

Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall- Impulslaufzeitmessung

Vortragender:

Linke, Gunter

Dipl.-Ing. (FH)
BTU Brandenburgische Technische
Universität Cottbus
Konrad-Wachsmann-Allee 2a
03046 Cottbus
linke@holzbau-statik.de



- Gunter Linke, geboren 1987
- 2007-2011 Studium der Holztechnik an der HNE Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde
- Seit 2011 Mitarbeiter im Sachverständigenbüro Prof. Dr.-Ing. W. Rug (Tätigkeitsschwerpunkt: Bauzustandsbewertung von Holzkonstruktionen)
- Seit 2017 Doktorand an der BTU Brandenburgischen Technischen Universität, Cottbus

Autoren: Gunter Linke; Wolfgang Rug (HNE Eberswalde); Hartmut Pasternak

Zusammenfassung

Die Materialeigenschaften von Bauholz weisen erhebliche Streuungen auf. Deren Eingrenzung ist jedoch für den Einsatz als geregeltes Bauprodukt unbedingte Voraussetzung. Dies erfolgt über eine Festigkeitssortierung. Hierbei können auch zerstörungsfreie/-arme Prüfmethoden unterstützend zum Einsatz kommen.

Bei verbaulichem Holz in historischen Gebäuden können die für neues Bauholz entwickelten Sortierverfahren nur mit großen Einschränkungen angewendet werden. Daher wird gegenwärtig in Deutschland nur selten eine Festigkeitssortierung von verbaulichem Holz durchgeführt. Tragfähigkeitsreserven bzw. -defizite können so nicht erkannt werden.

Die Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden wurde in vergleichenden Materialversuchen untersucht. Die Ergebnisse der ersten Teiluntersuchung zeigen, dass der kombinierte Einsatz der visuellen Sortierung und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zu einer wesentlichen Verbesserung der Sortierung führen. Dies wird durch die Biegeversuche bestätigt. Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung eignet sich somit als zerstörungsfreie Prüfmethode zur Ermittlung der Materialkennwerte von verbaulichem Holz.

1. Einleitung

Die Materialeigenschaften von Bauholz weisen erhebliche Streuungen auf, welche aus dem strukturellen Aufbau sowie aus Standort- bzw. Wuchsbedingungen resultieren. Für die Verwendung von Holz als bauaufsichtlich geregeltes Bauprodukt ist die Eingrenzung der Streuungen jedoch unbedingte Voraussetzung. Dies wird durch eine Festigkeitssortierung entsprechend der Materialeigenschaften des Bauholzes erreicht.

Die Anforderungen an die Festigkeitssortierung von Bauholz werden europaweit durch die DIN EN 14081-1 [1] geregelt. Diese Anforderungen werden von den in Deutschland geltenden Sortiervorschriften DIN 4074-1 & -5 [2, 3] erfüllt (vgl. [4], Abschnitt 4.2). Generell wird hierbei in die visuelle und die maschinelle Sortierung unterschieden.

Die visuelle Sortierung konzentriert sich auf die an der Bauteiloberfläche sichtbaren Wuchsmerkmale und teilt das Holz in drei Sortierklassen (Nadelholz: S7-S13; Laubholz: LS7-LS13) ein. Durch Verwendung von apparativen Messmethoden kann zusätzlich eine Sortierung

in die Klasse S15/LS15 erfolgen (vgl. [2, 3], Abschnitt 7.3.1). Die Zuordnung der visuell festgestellten Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [5] erfolgt nach der DIN EN 1912 [6].

Wird das Bauholz maschinell nach der Festigkeit sortiert, ist dies nicht erforderlich, da anhand der gemessenen Sortierparameter eine direkte Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [6] möglich ist. Zur Anwendung kommen dabei sowohl optische Messverfahren als auch zerstörungsfreie Prüfmethoden – wie bspw. Durchbiegungsverfahren, Durchstrahlungsverfahren (Röntgen-/Kernstrahlung, Mikrowellen) und dynamische Messmethoden (s. [7]). Zur Durchführung der maschinellen Sortierung bedarf es jedoch einer Zertifizierung der Sortieranlagen sowie des Personals.

Bei verbautem Holz in bestehenden Gebäuden können die für neues Bauholz entwickelten Sortierverfahren nicht oder nur mit großen Einschränkungen angewendet werden. Im Wesentlichen betrifft dies die eingeschränkte Einsehbarkeit der Bauteile, die fehlende Personalqualifizierung sowie das Fehlen von im Altbau flexibel handhabbarer und zertifizierter Gerätetechnik (s. [8]). In der Praxis wird daher nur in den seltensten Fällen eine Festigkeitssortierung des verbauten Holzes vorgenommen. Die Tragfähigkeit des verbauten Holzes wird allenfalls intuitiv bewertet. Statische Berechnungen werden meist unter der Annahme von Vollholz der Sortierklasse S10 bzw. LS10 geführt. So können jedoch Tragfähigkeitsreserven bzw. -defizite nicht erkannt werden. Hieraus resultieren unter Umständen zu wenig substanzschonenden und nicht fachgerechten Instandsetzungsmaßnahmen.

Mit Hilfe von zuverlässigkeitstheoretischen Methoden kann die Standsicherheit und Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen exakter bewertet und Instandsetzungsmaßnahmen substanzschonender und effizienter geplant werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine Festigkeitssortierung des verbauten Holzes mit in-situ geeigneten zuverlässigen Methoden (s. [9]).

2. Festigkeitssortierung von verbautem Holz

Die Festigkeitssortierung von Holz im eingebauten Zustand in Verbindung mit der Anwendung zerstörungsfreier/-armer Prüfmethoden erlaubt die exakte und zuverlässige Bestimmung der Materialeigenschaften. Allein auf Grundlage einer visuellen Sortierung wäre dies nicht möglich.



Abb. 1: Niederdeutsches Hallenhaus in Fachwerkbauweise, die Instandsetzung erforderte die Festigkeitssortierung des verbauten Holzes – links: Außenansicht; rechts: Innenansicht der tragenden Holzkonstruktion

Zwischen den visuell feststellbaren Sortierkriterien und den Festigkeitseigenschaften von Holz besteht nur eine geringe Korrelation (s. [8, 10]). Dies führt zu einer geringen Trennschärfe,

Leistungsfähigkeit und Aussagefähigkeit. Die Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethoden zur Ermittlung der Materialeigenschaften führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Effizienz, wie die Tab. 1 belegt.

Tab. 1: Zusammenhang zwischen zerstörungsfrei messbaren Schätzwerten der Festigkeit (Indicating properties IP) und tatsächlich zerstörend gemessenen Festigkeiten (aus [8])

Schätzwert der Festigkeit (IP)	Bestimmtheitsmaß (R^2)
Jahrringbreite	0,15 ... 0,35
Ästigkeit	0,15 ... 0,35
Rohdichte	0,20 ... 0,40
Eigenfrequenz, Ultraschallgeschwindigkeit	0,30 ... 0,55
Elastizitätsmodul, statisch	0,40 ... 0,65
Elastizitätsmodul, dynamisch	0,30 ... 0,55
Ästigkeit & Rohdichte	0,40 ... 0,60
Ästigkeit & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,75
Ästigkeit, Rohdichte & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,80

In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden zur Untersuchung von verbauten Holzbauteilen entwickelt, untersucht und erprobt worden (s. [11]). Die Untersuchung von zerstörungsfrei entnommenen Proben ermöglicht zwar die exakte Ermittlung der Materialeigenschaften (s. [12-14]), ist jedoch nur in den seltensten Fällen möglich – insbesondere in denkmalgeschützten Gebäuden. Eine zerstörungsfreie Ermittlung der Materialeigenschaften ist dann nur mittels der Eindringwiderstandsmessung und der dynamischen Mess- und Prüfmethoden möglich. Diese umfassen die Eigenfrequenzmessung (s. [15]) und das Ultraschallverfahren (s. [16-18]). Beide Methoden gehören heutzutage zum internationalen Stand der Technik und werden unter anderem bei der Sortierung von Schnittholz im Sägewerk eingesetzt.

3. Das Ultraschall-Verfahren

Das Ultraschallverfahren beruht auf der engen Beziehung zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallimpulses sowie der Steifigkeit und der Rohdichte. Grundlegend wird zwischen dem Impuls-Echo-Verfahren und der Impulslaufzeitmessung unterschieden. Bei dem Impuls-Echo-Verfahren wird der Impuls senkrecht zur Faserrichtung eingeleitet und an Grenzflächen (d.h. Bauteiloberflächen oder Fehlstellen) reflektiert. Dieses Verfahren dient vor allem der Fehlstellen-Erkennung (s. [19]). Bei der Impulslaufzeitmessung wird die Zeit gemessen, welche der Impuls benötigt, um die Strecke zwischen Sender und Empfänger zurückzulegen. Weiter Unterscheidungen werden entsprechend der Einleitungsrichtung des Ultraschallimpulses getroffen (s. Abb. 2). Diese Methode eignet sich für die Bestimmung der Materialeigenschaften (s. [19]).

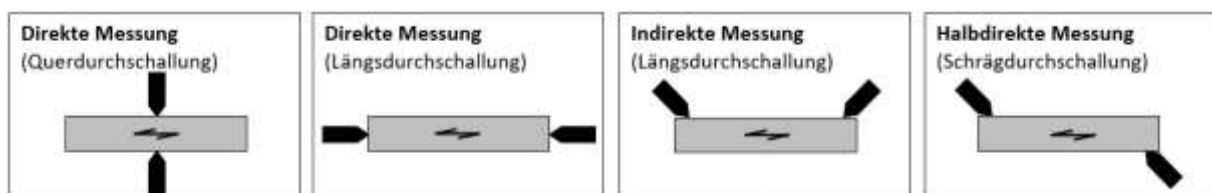


Abb. 2: Messmethoden der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (aus [19])

Neben Untersuchungen zur grundlegenden Anwendbarkeit und wesentlichen Einflussfaktoren – bspw. Holzfeuchte, Temperatur – ist auch die Anwendung zur Festigkeitssortierung untersucht worden. Dies betrifft insbesondere die Beziehungen zwischen der Schallgeschwindigkeit und den für die Festigkeitssortierung relevanten Materialkennwerten

Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul. Die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen belegen eine mittelmäßige Korrelation zur Rohdichte ($r = 0,37 \dots 0,59$) sowie eine starke Korrelation zur Biegefestigkeit bzw. zum Biege-Elastizitätsmodul ($r = 0,58 \dots 0,76$ bzw. $r = 0,67 \dots 0,95$). Eine ausführliche Zusammenfassung des aktuellen Standes der Technik ist in [19] zu finden.

Der überwiegende Teil der bisherigen Untersuchungen befasste sich mit der Anwendung an neuem Holz. Einzelne Untersuchungen zeigten jedoch, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen neuem und altem Holz zu verzeichnen waren (s. [20]). Eine Anwendung an altem Bauholz ist somit möglich. Dies ist in den vergangenen zehn Jahren vermehrt der Fall (s. [21]), wobei es sich hierbei zumeist um objektbezogene Einzeluntersuchungen mit geringem statistischem Umfang handelt. Umfängliche, systematische Untersuchungen fehlen bis dato.

4. Vergleichende Materialversuche

Die nachfolgend beschriebenen Materialversuche sind Teil einer systematischen Untersuchung an neuem und altem Holz hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung als zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der Materialeigenschaften von verbaute Holz. Gegenstand der Untersuchungen waren 190 stabförmige Prüfkörper in Bauteildimension aus neuem Fichtenholz.

Die vergleichenden Materialversuche gliederten sich in drei Teiluntersuchungen:

1. Visuelle Festigkeitssortierung nach DIN 4071-1:2012 [3]
2. Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
direkte & indirekte Messungen; verwendetes Messgerät: Sylvatest Trio, Fa. CBT CBS
3. Vier-Punkt-Biegeversuche nach DIN EN 408:2012 [22]

Versuchsbegleitend wurden die Holzfeuchte nach EN 13183-1/-2:2002 [23, 24] und die Rohdichte nach DIN EN 408 [22] ermittelt.

5. Ergebnisse

Auf Grundlage der Ergebnisse der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 ergab sich folgende Zuordnung des Probenmaterials zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 [2] bzw. den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] (s. a. Abb. 3):

1. 41 Prüfkörper (ca. 22%) konnten der Sortierklasse S13 bzw. der Festigkeitsklasse C30 zugeordnet werden.
2. 97 Prüfkörper (ca. 53%) entsprachen der Sortierklasse S10 bzw. der Festigkeitsklasse C24. Das ausschlaggebende Sortiermerkmal war die Ästigkeit.
3. 27 Prüfkörper (ca. 14%) entsprachen der Sortierklasse S7 der Festigkeitsklasse C18. Die ausschlaggebenden Sortiermerkmale waren die Ästigkeit und die Faserneigung.
4. 25 Prüfkörper (ca. 11%) konnten keiner Sortierklasse bzw. Festigkeitsklasse zugeordnet werden. Die ausschlaggebenden Sortiermerkmale waren die Ästigkeit und Risse.

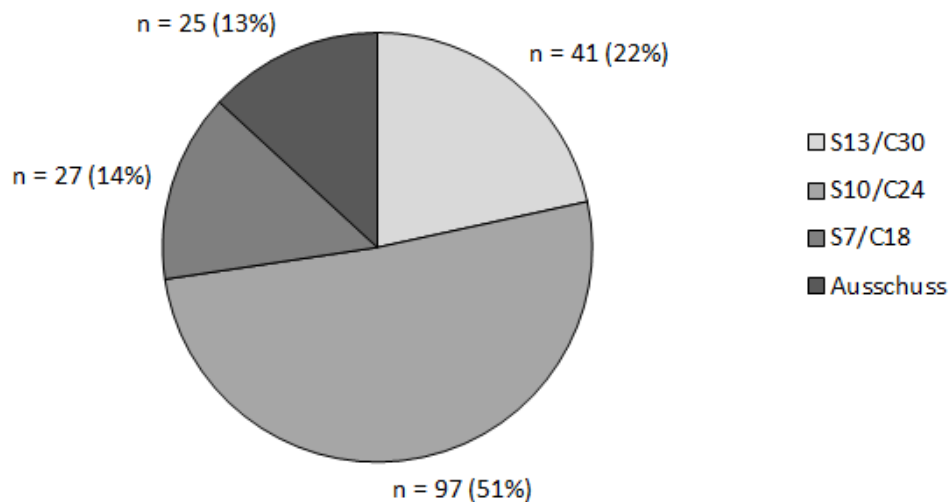


Abb. 3: Zuordnung des Probenmaterials zu den Sortier- & Festigkeitsklassen nach DIN 4074-1:2012 [2] und DIN EN 338:2016 [5] auf Grundlage der visuellen Sortierung

Das untersuchte Probenmaterial wurde anhand der Mittelwerte der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeit erneut den Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 [2] bzw. den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] unter Verwendung der in [25] angegebenen Klassengrenzen zugeordnet (s. Tab. 2).

Tab. 2: verwendete Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung des Probenmaterials zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1 (entnommen aus [25])

Sortierklasse nach DIN 4074-1	Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit bei $\omega = 12\%$ [m/s]
S13 - Bauholz mit überdurchschnittlicher Tragfähigkeit	$v \geq 5700$
S10 - Bauholz mit üblicher Tragfähigkeit	$5500 \leq v < 5750$
S7 - Bauholz mit geringer Tragfähigkeit	$5100 \leq v < 5500$
Ausschuss -Nicht als Bauholz verwendbar	$v < 5100$

Die sich unter Verwendung der Ultraschallgeschwindigkeit als Sortierkriterium ergebende Zuordnung zu den Sortierklassen nach DIN 4074-1:2012 [2] bzw. den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] ist in Tabelle 3 und Abbildung 4 dargestellt.

Tab. 3: Ergebnisse der Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit im Vergleich zur visuellen Sortierung nach DIN 4074-1:2012 [4]

Sortierklasse nach DIN 4074-1 & Festigkeitsklasse nach DIN EN 338	Verteilung nach visueller Sortierung	Verteilung nach Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit (direkte Messung)	Verteilung nach Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit (indirekte Messung)
S13/C30	22%	72%	57%
S10/C24	53%	19%	27%
S7/C18	14%	17%	15%
Ausschuss	11%	/	1%

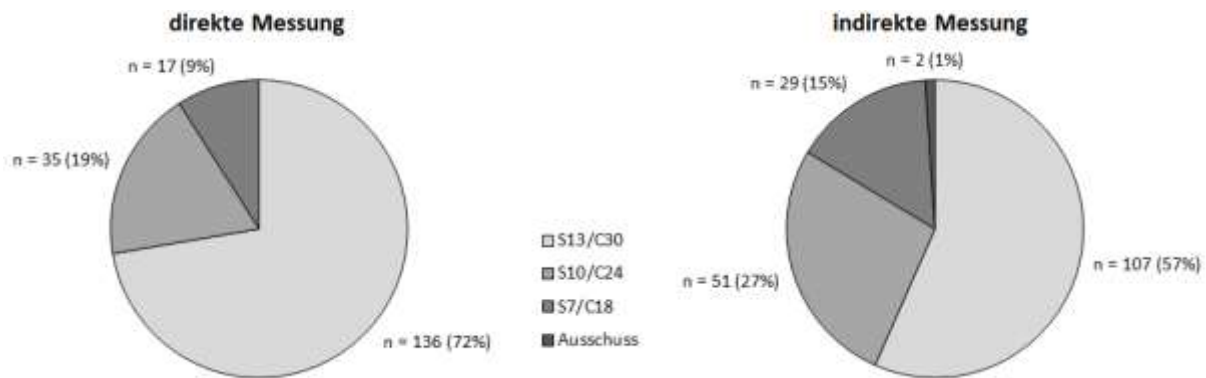


Abb. 4: Zuordnung des Probenmaterials zu den Sortier- & Festigkeitsklassen nach DIN 4074-1:2012 [2] und DIN EN 338:2016 [5] auf Grundlage der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung

Es wird ersichtlich, dass sich der Anteil an Bauholz mit hoher Tragfähigkeit wesentlich erhöht hat. Weiterhin ergab sich für 150 Prüfkörper (direkte Messung) bzw. 139 Prüfkörper (indirekte Messung) eine Zuordnung in eine höhere Sortier- bzw. Festigkeitsklasse möglich ist, als allein auf Grundlage einer visuellen Sortierung. Bei 38 bzw. 48 Prüfkörpern bestätigte sich die auf Grundlage der visuellen Sortierung getroffenen Zuordnung.

Die Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] anhand der ermittelten Rohdichte ergab eine ähnliche Verteilung. Für 146 Prüfkörper ergab sich eine Zuordnung in eine höher Festigkeitsklasse als auf Grundlage der visuellen Sortierung. Für weitere 36 Prüfkörper konnte die durch die visuelle Sortierung getroffene Zuordnung bestätigt werden. Weiterhin zeigt sich, dass sich bei etwa 87% der Prüfkörper unter Berücksichtigung der ermittelten Rohdichte die gleiche bzw. eine höhere Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] ergibt, welche bereits anhand der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeit ergab.

Der Vergleich der Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen auf Grundlage der quasi-apparativ unterstützen visuellen Sortierung (visuelle Sortierung, Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Rohdichteermittlung) mit der Zuordnung entsprechend DIN EN 338:2016 [5] anhand der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls zeigt, dass 148 Prüfkörpern (ca. 78%) derselben Festigkeitsklasse zugeordnet worden. Bei weiteren 17 Prüfkörpern (ca. 9%) betrug die Differenz zwischen den versuchstechnisch ermittelten Werten der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls zu den Grenzwerten der nächst höheren Festigkeitsklasse lediglich ca. <1%-10%. Diese Differenz kann als vernachlässigbar angesehen werden. Der Anteil des Probenmaterials, für welche eine übereinstimmende Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [5] ergibt sich somit zu ca. 87%. Dieses Ergebnis belegt zum einen die Verbesserung der visuellen Sortierung durch unterstützend angewandte apparative Prüfmethoden. Zum anderen deutet es auf eine hohe Genauigkeit der verwendeten quasi-apparativen Sortiermethode hin.

6. Schlussfolgerungen & Ausblick

Die Ergebnisse der ersten Teiluntersuchung zeigen, dass der kombinierte Einsatz der visuellen Sortierung und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zu einer wesentlichen Verbesserung der Ausbeute führen. Durch die zusätzliche Feststellung der Rohdichte wird eine Erhöhung der Genauigkeit erreicht. Die auf diesem Wege getroffene Zuordnung des Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 wird durch die Ergebnisse der Biegeversuche bestätigt.

Die Korrelations- und Regressionsanalyse belegt eine enge Beziehung zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit sowie dem Biege-Elastizitätsmodul. Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung eignet sich somit für die Ermittlung der Materialkennwerte

von verbautelem Holz. Hinsichtlich der Ermittlung der Rohdichte konnte die Eignung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung nicht bestätigt werden. Die Beziehung zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Rohdichte ist nur schwach bis mittelmäßig ausgeprägt. Daher empfiehlt es sich, die Rohdichte von Holzbauteilen im eingebauten Zustand bspw. durch die Entnahme und labortechnische Untersuchung von Bohrkernproben zu ermitteln.

Diese Ergebnisse sollen in den folgenden Teiluntersuchungen an weiteren Holzarten sowie an altem Holz verifiziert werden. Zusätzlich ist eine Erprobung der Methode an bestehenden Holzkonstruktionen geplant.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch private Spenden finanziert. Die Autoren bedanken sich für die großzügige Unterstützung.

Literatur

- [1] DIN EN 14081-1: *Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2011-16.
- [2] DIN 4074-1: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-06.
- [3] DIN 4074-5: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2008-12.
- [4] DIN 20000-5: *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2016-02.
- [5] DIN EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2016-07.
- [6] DIN EN 1912: *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013-10.
- [7] Sandomeer M. K., Steiger R.: *Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz; Zukunft Holz – Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential*. 2009
- [8] Lißner K., Rug W.: *Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitte der DIN 1052:August 2004 (aktualisierte Fassung von 2004 unter Berücksichtigung der Einführung der Eurocodes)*. 2015
- [9] Loebjinski M., Rug W., Pasternak H.: *Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand*. In: Bauingenieur 92 (Februar 2017), S. 65-73
- [10] Glos P.: *Holz im technischen Einsatz, Perspektiven der Sortierung und Qualitätssicherung*. In: Internationales Holzbauforum, Garmisch-Partenkirchen, 1995
- [11] Lißner K., Rug W.: *Holzbausanierung beim Bauen im Bestand*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York. 2. Auflage, 2018 (in Vorbereitung)
- [12] Rug W., Seemann A.: *Festigkeit von Altholz*. In: Holztechnologie 29 (1988) Heft 4, S. 186-190
- [13] Rug W., Seemann A.: *Ermittlung von Festigkeitswerten an alten Holzkonstruktionen*. In: Holztechnologie 30 (1989) Heft 2, S. 69-73
- [14] Rug W., Seemann A.: *Strength of old timber*. In: CIB-Conference (1989), Paris
- [15] Görlacher R.: *Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz*. Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 219-222
- [16] Steiger R.: *Festigkeitssortierung von Kantholz mittels Ultraschall*. In: Holz-Zentralblatt Nr. 59 (1991), S. 985-989

- [17] Steiger R.: *Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierte M/N-Beanspruchung – Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall*. Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (1996), Zürich (CH)
- [18] Augustin M.: *Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz*. Diplomarbeit; TU Graz, Lehrstuhl für Holzbau (2004), Graz
- [19] Linke G., Rug W., Pasternak H.: *Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Bericht zum Stand der Technik*. In: Bauingenieur 92 (2017) H. 5, S. 229-236
- [20] Kranitz K., Niemz P.: *Untersuchungen zu Eigenschaften von gealtertem Holz*. In: Forschungskolloquium Holzbau Forschung + Praxis (2010), Stuttgart
- [21] COST Action fp1101: *Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members – State of the Art Report 2015*
- [22] DIN EN 408: *Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-10.
- [23] DIN EN 13183-1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholzes – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2002-07.
- [24] DIN EN 13183-2: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholzes – Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2002-07.
- [25] Steiger R.: *Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichtenholz*. In: Holzforschung und Holzverwertung 5 (1997), S. 83-90