

Erhalten historischer Bauwerke e. V. (Hg.)

BAUWERKS AUFNAHME

Bewahren durch Erkunden

Schriftenreihe zur Denkmalpflege | Band 7

Fraunhofer IRB Verlag

Schriftenreihe zur Denkmalpflege
Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e. V.
Band 7

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (E-Book): 978-3-7388-1049-3
DOI: 10.60628/9783738810493

Umschlaggestaltung: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.
Foto: Hans Meyer und Anna Graff, LVR-ADR, Pulheim

Lektorat: Birke Gerold | inWorten
Layout und Satz: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2025
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500
Telefax +49 711 970-2508
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

Matthias Frese, Judith Herrmann, Lennart Meid,
Eva Baldauf und Sabine Kuban

RÜCKGEBAUTES UND HISTORISCHES NADELSCHNITTHOLZ

Schwingungsanalysen zur
Bewertung der Tragfähigkeit

DOI:10.60628/9783738810493-199

Schwingungsanalysen gehören in der Festigkeitssortierung zum Stand der Technik. Ihre Anwendung zur Bewertung der Biegefestigkeit rückgebauter und historischer Bauteile aus Nadeleschnittholz hingegen ist noch unüblich. Der vorliegende Beitrag regt dazu an, Schwingungsanalysen in diesen Anwendungsfällen zu erproben. Die dadurch ermittelten individuellen Daten zu jedem Stück Schnittholz erlauben eine statistisch abgesicherte Tragfähigkeitsprognose. So können die Statik und Konstruktion neuer ebenso wie historischer Baugefüge positiv beeinflusst werden. Da rückgebautes Nadeleschnittholz und historische Holzbauteile während der Analysen jeweils einzeln so zu lagern sind, dass eine freie Schwingung möglich ist, sind die bisher üblichen Annahmen und Vorgehensweisen bei den Analysen zu überdenken und anzupassen.

1 Einleitung

1.1 Anlass und Allgemeines

Vor 25 Jahren begann die Entwicklung einer kombinierten maschinellen und visuellen Festigkeitssortierung für Nadelholzschäfte. Es war beabsichtigt, eine visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [1] apparativ zu unterstützen, um Bretter, Bohlen und Kantenhölzer in C35 zu klassifizieren [2]. Damit sollte die mit S13 maximal erreichbare C30-Klassifizierung um S15 (C35) erweitert werden. Die apparative Unterstützung sah vor, bei S10 und besser sortiertem Material (S10+) entweder die Bruttodichte (*Rho*-Verfahren) oder den dynamischen Elastizitätsmodul (E_{dyn} -Verfahren) als maschinelle Parameter zu ermitteln. Die hohe Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Festigkeit beim E_{dyn} -Verfahren ergibt – im Vergleich zum *Rho*-Verfahren – Erwartungswerte mit einem kleineren statistischen Rauschen. Seit Dezember 2008 ist das Format der apparativ unterstützten visuellen Sortierung ein fester Bestandteil der DIN 4074-1.

Als das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg im Jahr 2022 ein Projekt zur Wieder- und Weiterverwendung u. a. von Holzbauteilen initiierte und beauftragte, erschloss dies für das E_{dyn} -Verfahren ein praktisches Anwendungsfeld für Nadelholz aus selektivem Rückbau [3]. Entsprechendes Nadelholz ist fallweise sehr heterogen, etwa in Bezug auf Maße, Qualität und bauzeitlich erfolgte Sortierung, weshalb das E_{dyn} -Verfahren zur Festigkeitsprognose für jedes Stück Schnittholz individuell auszulegen war. Dies bedeutet Handarbeit und verursacht technischen Untersuchungsaufwand, liefert aber wahre Werte für die Bruttodichte und den Elastizitätsmodul sowie einen statistisch abgesicherten Wert für die jeweilige Biegefestigkeit. Individuelle Bauteilwerte machen nicht nur die Wiederverwendung technisch integren Nadelholzes aus dem selektiven Rückbau attraktiver, sondern tragen bestenfalls auch in der Denkmalpflege zum Substanzerhalt bei. Rückblickend hätten etwa [4; 5] Voraussetzungen dafür geboten.

Dieser Beitrag demonstriert die Validität des E_{dyn} -Verfahrens im neu erschlossenen Anwendungsbereich anhand zweier Stichproben mit sechs bzw. sieben Biegeprüfungen. Zur Validierung des Verfahrens dienten etwa 90 Jahre alte Dach- und Kellerdeckenbalken bzw. 60 Jahre alte Sparrenabschnitte, jeweils aus Nadelholz. Die Erprobung ihrerseits wurde an 60 Jahre alten Sparren und 55 Jahre alten Konstruktionshölzern durchgeführt. Die zerstörungsfreie Erprobung belegt Potenzial für die Kreislaufwirtschaft sowie die denkmalpflegerische Praxis und erweitert das vorhandene Spektrum von Methoden zur Analyse mechanischer Eigenschaften (vgl. [6–10]).

1.2 Hintergrund und Theorie des E_{dyn} -Verfahrens

Zur apparativen Unterstützung der visuellen Festigkeitssortierung von Nadelholz der Holzarten Fichte und Tanne wurde Gleichung (1) entwickelt [2, Tab. F1]. Die Gleichung berechnet den Erwartungswert der Biegefestigkeit ($f_{m,p}$ in N/mm²) von

Nadelholz in Übereinstimmung mit jener in DIN EN 408 [11]. Sie ist das Ergebnis einer Regressionsanalyse mit etwa 400 Beobachtungen. Der Korrelationskoeffizient und die Standardabweichung der Fehler betragen 0,729 bzw. 9,32 N/mm².

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

$$\rho_{brutto} = m/(bh\ell) \quad E_{dyn} = (2f_0\ell)^2\rho_{brutto}$$

Gleichung (1) gilt für als S10+ sortierte Bretter bzw. Bohlen mit Breiten von 100–220 mm und Dicken von 20–48 mm, ebenso wie für als S10+ sortierte Kanthölzer mit Breiten von 50–80 mm und Höhen von 100–240 mm. Erklärende Variablen für den Erwartungswert sind die Querschnittsbreite (b in mm), Querschnittshöhe/-dicke (h in mm), Bruttorohdichte (ρ_{brutto} in kg/m³) aus Masse (m) und der dynamische Elastizitätsmodul (E_{dyn} in N/mm²), berechnet mit der Frequenz einer Längsschwingung erster Ordnung (f_0). Für den neuen Anwendungsbereich des E_{dyn} -Verfahrens wird von jedem individuell berechneten Erwartungswert das 1,65-Fache der Standardabweichung der Fehler abgezogen, siehe Gleichung (2), sodass im Vergleich mit der individuellen charakteristischen Biegefesteitigkeit ($f_{m,k,in}$ in N/mm²) die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die wahre unbekannte Biegefesteitigkeit 5 % beträgt.

$$f_{m,k,in} = f_{m,p} - 1,65 \cdot 9,32 = f_{m,p} - 15,4 \quad (2)$$

Dieses Vorgehen ist methodisch vergleichbar mit der Rohdichtebestimmung nach [12]. Bei jenem Verfahren wird mit vier Eindringversuchen z.B. ein statistisch abgesicherter Wert für die individuelle Rohdichte eines Nadelholzes ermittelt.

2 Material und Methoden

2.1 Herkunft

Für die Validierung bzw. Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens wurde Nadelholz aus drei Bauwerken verwendet: einem Siedlungshaus in Karlsruhe, einem Wohnriegel in Frankfurt am Main und einem denkmalgeschützten Gebäude in Karlsruhe (Tabelle 1).

Tab. 1 Ausgangsmaterial für die Validierung bzw. Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens

Herkunft	Bj.	Bauteile	$b/h/\ell$ in m	Stück	Validierung	Erprobung
Siedlungshaus	1932	Dachbalken (Db 2 und 5)	0,12/0,19/8,6	2	✓	
		Kellerbalken (Kb 2)	0,12/0,23/7,4	1	✓	
Wohnriegel	1964	Sparrenabschnitte (Spa)	0,065/0,15/2,55	7	✓	
		Sparren	0,065/0,15/5,6	80		✓
KIT-Gebäude	1969	Konstruktionshölzer	0,06/0,08/1,1-2,44	23		✓

Das Siedlungshaus war ein Wohngebäude im Karlsruher Ortsteil Neureut-Kirchfeld mit Stockwerksbauweise im 1. Obergeschoss. Dach-, Decken- und Kellerbalken waren als Zweifeldträger in Nadelholz ausgeführt. Das Haus wurde im September 2023 selektiv abgebrochen. Während des Abbruchs ließen sich für validierende Biegeprüfungen zwei Dach- und ein Kellerbalken mit Längen von 8,6m bzw. 7,4m schonend bergen (Abbildung 1). Ein Dach- und der Kellerbalken lagen in der Gebäudeachse 2, der zweite Dachbalken in Achse 5. Dementsprechend sind die Balken bezeichnet. Zunächst war vorgesehen, den Jahrzehntelang auf Biegung beanspruchten Bereich über der Zwischenstützung zu prüfen. Eine solche Biegeprüfung schied jedoch aus, da Löcher für etwa 30mm dicke Dollen den Querschnitt schwächen. Die Balken wurden daher in der Mitte für jeweils zwei Biegeprüfungen halbiert.

Das zweite Bauwerk war ein Wohnriegel in Frankfurt a. M., der seinerzeit ein Kehlbalkendach von etwa 65m Länge mit rund 95 Gespärren erhielt (Abbildung 2). Sparren und Kehlbalken waren über jeweils genagelte Laschen und Knaggen miteinander verbunden, vgl. [13, S. 230]. Im Juni 2024 wurden zunächst sieben Sparrenabschnitte vor Ort zugeschnitten und für validierende Biegeprüfungen ans Karlsruher Institut für Technologie (KIT) transportiert. Im August wurden weitere 80 Sparren in nahezu ursprünglicher Länge für die Erprobung [14] abgeholt (Abbildung 3).



Abb. 1 Siedlungshaus in Karlsruhe mit auskragenden Dachbalken (links) und bauseits aufbereitetem Balken (rechts)



Abb. 2 Wohnriegel in Frankfurt a. M. während der Aufstockung (links) und Gespärre vor der Demontage (rechts)



Abb. 2 Wohnriegel in Frankfurt a. M. während der Aufstockung (links) und Gespärre vor der Demontage (rechts)

Das dritte Bauwerk schließlich war das denkmalgeschützte KIT-Gebäude 10.40 (Abbildung 4 links). Bei der Rückführung des Flures im Erdgeschoss in ein früheres Erscheinungsbild wurden Konstruktionshölzer der nachträglich eingebauten Zwischendecke demontiert. 23 der als Einfeldträger verbauten Hölzer (Abbildung 4 rechts) in Längen bis 2,44 m ließen sich für die Erprobung bergen.

2.2 Methoden

2.2.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

Der nächste Schritt bestand in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Balkenhälften, Sparrenabschnitte, Sparren und Konstruktionshölzer der drei Bauwerke. Hierfür wurden die Bauteile nach DIN 4074-1 sortiert, an den Enden – soweit erforderlich – gekappt, hinsichtlich der Holzfeuchte überprüft, gewogen, vermessen und zur Messung der Eigenfrequenz in eine Längsschwingung 1. Ordnung versetzt. Der Ablauf des E_{dyn} -Verfahrens ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Holzfeuchte wurde nach dem Prinzip des elektrischen Widerstands gemessen, z.B. mit dem Gerät Gann Hydromette BL H 40 (Abbildung 6 links). Die Messung der Eigenfrequenz erfolgte mit dem



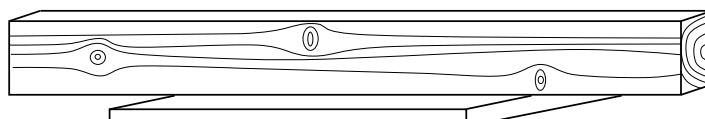
Abb. 3 Sparrenabschnitte des Wohnriegels für Validierung (links) und Sparren für Erprobung (rechts)



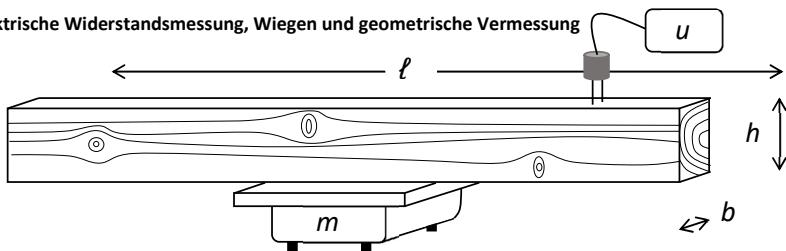
Abb. 4 KIT-Gebäude (links) und Konstruktionsholz der Zwischendecke (rechts)

GrindoSonic MK7 (Abbildung 6 rechts). Hierzu wird das Holz im Schwerpunkt – dem Schwingungsknoten – gelagert und am Hirnholzende mit einem Schlag angeregt. Ein piezoelektrischer Taster gibt die Information der harmonischen Schwingung für die Analyse an das Gerät weiter, woraufhin die Eigenfrequenz nach dem Abklingen der Schwingung sofort in der Anzeige des Geräts erscheint [15–17]. Daraufhin wurden die Bruttorohdichte, der dynamische Elastizitätsmodul und die individuelle charakteristische Biegefesteitigkeit nach Gleichung (2) berechnet.

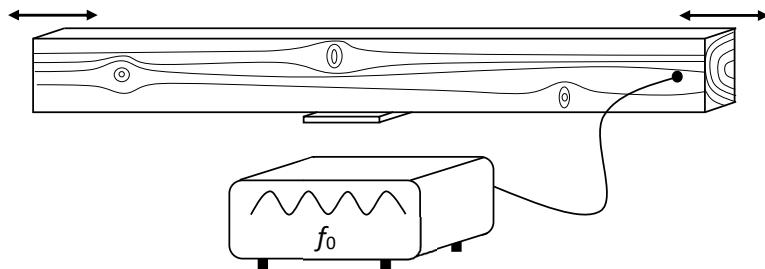
1. Visuelle Sortierung des Nadelschnittholzes nach DIN 4074-1



2. Elektrische Widerstandsmessung, Wiegen und geometrische Vermessung



3. Anregung der Längsschwingung 1. Ordnung und Messung der Eigenfrequenz



4. Zusammenfassung der strukturellen, physikalischen, geometrischen und mechanischen Eigenschaften

Abb. 5 Ablauf des E_{dyn} -Verfahrens



Abb. 6 Gann Hydromette BL H 40 (links) und GrindoSonic MK7 (rechts)

2.2.2 Validierende Biegeprüfungen

Für diese Prüfungen wurden nur die geteilten Dach- und Kellerbalken und die Sparrenabschnitte herangezogen, vgl. Tabelle 1. Alle validierenden Biegeprüfungen wurden nach DIN EN 408 hochkant mit einer Stützweite von 15 h und einem querkraftfreien Bereich von 6 h durchgeführt. Die Untersuchung der geteilten Dachbalken (Db 2.1, 2.2, 5.1, 5.2) erfolgte auf zwei verschiedene Weisen: Bei der einen Hälfte wurde die ehemalige Biegezugzone beibehalten, bei der anderen Hälfte wurde sie in die Druckzone gedreht, siehe Abbildung 7. Mit den Kellerbalken (Kb 2.1, 2.2) verfuhr man ebenso. Die Sparrenabschnitte wurden im räumlichen Bezug auf das Originalgespärre so herausgetrennt, dass der durch den Kehlbalken gestützte Bereich – und insbesondere die Nagellöcher der Knaggen – in der Biegezugzone des querkraftfreien Bereichs lagen (Abbildung 8). Abbildung 9 zeigt einen Versuch bei fortgeschrittener Durchbiegung (o. $\ell.$) und drei Formen des Biegeversagens.

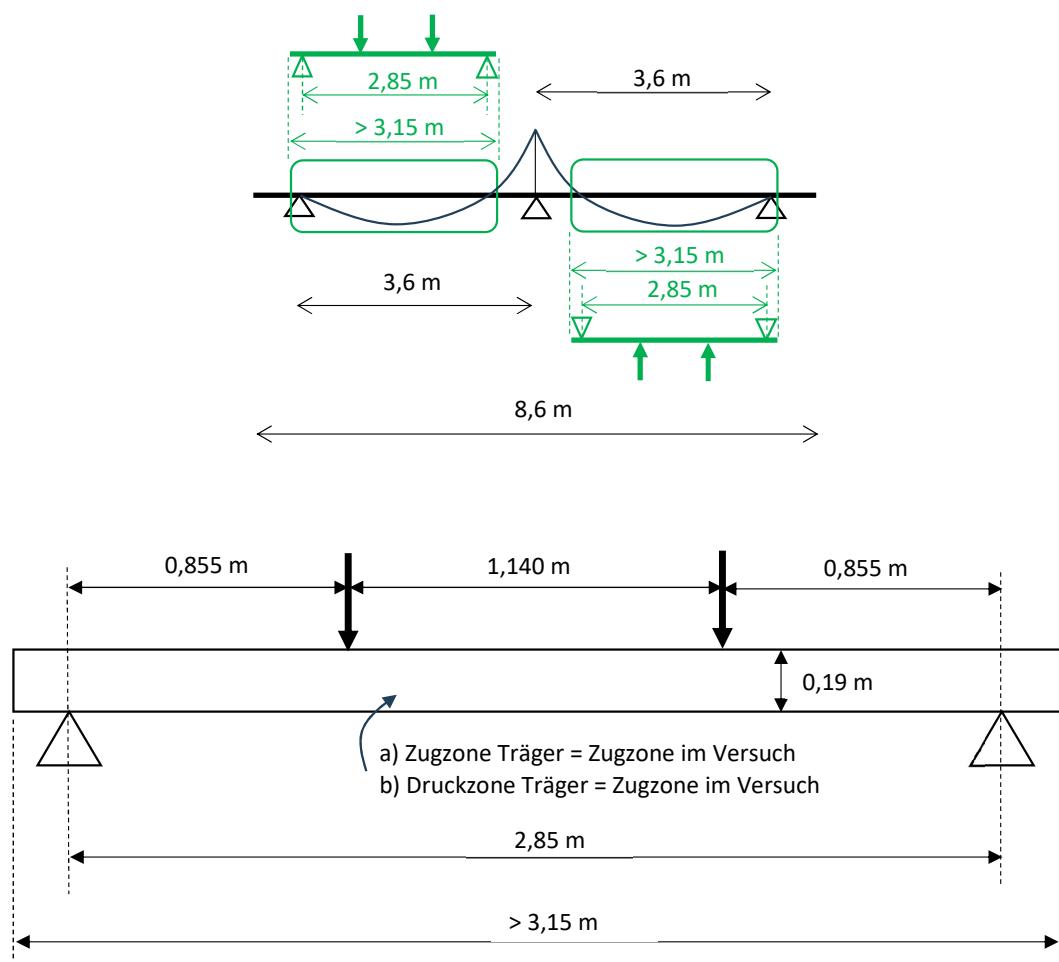


Abb. 7 Prüfbereiche (grün markiert) im Dachbalken und Biegeprüfung mit Lage der ehemaligen Zug- bzw. Druckzone

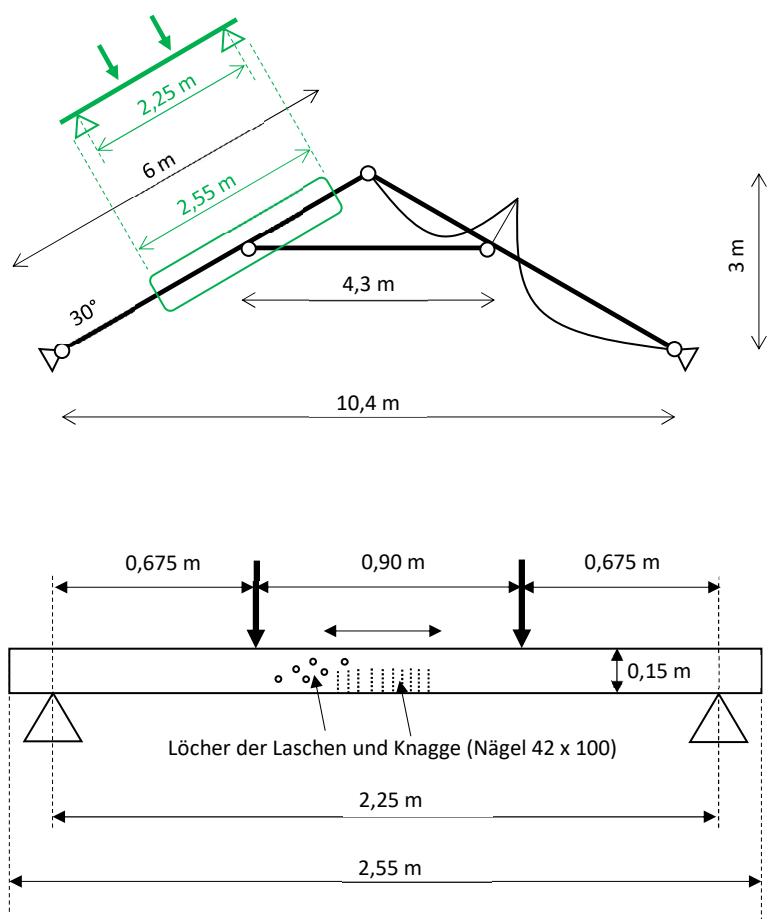


Abb. 8 Prüfbereiche (grün markiert) im Originalgespärre und Biegeprüfung mit Nagellöchern in der Biegezugzone

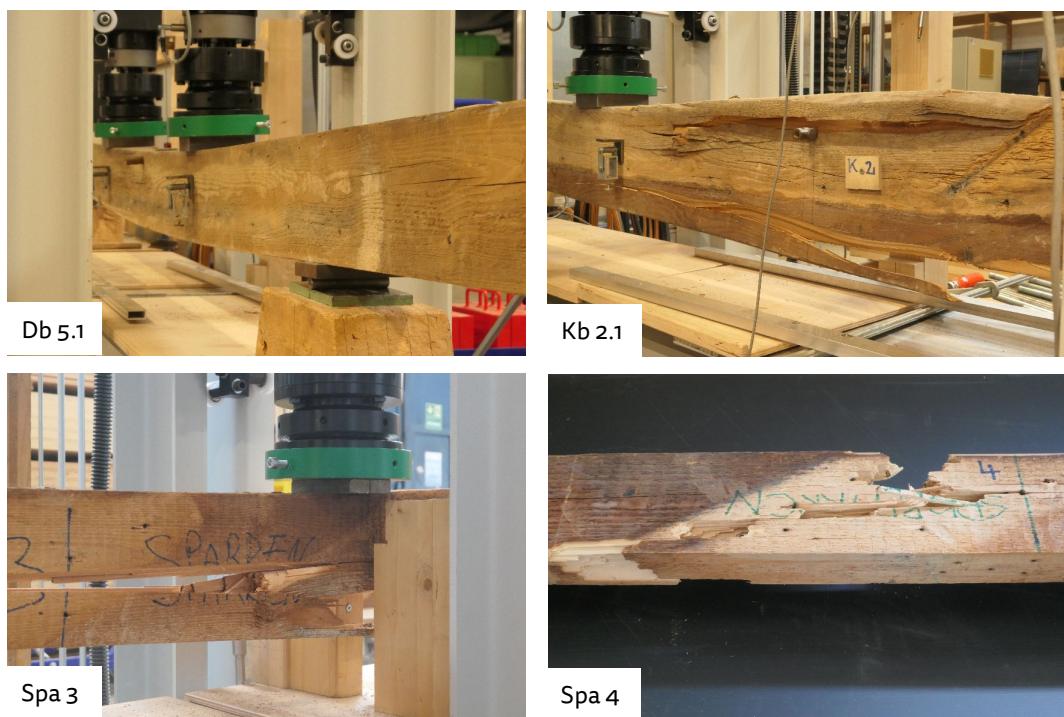


Abb. 9 Biegeprüfkörper vor dem Biegebruch (Db 5.1) bzw. danach (Kb 2.1, Spa 3, Spa 4)

3 Ergebnisse

3.1 Prognose und validierende Biegeprüfungen

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen an den Balken und Sparrenabschnitten sowie die jeweiligen Biegefestigkeiten sind in Tabelle 2 gelistet. 12 der 13 Prüfstücke erfüllen die Anforderungen an S10+ und damit die Voraussetzung für die Prognose mit Gleichung (2). Da vier Sparrenabschnitte augenscheinlich aus Lärchenholz waren, hat die für Fichte/Tanne gültige Gleichung (2) einen indikativen Charakter für Lärche. In der 7. und 8. Spalte der Tabelle sind die Biegefestigkeiten der Prüfkörper gegenübergestellt: links die individuellen charakteristischen Werte auf Basis des E_{dyn} -Verfahrens; rechts die tatsächlichen Werte aus den Prüfungen. Im Mittel betragen die individuellen Werte 65 % bzw. 78 % von den Versuchswerten. In zehn Fällen sind die individuellen Werte deutlich kleiner als die Versuchswerte, während sie bei Kb 2.2 nahezu gleich sind. Bei Spa 4 ist die Prognose deutlich größer als der Versuchswert, wobei eine wahre Festigkeit von 34,8 N/mm² für ein Kantholz erwartungsgemäß ist.

Tab. 2 Maße und Eigenschaften der Biegeprüfkörper

Prüfkörper	b mm	h mm	Klasse	ρ_{brutto} kg/m ³	E_{dyn} N/mm ²	$f_{m,k,in}$ N/mm ²	f_m N/mm ²
Dach- und Kellerbalkenhälften^a							
Db 2.1	118	192	S10	415	10580	18,7	<< 32,0
Db 2.2	118	192	S10	380	10440	19,5	<< 30,1
Db 5.1	117	192	S13	415	11610	23,4	<< 41,2
Db 5.2	117	191	S10	409	10440	18,4	<< 29,1
Kb 2.1	115	229	S13	475	12230	22,1	<< 42,1
Kb 2.2	115	229	S13	462	13810	29,8	> 29,6
MW = 22,0						MW = 34,0	
Sparrenabschnitte							
Spa 1	65	150	S13	527	19560	57,4	< 60,4
Spa 2	65	150	S7	388	9730	^d 18,5	<< ^d 29,8
Spa 3 ^b	65	150	S13	515	14330	34,2	<< 57,9
Spa 4	65	150	S10	551	17680	47,9	>> ^e 34,8
Spa 5 ^b	65	150	S10	560	13420	28,2	<< 53,6
Spa 6 ^b	65	150	S10	581	13920	29,6	< 32,0
Spa 7 ^b	65	150	S13	624	18930	50,5	<< 80,3
MW = 41,3						MW = 53,2	

^aÜber diese Versuche wurde erstmals in [18] berichtet; ^bLärchenholz; ^crechnerische Biegespannung beim Eintritt eines Schubversagens; ^dnicht im MW berücksichtigt; ^eausgesprochen kurzfaseriger Bruch, vgl. Abb. 9

3.2 Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens

Von den 80 Sparren lassen sich 45 zur Holzart Fichte/Tanne zählen und 35 dem Augenschein nach zur Holzart Lärche. 40 Sparren aus Fichte/Tanne und 33 aus Lärche gelangen in eine Sortierklasse der DIN 4074-1. Mehr als drei Viertel der Sparren aus Fichte/Tanne und Lärche erfüllen jeweils S10+ (Abbildung 10 links und Mitte). 22 der 23 Konstruktionshölzer gelangen in eine Sortierklasse der DIN 4074-1. Etwas mehr als die Hälfte erfüllt S10+ (Abbildung 10 rechts). Die Mittelwerte der Rohdichte und des dynamischen Elastizitätsmoduls der 45, 35 und 23 Stücke (jeweils Test) sind in Tabelle 3 den Mittelwerten von neuem Holz (Kontrolle) gegenübergestellt. Die Werte von neuem Nadelholz (Fichte/Tanne) sind aus [2, Tab. B1] für die dort bezeichneten Stichproben „KG“ + „KN“ und „KD“ + „KM“ entnommen. Die jeweilige Gruppierung berücksichtigt eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der vorliegenden Querschnittsmaße zwischen Test und Kontrolle. Für die Lärche, mutmaßlich europäisch, ließ sich für das Querschnittsmaß kein Kontrollwert finden. Bei den Sparren und Konstruktionshölzern beträgt der dynamische Elastizitätsmodul der Kontrollgruppe unter Berücksichtigung der Rohdichte $439/471 \cdot 12680 \approx 11820 \text{ N/mm}^2$ bzw. $463/428 \cdot 11190 \approx 12110 \text{ N/mm}^2$. Beide Vergleiche belegen, dass der dynamische Elastizitätsmodul auch nach über 60 bzw. 55 Jahren nahezu unverändert ist.

Tab. 3 Vergleich der geprüften Sparren und Konstruktionshölzer mit neuem Holz hinsichtlich Rohdichte und dynamischem Elastizitätsmodul

Gruppe	Anzahl	Holzart	Alter a	MW ρ_{brutto} kg/m ³	MW E_{dyn} N/mm ²
Test	45 Sparren	Fichte/Tanne	> 60	439	11790
Kontrolle	144 Kanthölzer	Fichte/Tanne	< 1-2	471	12680
Test	35 Sparren	Lärche	> 60	528	12610
Kontrolle	k. A.				
Test	23 Konstruktionshölzer	Fichte/Tanne	> 55	463	12190
Kontrolle	113 Kanthölzer	Fichte/Tanne	< 1-2	428	11190

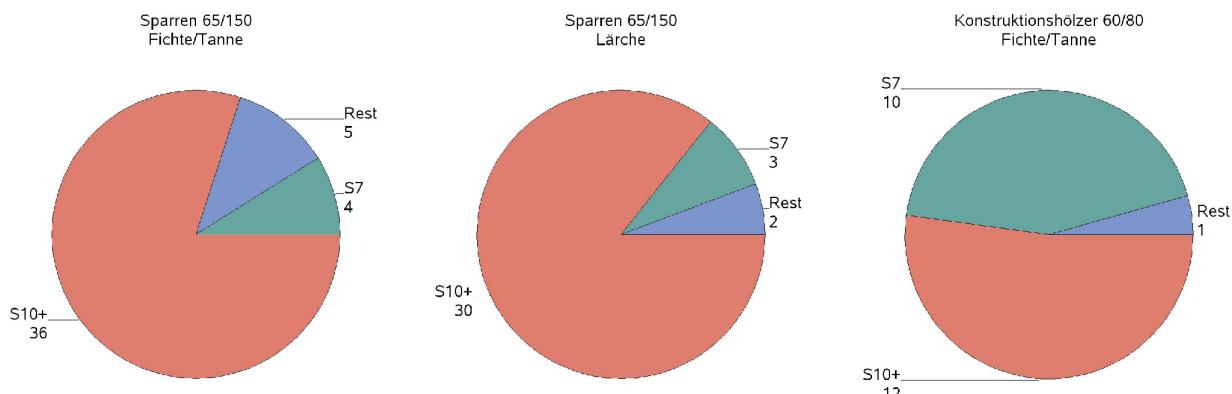


Abb. 10 Sortierergebnisse gemäß DIN 4074-1 für die geprüften Sparren und Konstruktionshölzer, differenziert nach Holzart und Querschnittsmaß

Für folgende Prüfkörper kann die individuelle charakteristische Biegefestigkeit nach Gleichung (2) berechnet werden: 36 Sparren aus Fichte/Tanne, 30 aus Lärche und 12 Konstruktionshölzer. Die diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Werte sind in Abbildung 11 dargestellt. In den Diagrammen sind linearisierte Normalverteilungen mit den Parametern der Stichproben ergänzt. Die drei Wahrscheinlichkeitsverteilungen belegen individuelle charakteristische Biegefestigkeiten zwischen 10–42, 13–50 bzw. 22–46 N/mm².

4 Diskussion

4.1 Bemessung

Die Einzelwerte der Verteilungen (Abbildung 11) ermöglichen eine differenzierte Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit der Stücke, die für Bemessungs-zwecke relevant ist. Teile mit niedriger Festigkeit können ihrem Potenzial entsprechend nur gering beansprucht werden, solche mit hoher Festigkeit hingegen wesentlich stärker, sofern keine relevanten tragfähigkeitsmindernden Einflüsse infolge von Bearbeitung, Demontage o. Ä. vorliegen. In der Wahrscheinlichkeitsverteilung in Abbildung 11 links beträgt beispielsweise das Minimum 10 N/mm², das Mittel 24,7 N/mm² und das Maximum 42 N/mm². Möchte man von hohen individuellen charakteristischen Werten profitieren, muss man dafür auch kleine in Kauf nehmen. Alternativ ließe sich das Kollektiv der 36 Sparren in Gänze – weiterhin ohne Anwendung des E_{dyn} -Verfahrens – nach S10 als C24 klassifizieren. Hier dürfen ebenfalls keine relevanten tragfähigkeitsmindernden Einflüsse aufgrund von Bearbeitung, Demontageschäden o. Ä. vorliegen. Da Gleichung (2) nur für Nadelschnittholz gilt, erfordert die Abschätzung der individuellen charakteristischen Biegefestigkeit von Eichenholz einen anderen Ansatz: eine Schwingungsanalyse zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls in Kombination mit der grafischen Beziehung aus [15, S. 48]. Durchbiegungsnachweise verlangen nach einem statischen Äquivalent (E_{stat}) zum dynamischen

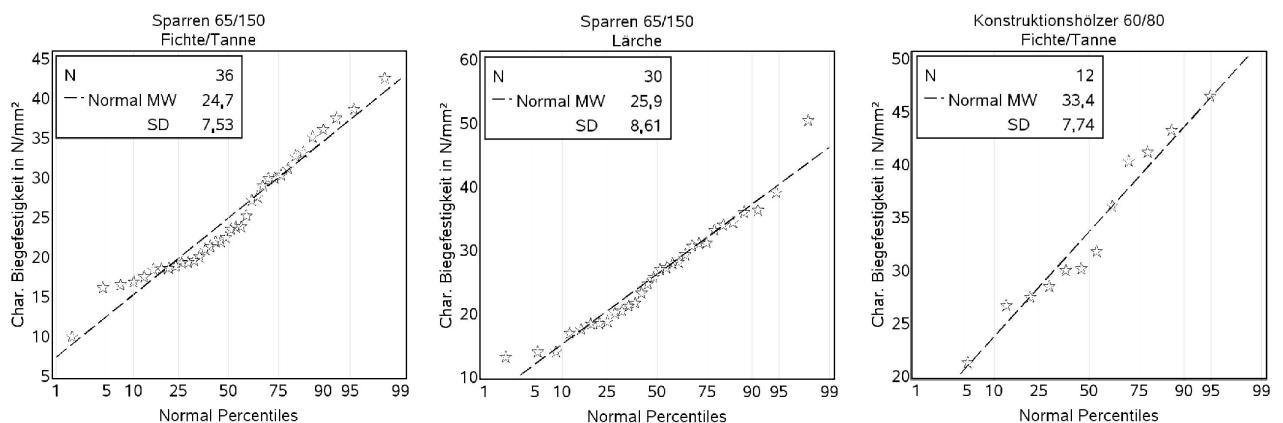


Abb. 11 Wahrscheinlichkeitsverteilungen der individuellen charakteristischen Biegefestigkeiten

Elastizitätsmodul. Laut [2, Bild C12–C14] wird eine Umrechnung nach Gleichung (3) nur für Brettquerschnitte unter Zugbeanspruchung empfohlen.

$$E_{\text{stat}} = 0,95 \cdot E_{\text{dyn}} \quad (3)$$

4.2 Denkmalpflegerische Praxis

Spätestens mit der Formulierung der Anforderungen zur Schadenskartierung im konstruktiven Holzbau [19] hat sich in der Denkmalpflege Baden-Württemberg ein Standard entwickelt, der nicht nur den Bestand dokumentiert, sondern auch zwischen Schadensphänomenen differenziert. Bei statisch relevanten Fragestellungen wird ausgehend von der Bestandsdokumentation das Bestandstragwerk modellbasiert bemessen. In die Rechnung fließt die tatsächliche Geometrie der Bauteile ein, doch für den Elastizitätsmodul und die Festigkeiten werden standardisierte Tabellenwerte verwendet, was eventuell vorhandenes Potenzial ungenutzt lässt. Hier ermöglicht das E_{dyn} -Verfahren, nahezu zerstörungsfrei, realistische Werte am Bestand zu erzielen, die als Grundwerte in die dann realitätsnähere Bemessung einfließen können.

Aus denkmalfachlicher Perspektive ist die Anwendung dieses Verfahrens abzuwegen, da zwar der Holzbalken an sich zerstörungsfrei untersucht wird, jedoch sein Ausbau Verluste mit sich bringen kann. Das Verfahren eignet sich vor allem für Deckenbalken und Unterzugskonstruktionen. Es gibt durchaus Objekte, bei denen über die Zeit erhaltungswürdige Bodenbeläge, unterseitige Decken oder auch Zwischenfüllungen (Lehmwickel, Schüttungen usw.) bereits entfernt wurden. Bei anderen, vollständiger erhaltenen Gebäuden ist zu diskutieren, wann der Ausbau die notwendigen Eingriffe rechtfertigt.

Für eine Untersuchung werden die Bauteile einzeln ausgebaut (mit entsprechender Zwischenabstützung), vor Ort analysiert und direkt wieder eingebaut. Auf der Tragwerksebene bleibt somit der authentische Ortsbezug weitestgehend erhalten, während eine aufwändige Dokumentation für den Wiedereinbau, beispielsweise nach einer Untersuchung im Labor, entfällt. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist eine frühzeitige Einbindung der beteiligten Tragwerksplanung. Weiterhin sollte die Planung die Untersuchung nicht nur begleiten, sondern idealerweise bereits im Vorfeld kritische Werte benennen, die bei der Untersuchung zu erreichen sind, damit das Bauteil weiterhin als Teil des Tragwerks funktionieren und somit wiedereingebaut werden kann. Bei Nichterreichen der Kennwerte wären im Vorfeld bzw. zeitnah Verstärkungsdetails oder ein Ersatz auszuloten.

4.3 Ausblick

Die Durchführung des E_{dyn} -Verfahrens erfordert eine visuelle Sortierung des Schnittholzes sowie Kenntnis vierer Parameter: Holzfeuchte, Bruttonrohdichte, dynamischer

Elastizitätsmodul und individuelle charakteristische Biegefestigkeit. Auf dieser Basis lässt sich nicht nur die technische Integrität des Holzes präzise quantifizieren, sondern die resultierenden Werte sind auch oft höher als bei einer rein visuellen Sortierung (Abbildung 12).

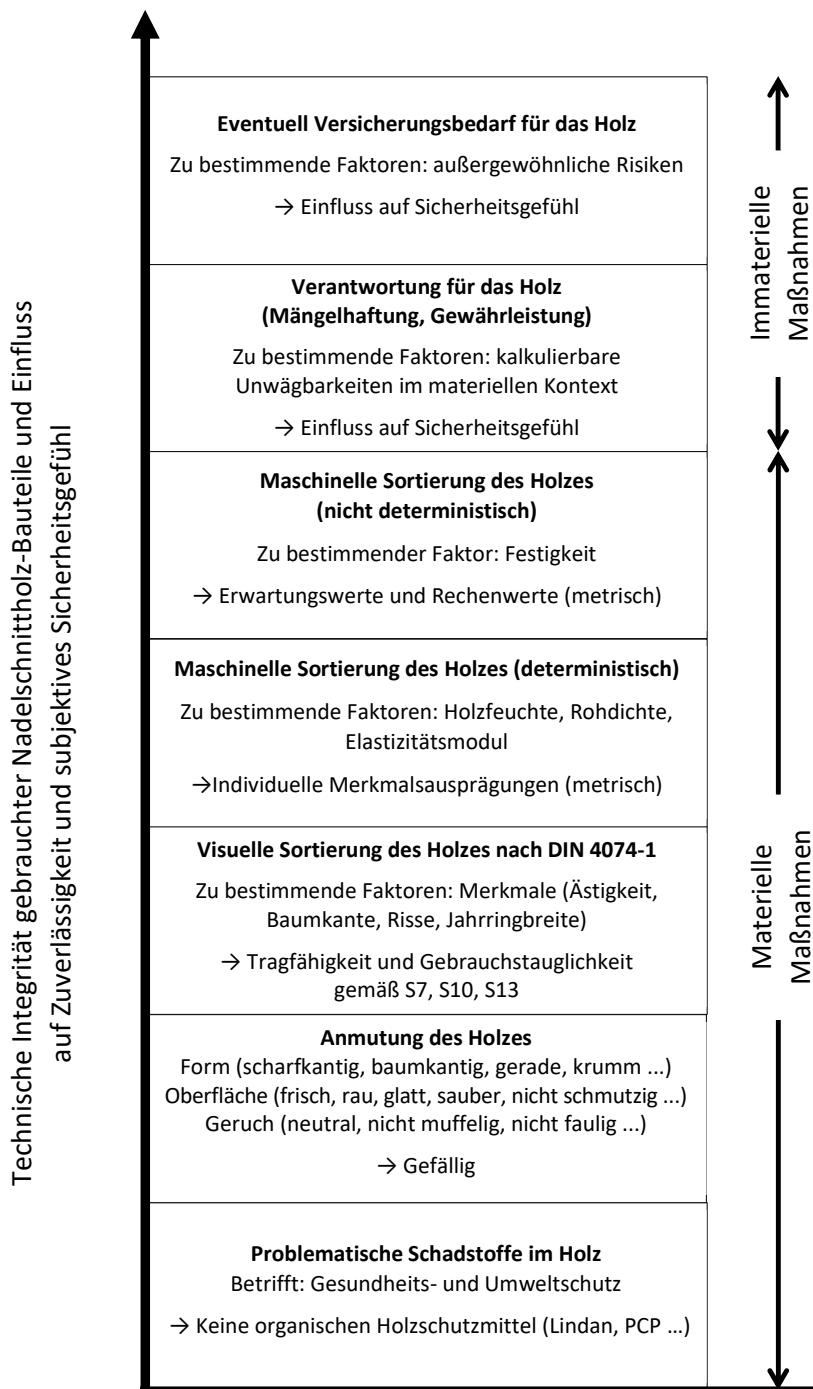


Abb. 12 Faktoren für die technische Integrität, die Zuverlässigkeit und das Sicherheitsgefühl

Abbildung 12 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der technischen Integrität gebrauchter Nadelschnittholz-Bauteile einerseits und ihrem Einfluss auf die Zuverlässigkeit und das subjektive Sicherheitsempfinden andererseits. Zunächst ermöglichen materielle Messverfahren (im unteren Bereich der Abbildung) eine erweiterte und objektive Bewertung im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Holzes. Dazu gehören die Untersuchung auf problematische Schadstoffe sowie eine allgemeine Beurteilung von Form, Oberfläche und Geruch. Weitere materielle Maßnahmen sind die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1, um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Holzes zu bestimmen, ebenso wie die maschinelle Sortierung. Während die deterministische Sortierung Faktoren wie Holzfeuchte, Rohdichte und Elastizitätsmodul erfasst, bestimmt die nicht deterministische Sortierung die Festigkeit. Um das subjektive Sicherheitsgefühl im Umgang mit den Bauteilen zusätzlich zu stärken, sollten materielle Risiken – sowohl kalkulierbare als auch nicht vorhersehbare – durch immaterielle Maßnahmen aufgefangen werden (im oberen Bereich der Abbildung). Hierzu zählen insbesondere die Übernahme von Verantwortung in Form von Gewährleistung und Mängelhaftung sowie der Abschluss geeigneter Versicherungen.

5 Zusammenfassung

Der Paradigmenwechsel im Bauwesen verlangt nach Ressourcenschonung. Die technische Integrität von Holz aus dem selektiven Rückbau kann mit einer Schwingungsanalyse sehr differenziert quantifiziert werden. Wie bei einer maschinellen Festigkeitssortierung eröffnet sich die Chance, nicht nur die Spreu vom Weizen zu trennen, sondern auch die Diversität innerhalb eines heterogenen Schnittholzkollektivs objektiv erfahrbar zu machen. Das kann dazu beitragen, Holz aus dem Rückbau einen individuellen Wert beizumessen und durch eine möglichst hochwertige Verwendung zu erhalten. Auch das entspricht im weiteren Sinne einem *Bewahren durch Erkunden*. Es wäre wünschenswert, dass die Schwingungsanalyse mit ihren Vor- und Nachteilen im Bauwesen und in der denkmalpflegerischen Praxis als Angebot für geeignete Einsatzzwecke wahrgenommen wird und sich immer einmal wieder beweisen kann.

Förderhinweis

Der vorliegende Text berichtet über Arbeiten, die in der Bachelorarbeit [14] erbracht und aus Eigenmitteln finanziert wurden. Sie waren in ein Forschungsprojekt eingebettet, das in die Schaffung des Leitfadens [3] mündete. Das Projekt wurde vom Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg beauftragt sowie finanziert. Der Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft Nassauische Heimstätte wird für das Überlassen von 4,5 m³ Sparren zur Erprobung gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN 4074-1:1989-09 Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit; Nadelschnittholz*. Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- [2] Blass, Hans Joachim / Frese, Matthias: *Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung* (Forschungsbericht). Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, 2002.

- [3] Dietsch, Philipp / Müller, Matthias / Frese, Matthias / Ehrenlechner, Christoph / Mensinger, Martin / Winter, Stefan / Ummenhofer, Thomas: *Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile*. Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (Hrsg.). Stuttgart: 2025.
- [4] Thumm Martin: „Zur Belastung auf die Probe gestellt“. In: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der BRD (Hrsg.): *Arbeitshefte des Arbeitskreises Bautechnik*, Heft 4 (1998), S. 44–47.
- [5] Wenzel, Fritz: „Fruchtkisten Heidenheim – Zustandserhebung, Standsicherheitsuntersuchung und Instandsetzungsplanung“. In: *Konzeptionen – Möglichkeiten und Grenzen denkmalpflegerischer Maßnahmen* (20. Kolloquium des SFB 315), Heft 9 (1989), S. 113–120.
- [6] Görlicher, Rainer: *Historische Holztragwerke – Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen*. Mit Beiträgen von Volker Claus Falk und Hannes Eckert. Hrsg. von Fritz Wenzel und Joachim Kleinmanns. Karlsruhe: SFB 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“, 1999.
- [7] Loebjinski, Maria / Pasternak, Hartmut / Rug, Wolfgang: „Zuverlässigkeitssbewertung von Holzbauteilen im Bestand“. In: *Bauingenieur*, 92 (2017), S. 65–73.
- [8] Linke, Gunter / Rug, Wolfgang / Pasternak, Hartmut: „Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Bericht zum Stand der Technik“. In: *Bauingenieur*, 92 (2017), S. 229–236.
- [9] Loebjinski, Maria / Linke, Gunter / Rug, Wolfgang: „Instandsetzung einer denkmalgeschützten Dachkonstruktion in Holzbauweise“. In: *Bauingenieur*, 94 (2019), S. 378–385.
- [10] Nocetti, Michela / Aminti, Giovanni / Vicario, Margherita / Brunetti, Michele: „Mechanical properties of ancient wood structural elements assessed by visual and machine strength grading“. In: *Construction and Building Materials*, 411 (2024), S. 1–12.
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN 408:2012-10 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [12] Görlicher, Rainer: „Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein „in situ“-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45 (1987), S. 273–278.
- [13] von Halász, Robert (Hrsg.): *Holzbau-Taschenbuch*. 6. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 1963.
- [14] Meid, Lennart: *Untersuchung und Reklassifikation 60 Jahre alter Sparren aus Rückbau und Vorschläge für ihre konstruktive Weiterverwendung*. Bachelorarbeit, KIT Holzbau und Baukonstruktion. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2025.
- [15] Görlicher, Rainer: „Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 42 (1984), S. 219–222.
- [16] Görlicher, Rainer: *Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1990.
- [17] GrindoSonic BV: *Benutzerhandbuch GrindoSonic MK7 – Messverfahren für Qualitätskontrolle und Materialforschung*. Leuven, Belgien: 2025.
- [18] Frese, Matthias / Herrmann, Judith / Dietsch, Philipp: „Pragmatische Ansätze für eine Wiederverwendung von tragenden Holzbauteilen aus selektivem Rückbau“. In: Sandhaas, Carmen (Hrsg.): *Karlsruher Tage 2024 – Holzbau: Forschung für die Praxis*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2024, S. 71–87.
- [19] Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): *Leitfaden zur Dokumentation im konstruktiven Holzbau*. Esslingen am Neckar, 2020.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stammen von den Verfasser:innen des Beitrags.