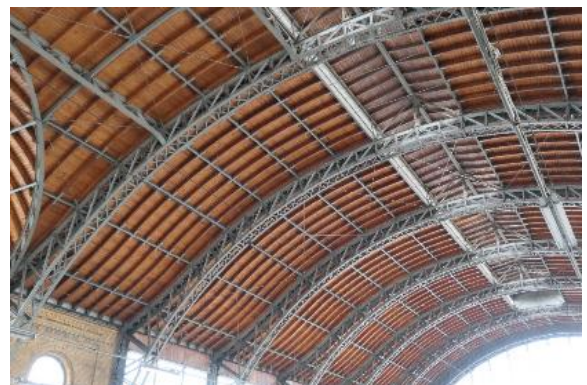
Ursprünglich geschraubte und sorgfältig von der Unterkonstruktion gelöste OSB-Platten sollten mit einfachen Sichtkontrollen und haptischen Tests geprüft werden. Sie dürfen nur bei augenscheinli-

cher technischer Integrität für eine Wiederverwendung in Betracht gezogen werden. Folgende Kriterien werden im anfänglichen Stadium der Wiederverwendung empfohlen:

- Platten nicht rissig, nicht wellig und nicht verzerrt
- farblich und geruchlich ohne nennenswerte Einschränkung
- Schnittkanten mit einheitlicher Dicke, nicht ausgefranst oder aufgequollen
- Holzspäne unmittelbar an der Oberfläche fest mit unteren Lagen verbunden und nicht „schuppig“
- Löcher aus Erstverwendung nicht übermäßig aufgeweitet oder ausgebrochen

### 4.4 Zerstörende Prüfungen im Holzbau

Zerstörende Prüfungen sollten vor der Wiederverwendung im Holzbau eine Ausnahme bleiben. Bevor diese als Basis für eine Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften in Betracht gezogen werden, sollten Möglichkeiten geprüft worden sein, das Holz nicht tragend oder nur in untergeordneten tragenden Bauteilen einzusetzen. Wenn tatsächlich die Fallkonstellation 2 großer Kollektive gegeben ist, siehe Abschnitt 4.1, dann können aus Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit Prüfungen nach DIN EN 408 (2012) [28] und eine Klassifikation des Materials nach DIN EN 384 (2010) [27] zweckmäßig werden. Man stelle sich die fiktive Aufgabe vor, die Kanthölzer und Bretter in dem etwa 110 m langen Tonnendach über den Bahnsteigen des Bahnhofs Hamburg-Dammtor für eine Wiederverwendung zu klassifizieren, siehe **Abb. 16**.



**Abb. 16:** Blick in ein Viertel des Tonnendachs über dem Bahnhof Hamburg-Dammtor

In den 14 Bogenfeldern verlaufen jeweils neun halbkreisförmig angeordnete Kantholzstränge mit jeweils 18 Stücken. Die Anzahl der Kanthölzer beträgt dann:  $14 \times 9 \times 18 = 2268$ . Das spreche für Verhältnisse, unter denen ein nach fachkundiger Einschätzung und Auswahl definierter Bruchteil der Stücke zerstörend geprüft werden könnte. Da eine Reklassifikation von Schnittholz aus dem selektiven Abbruch bzw. Rückbau grundsätzlich außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 384 (2010) [27] liegt, sind Probenauswahl und -umfang an pragmatischen Gesichtspunkten und an den gegebenen Voraussetzungen individuell auszurichten.

## 5 Entwurf, Bemessung und Konstruktion

Im Rahmen des Tragwerksentwurfs wird die Einhaltung der folgenden Empfehlungen die Zuverlässigkeit von Tragwerken und Konstruktionen aus wieder- und weiterzuverwendendem Holz günstig beeinflussen:

- Tragwerksentwürfe, deren globales Gleichgewicht insbesondere auf der Druck- und Biegetragfähigkeit in Faserrichtung beruht (günstige Interaktion bei Druck und Biegung)
- Konstruktionen mit Querdruckbeanspruchung
- Vermeidung von geometrie- oder lastbedingten Querkzugspannungen und Verzicht auf spaltgefährdete Verbindungen

Die Umsetzung der vorgenannten Punkte kann durch Angabe von reduzierten Festigkeitsprofilen befördert werden. Festigkeitsklassen für wieder- und weiterzuverwendendes Holz würden eingeschränkte Festigkeitsprofile erhalten, z. B. mit einer zu null gesetzten Querkzugfestigkeit oder reduzierten Schubfestigkeit zur Berücksichtigung außen erkennbarer oder latenter, innerer Schwindrisse, siehe auch [39], S. E46.

Abträgliche Einflüsse auf die Bauteilwiderstände, die aus der Bearbeitung für die Erstverwendung, aus nicht natürlicher Abnutzung und ab Demontage herrühren, ist mit den Maßnahmen auf den Ebenen 2 und 3, siehe **Abb. 10**, mit zweckmäßiger Anordnung, geschickter Ausnutzung, Neutralisierung, lokaler Ergänzung, Instandsetzung, Ertüchtigung, Ausbesserung und Reparatur zu begegnen.

Nachdem Material zur Wiederverwendung reklassifiziert wurde, kann es nach den Regeln des Eurocodes [40] zum Entwurf und zur Bemessung von Holzkonstruktionen verwendet werden. Potenzielle Unverträglichkeiten zwischen dem Umgebungsklima der früheren Nutzung und dem Umgebungsklima der vorgesehenen Nutzung sind für den individuellen Fall zu bewerten. Auch eine Gegenüberstellung der Vorbelastung (Hauptbelastung) und der geplanten (Haupt-)Belastung sollte Teil der Planungen sein. Um der Vorbelastung aus dem ersten im zweiten „Leben“ Rechnung zu tragen, sollte bei der Einwirkungsdauer *ständig* der Modifikationsbeiwert  $k_{\text{mod}}$  um 10 % reduziert werden, siehe [25] und [41].

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die materiellen Voraussetzungen für die Wiederverwendung schaffen wir, indem wir den imaginären Film über die Lieferung von Bauteilen zur Baustelle und die Montage rückwärts laufen lassen. Am besten mit genügend Zeit, um den Wert der Bauteile für die neuen Zwecke zu errahnen und richtig einzuschätzen. Wenn Bauteile weiterhin tragfähig und nutzbar sind, werden sie dementsprechend schonend und verlustarm demontiert.

Wir sollten uns bei einer Wertinventur nicht nur von der Anmutung einer Oberfläche leiten lassen, sondern müssen uns vor allem auf die technische Integrität im Inneren eines Bauteils verlassen können. Das setzt Erfahrung, auch in der sicheren Bewertung der Tragfähigkeit, voraus.

Bringen Sie sich daher mit Ihrer Erfahrung, Ihrem Können und Ihren Fachkenntnissen ein. Handeln Sie, wenn Sie sehen, dass sich im Zuge eines selektiven Abbruchs oder Rückbaus Baustoffwerte offenbaren, die in einer neuen Konstruktion verwendet werden können. Wagen Sie es, die technische Integrität eines Bauteils selbst nachzuweisen. Wenn man das nicht tut, wird man das Geschäft anderen überlassen. Und wenn die anderen es auch nicht tun, ändert sich nichts.

Zur Beurteilung und Bewertung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften und der Bauteilwiderstände stiftet das Referat einige Impulse, die in vielen Fällen zum pragmatischen Nachweis einer Eignung

als Bauprodukt für ein zweites „Leben“ führen können. Wichtig dabei ist, dass man neben den Stärken des Holzes, das sind z. B. die Druckfestigkeit in und quer zur Faserrichtung, auch die Schwächen des Holzes kennt. Insofern ist bei Brettschichtholz die Beurteilung von äußeren und inneren Rissen in Faserrichtung und die Bewertung der Schub- und Querkzugfestigkeit verantwortungsvoll und faktenbasiert durchzuführen. Lieber sollte man bei Zweifeln Tragsysteme wählen, deren globales Gleichgewicht nicht von hoher Schub- oder Querkzugfestigkeit abhängt.

Die Wiederverwendung wird uns Phantasie, Kreativität und Erfindungsgabe abverlangen, auch einen neuen Dialog mit Zimmerleuten, Architektinnen und Architekten. Ein Teil der alten Bauteile wird im Zuge der Bemessung für ein zweites „Leben“ aufgrund ihrer technischen Integrität nach Standardverfahren zu behandeln sein, weil sie die materiellen Voraussetzungen dafür offensichtlich erfüllen werden. Ein anderer Teil der alten Bauteile aber braucht unsere besondere Zuwendung: Sie in neuen Konstruktionen unterzubringen, wird uns möglicherweise an den Ursprung zurückführen, wofür wir als Zimmerleute, Ingenieurinnen und Ingenieure ausgebildet wurden. Konstruktionen sind nicht nur nach unserem freien Willen oder nach den in Normen vorgezeichneten Wegen zu entwerfen und zu bemessen, sondern entsprechend dem wahren Vermögen des Materials zu gestalten. Diese Aufgabe kann Freude bereiten und zu einem lange währenden und damit zufriedenstellenden Ergebnis führen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, A., Asmus, S., Schmidt, S. Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S., Lau, J. J.: Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. TEXTE 93/2015. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015
- [2] Das Haus der Erde – Positionen für eine klimagerechte Architektur in Stadt und Land. 3. Auflage, Bund Deutscher Architektinnen und Architekten BDA, Berlin, 2020
- [3] Zukunft Bau Kongress 2021 BAUWENDE – klimabewusst, erhalten, erneuern, bauen. Zukunft Bauen - Forschung für die Praxis, Bd. 31; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), Bonn, 2022
- [4] Zukunft Bau Kongress 2023 BAUWENDE – umbruch aufbruch. Zukunft Bauen - Forschung für die Praxis, Bd. 33; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), Bonn, 2024
- [5] Meetz, M., Mettke, A., Liesemeier, B., Schmidt, S., Verheyen, F.: Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden (Broschüre). Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.), 2015
- [6] Risse, M., Richter, K.: CaReWood – Cascading Recovered Wood - Teilvorhaben: Ökologische und ökonomische Bewertung der kaskadischen Holznutzung. Schlussbericht der Technischen Universität München, 2018
- [7] Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hrsg.), Berlin 2019
- [8] Hauke, B., Lemaitre, C., Röder, A., (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2021
- [9] John, V., Stark, T.: Wieder- und Weiterverwendung von Baukomponenten (RE-USE). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), Bonn, 2021
- [10] Küpfer, C., Fivet, C.: Selektiver Rückbau – Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung

- der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche. Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne, Lausanne/Freiburg, 2021
- [11] Müller, D., Moser, D.: Rückbau und Wiederverwendung von Holzbauten. Studie, durchgeführt von PIRMIN JUNG Schweiz AG, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern, 2022
- [12] Schuster, S., Geier, S.: circularWOOD Paradigmenwechsel für eine Kreislaufwirtschaft im Holzbau. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), Bonn, 2023
- [13] Reuse und Recycling. zuschnitt 23, Nr. 88, 2023
- [14] Padalkina, D., Schäufele, J., Teuffel, P.: Geschäftsmodelle für zirkuläres Bauen und Sanieren. Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), Berlin, 2023
- [15] Wiederverwertung von Bauholz für tragende Zwecke. Lignatec-Mitteilung 36/2023
- [16] Weigl-Kuska, M.: Kreislaufwirtschaft im Holzbau. Holzforschung Austria 21 (2023), Heft 4, S. 3-5
- [17] Weigl-Kuska, M., Schomakers, J.: Strategien für Massivholzkreisläufe. Holzkurier (2023), Nr. 35, S. 21
- [18] Lampugnani, V. M.: Gegen Wegwerfarchitektur. Verlag Klaus Wagenbach, Berlin, 2023
- [19] Hebel, D.E., Wappner, L., Blümke, K., Bytomski, S., Calavetta, V., Häberle, L., Hoffmann, P., Holtmann, P., Hoss, H., Lenz, D., Schneemann, F. (Hrsg.): Sortenrein Bauen – Methode Material Konstruktion. Detail, München, 2023
- [20] Steckel, V.: Auch Wiederverwendung bedeutet Innovation. Holz-Zentralblatt (2024), Nr. 9, S. 152-155
- [21] Trinkert, A.: Ressourcenschonend seit Jahrzehnten. Der Zimmermann (2023), Nr. 8, S. 30-33
- [22] Ryll, C.: Holz bleibt. Mikado (2022), Nr. 9, S. 14-15
- [23] Ryll, C.: Upcycling lohnt sich – für Umwelt und Handwerk. Mikado (2023), Nr. 5, S. 38-40
- [24] DIN 4074-1:2012-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. DIN, Berlin
- [25] Leitfaden zur Wiederverwendung von bestimmten Bauprodukten des Holz- und Stahlbaus, Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen - Baden-Württemberg (Hrsg.), Stuttgart, 2024
- [26] Kooperatives Baustofflabor für nachhaltige Material-Kreisläufe. Abstract Band, Online-Seminar 11. Oktober 2022, Wien
- [27] DIN EN 384:2010-08. Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. DIN, Berlin
- [28] DIN EN 408:2012-10. Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. DIN, Berlin
- [29] Görlacher, R.: Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein „in situ“-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. Holz als Roh- und Werkstoff 45 (1987), S. 273-278
- [30] Görlacher, R., Eckert, H.: Historische Holztragwerke – Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen. Sonderforschungsbereich 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ Universität Karlsruhe, 1999
- [31] Blaß, H. J., Frese, M.: Sortierverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. Holz als Roh- und Werkstoff 62 (2004), S. 325-334
- [32] Devlieger, L.: Architektur im Rückwärtsgang. Bauwelt 14 (2018), S. 32-37
- [33] Möhler, K., Steck, G.: Untersuchungen über die Rissbildung in Brettschichtholz infolge Klimabelastung. Bauen mit Holz 82 (1980), Nr. 4, S. 194-200
- [34] Erläuterung zu DIN 1052, Blatt 1 und 2 – Holzbauwerke – Ausgabe Oktober 1969. Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. (Hrsg.), Düsseldorf, 1971
- [35] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002. Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 23./24.11.2023



- [36] DIN EN 14080:2013-09. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen. DIN, Berlin
- [37] Aicher, S.: Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharzverklebter tragender Holzbau-  
teile. Abschlussbericht zum DIBt-Forschungs-  
vorhaben ZP 52-5- 13.179-1246/07.  
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart,  
Stuttgart, 2021
- [38] Merkblatt zur Bewertung von Klebfugen in  
Brettschichtholzbauteilen im Bestand. Studien-  
gemeinschaft Holzleimbau e.V., Wuppertal,  
2021
- [39] Erläuterungen zu DIN 1052, Blatt 1 und 2 –  
Holzbauwerke – Ausgabe Oktober 1969. Ar-  
beitsgemeinschaft Holz e.V.
- [40] DIN EN 1995-1-1:2010-12. Eurocode 5: Bemes-  
sung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-  
1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln  
für den Hochbau. DIN, Berlin.
- [41] Crews, K., Hayward, D., MacKenzie, C.: Interim  
Industry Standard – Recycled Timber – Visually  
Stress Graded Recycled Timber for Structural  
Purposes. Forest and Wood Products Australia,  
Melbourne, 2008

## Autoren

Matthias Frese

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktion  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
matthias.frese@kit.edu

Judith Herrmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktion  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
judith.herrmann@student.kit.edu

Philipp Dietsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktion  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
dietsch@kit.edu