

Apparativ unterstützte Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden

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; Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug (i. R.); Hartmut Pasternak

Zusammenfassung

Die Sortierung von Bauholz nach der Festigkeit ist eine grundlegende Voraussetzung für dessen Verwendung als geregeltes Bauprodukt, um die teils erheblichen Streuung der Materialeigenschaften einzugrenzen. Die für neues Bauholz entwickelten Sortierverfahren lassen sich nur bedingt auf Holzbauteile in bestehenden Konstruktionen anwenden. Daher werden diese nur selten in-situ nach der Festigkeit sortiert. Eine exakte Bewertung des Bauzustandes ist jedoch nur möglich, wenn die vorhandene Materialqualität erfasst wird. Dabei können zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode wie bspw. das Ultraschall-Verfahren unterstützend zum Einsatz kommen. Der nachfolgende Beitrag beschreibt Untersuchungen zur Einbindung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung in die normativ geregelten Sortiermethoden. Die Ergebnisse zeigen eine wesentliche Verbesserung der Ausbeute und Genauigkeit der Sortierung durch den kombinierten Einsatz der visuellen Sortierung und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung.

1. Einleitung

Für die Verwendung von Holz als bauaufsichtlich geregeltes Bauprodukt ist die Eingrenzung der natürlichen Streuungen unbedingte Voraussetzung. Dies wird durch eine Festigkeitssortierung erreicht. Europaweit wird diese durch die EN 14081-1 [1] geregelt. Es wird grundlegend in die visuelle und die maschinelle Sortierung unterschieden. Die visuelle Sortierung konzentriert sich auf die oberflächlich sichtbaren Wuchsmerkmale und teilt das Holz in drei Sortierklassen ein. Bei Verwendung zusätzlicher, apparativer Messmethoden ist die Sortierung in eine weitere Sortierklasse möglich.

Bei der maschinellen Sortierung werden Merkmale apparativ gemessen, welche in engem Zusammenhang zu den Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften stehen. Die Zuordnung zu den Festigkeitsklassen nach EN 338 [2] erfolgt direkt über sogenannte Sortiergleichungen und -parameter. Hierbei kommen neben optischen Messverfahren auch zerstörungsfreie Prüfmethode, wie bspw. Durchbiegungs-/Durchstrahlungsverfahren und dynamische Messmethoden zum Einsatz (s. [3]).

Bei Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen können die für neues Bauholz entwickelten Sortierverfahren nicht oder nur mit großen Einschränkungen angewendet werden (s. a. [4]). In

der Praxis wird daher nur in den seltensten Fällen eine Festigkeitssortierung des verbauten Holzes vorgenommen. Die Tragfähigkeit des verbauten Holzes wird meist intuitiv bewertet. Tragfähigkeitsreserven bzw. -defizite können so nicht erkannt werden. Die Folge sind wenig substanzschonende und nicht fachgerechte Instandsetzungsmaßnahmen. Die Feststellung der vorhandenen Materialqualität durch eine zuverlässige in-situ-Festigkeitssortierung ermöglicht eine exaktere Bewertung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit bestehender Konstruktionen - auch mit Hilfe angepasster Nachweismethoden.

Eine alleinige visuelle Sortierung ist hierfür nicht ausreichend, da zwischen den visuell feststellbaren Sortierkriterien und den Festigkeitseigenschaften von Holz nur geringe Korrelationen bestehen (s. [3]). Die Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethoden führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Effizienz (s. [3]).

In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl von zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden zur in-situ-Untersuchung von Holzbauteilen entwickelt, untersucht und erprobt worden (s. [4]). Die Untersuchung von zerstörungsfrei entnommenen Proben ermöglicht zwar die genaue Ermittlung der Materialeigenschaften (s. [7, 8]), ist jedoch nur selten möglich. Eine zerstörungsfreie Ermittlung von Materialkennwerten ist dann meist nur mittels sklerometrischer und dynamischen Prüfmethoden möglich. Letztere beinhalten die Eigenfrequenzmessung (s. [9]) und das Ultraschallverfahren (s. [10, 11]). Beide Methoden gehören zum internationalen Stand der Technik der zerstörungsfreien Prüfung von Holz. Eine ausführliche Beschreibung des Ultraschall-Verfahrens sowie eine Zusammenfassung des Standes der Technik ist in [12] zu finden.

2. Untersuchungen zur apparativ unterstützen Festigkeitssortierung

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sind Teil einer systematischen Studie an neuem und altem Holz hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung als zerstörungsfreie Methode für die in-situ Festigkeitssortierung. Das Ziel der Teiluntersuchung ist die Bewertung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung. Gegenstand der Untersuchungen waren Prüfkörper in Bauteildimension ($b/h/l = 50/80/1520$ mm) aus neuem Fichten- (303 Stk.), Kiefern- (300 Stk.) und Eichenholz (301 Stk.). Die vergleichenden Untersuchungen gliederten sich in drei Materialprüfungen:

1. visuelle Sortierung nach EN 14081-1:2016 [1]¹ und DIN 4074-1:2012/-5:2008 [5, 6]
2. Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen (*Messgerät: Sylvatest Trio; 2 direkte und 2 indirekte Messungen je Prüfkörper; versuchsbegleitende Messung der Holzfeuchte nach EN 13183-2:2002 [15] und der Klimabedingungen*)
3. Biegebruchversuche nach EN 408:2012 [13], Abschnitt 10 und 19 (*hydraulische Biegeprüfmaschine mit $F_{max} = 500$ kN und Seilzugwegaufnehmer ASM Positionssensor WS11-2000; versuchsbegleitende Messung der Holzfeuchte nach EN 13183-1 [14] und Rohdichtebestimmung nach EN 408:2012 [13]*)

Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Materialversuche ist in [16] zu finden.

3. Ergebnisse und Auswertung

3.1 Visuelle Sortierung

Der überwiegende Teil des Probenmaterials ist in die Sortierklassen S 7-10/LS 7-10 sortiert worden (s. Abb. 1). Nur etwa (11–20) % des Probenmaterials entsprach den Anforderungen an die Sortierklassen S 13/LS 13. Weitere (13–32) % der Proben konnten keiner der Sortierklassen

¹ In Verbindung mit der DIN 20000-5:2012

nach DIN 4074-1/-5 zugeordnet werden. Die ausschlaggebenden Kriterien waren Äste, Faserneigungen und Risse.

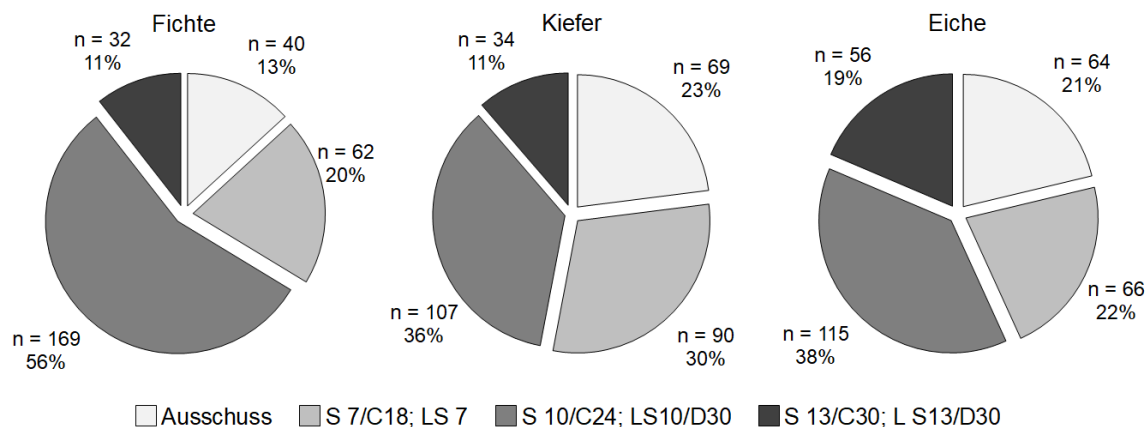


Abb. 1: Ergebnisse der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1:2012/-5:2008 (n = Anzahl)

Der geringe Anteil an Bauholz der Sortierklassen S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/-5 resultiert aus den geringen Korrelationen zwischen den Sortierkriterien und Materialeigenschaften (vgl. [3]). Daher kann Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (d.h. >S 13/LS 13 nach DIN 4074-1/-5 [5, 6] bzw. > C30/D30 nach EN 338 [2]) nicht visuell sortiert werden.

Dieser Umstand kann durch die zusätzliche Anwendung apparativer Messmethoden beseitigt werden (s. [17]). Die Eignung der apparativ unterstützten Festigkeitssortierung wurde unter anderem in [18] untersucht. Das untersuchte Verfahren umfasste die Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls durch Eigenfrequenzmessung nach [9], der Rohdichte sowie die visuelle Sortierung entsprechend der Sortierkriterien der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1 und fand 2008 im Wesentlichen unverändert als apparativ unterstützte visuelle Sortierung Eingang in die deutschen Sortiervorschriften DIN 4074-1/-5.

3.2 Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit

Mit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung können die Materialkennwerte von Holz mit relativ geringem Aufwand ermittelt werden. Die Eignung für die Festigkeitssortierung von Bauholz wurde bereits vereinzelt untersucht (s. u. a. [10, 11, 19]). Die in der Literatur angegebenen Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit gelten jedoch nur für Fichtenholz (s. bspw. [11]).

Aus den eigenen Untersuchungsergebnissen wurden analog zum Vorgehen in [11] Regressionsbeziehungen abgeleitet. Die Beziehungen sind unterschiedlich stark ausgeprägt (Fichte: $r = 0,54 \dots 0,56$; Kiefer: $0,28 \dots 0,32$; Eiche: $0,83 \dots 0,84$). Aus den Regressionsbeziehungen und den charakteristischen Werten des Elastizitätsmoduls nach EN 338:2016 [2] sind dann Grenzwerte für die Ultraschallgeschwindigkeit abgeleitet worden (s. a. [16] & Tab. 2).

Tab. 2: Vorschlag für Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit

Festigkeits- klasse	Fichteholz		Kiefernholz		Festig- keits- klasse	Eichenholz	
	Direkte Messung	Indirekte Messung	Direkte Messung	Indirekte Messung		Direkte Messung	Indirekte Messung
C18	5100	4900	3900	3900	D24	4300	4200
C24	5500	5350	4600	4600	D30	4500	4400
C30	5750	5550	5000	4900	D35	4600	4600
C35	5950	5800	5300	5200	D40	4800	4700
C40	6150	6050	5700	5600	D50	5000	4900

Die Übereinstimmung zur Zuordnung über die experimentell ermittelten Materialkennwerte lag im Bereich von (55-94) %. Gleichzeitig ist eine deutlich höhere Ausbeute an Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (> C30/D30 nach EN 338) festzustellen (s. Abb. 2).

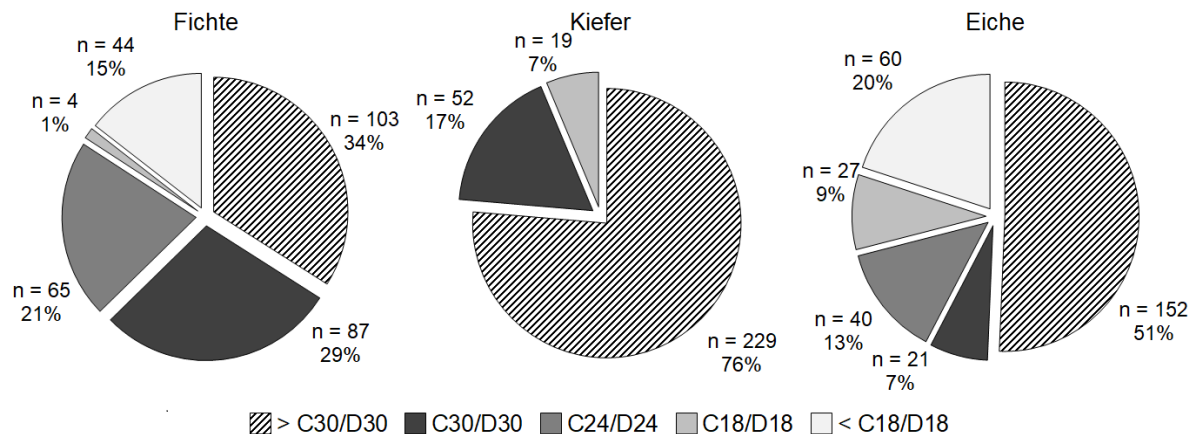


Abb. 2: Ergebnisse der Sortierung anhand der Ultraschallgeschwindigkeit (n = Anzahl)

3.3 Sortierung mittels Sortierparametern

Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz apparativer Messmethoden für die Festigkeitssortierung ist der sogenannte Sortierparameter. Dieser wird aus multiplen Regressionsmodellen abgeleitet, sodass mehrerer Messmethoden in die Sortierentscheidung einbezogen werden können.

Aus den eigenen Untersuchungsergebnissen wurden multiple lineare Regressionsmodelle ermittelt. Um dem möglichen Einsatz angepasster Nachweismethoden Rechnung zu tragen, ist ein mehrstufiges Sortiermodell aufgestellt worden. Grundlage hierfür sind die in [20] vorgeschlagenen Kenntnisstufen für die Standsicherheitsbewertung bestehender Holzkonstruktionen. Abhängig vom Grad der über die Konstruktion gewonnenen Informationen ist die Anwendung angepasster Nachweismethoden möglich. Das aus dieser Betrachtung resultierende Sortiermodell ist in Tab. 3 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 3: Gegenüberstellung der Sortierstufen (SGL ... Strength grading level) und der Kenntnisstufen (KL ... Knowledge Level) nach [20]

Sortierstufe	Erforderliche Sortiermethoden	Kenntnisstufe
SGL 0	keine Festigkeitssortierung erforderlich	KL 0
SGL 1	Visuelle Sortierung nach EN 14081-1	KL 1
SGL 2	apparativ unterstützte Festigkeitssortierung (visuelle Sortierung und zerstörungsfreie Methoden)	KL 2
SGL 3	apparativ unterstützte Festigkeitssortierung (visuelle Sortierung und zerstörungsfreie/-arme Methoden)	KL 2/3

Die in der Sortierstufe 1 erforderliche Sortiermethoden sind in den existierenden Sortiervorschriften [1, 5, 6]) umfassend geregelt. In den Sortierstufen 2 & 3 können die Regelungen der DIN 4074-1/-5 [5, 6] zur apparativ unterstützen visuellen Sortierung übertragen werden. In dieser Norm werden jedoch keine Festlegungen getroffen, auf welche Weise die apparativen Methoden einzusetzen sind. Vorläufig wird daher auf die Vorgehensweise der maschinellen Festigkeitssortierung zurückgegriffen.

Bei der Aufstellung der multiplen Regressionsmodelle wurden sowohl visuell messbare Sortierkriterien als auch zerstörungsfrei/-arm messbare Materialkennwerte einbezogen. Seitens der visuellen Sortierung sind die festigkeits-/tragfähigkeitsmindernde Kriterien Ästigkeit, Faserneigung und Risse verwendet worden. Weitere Sortierkriterien wurden nicht berücksichtigt, da

sie entweder in-situ nicht messbar sind (Markröhre, Jahrringbreite), direkt in der Nachweisführung berücksichtigt werden können (bspw. Baumkante als Fehlfläche, Verformungen als Außermittigkeit) oder im Zuge der Instandsetzung beseitigt werden können (Fäule, Insektenfraß). Als zerstörungsfrei messbare Materialkennwerte sind in der Sortierstufe SGL 2 die Ultraschallgeschwindigkeit sowie die übertragene elektrische Spannung verwendet worden. In der Sortierstufe SGL 3 wurden zusätzlich dynamischer Elastizitätsmodul und Rohdichte verwendet.

Die Sortierkriterien und Messgrößen sind in verschiedenen Kombinationen untersucht worden. Als Zielgröße wurde vorläufig nur der statische Biege-Elastizitätsmodul verwendet, da dieser eine generell enge Beziehungen zu den Festigkeitseigenschaften aufweist. Je Holzart sind 103 Regressionen aufgestellt worden. Die Korrelationskoeffizienten der jeweils am stärksten ausgeprägten Regressionsbeziehungen der Sortierstufen SGL 1-3 sind in der Tab. 4 aufgeführt.

Tab. 4: Korrelationskoeffizienten der untersuchten Regressionsbeziehungen

Sortier -stufe	Sortierkriterien ¹⁾	Korrelationskoeffizienten r		
		Fichte	Kiefer	Eiche
SGL 1	A/FN/R	0,294	0,535	0,310
SGL 2	A/FN/R/v/U (direkte Messung)	0,790	0,817	0,869
	A/FN/R/v/U (indirekte Messung)	0,799	0,816	0,878
SGL 3	A/FN/R/E/ρ (direkte Messung)	0,803	0,931	0,885
	A/FN/R/E/ρ (indirekte Messung)	0,815	0,916	0,899

¹⁾ A - Ästigkeit, FN - Faserneigung, R - Risse, v - Schallgeschwindigkeit, U - übertragene elektrische Spannung, E - dyn. E-Modul, ρ - Rohdichte

Die rein visuelle Sortierung (SGL 1) weist nur vergleichsweise schwach ausgeprägte Korrelationen auf. Durch Hinzunahme von zerstörungsfrei/-arm messbaren Materialkennwerten (SGL 2 & 3) wird eine deutliche Verbesserung der Ausprägung erreicht.

Die Ableitung von Grenzwerten der Sortierparameter erfolgte in Anlehnung an die EN 14081-2:2018 [21], Anhang B. Hierzu wurden - wie in (1) dargestellt - lineare Regressionsbeziehungen zwischen den Sortierparametern und der Zielgröße aufgestellt.

$$MOE = a_{MOE} \cdot IP + b_{MOE} \quad (1)$$

Dabei ist: MOE die Zielgrößen (hier: stat. Biege-Elastizitätsmodul); IP der Sortierparameter; a_{MOE} der Regressionskoeffizient; b_{MOE} ...die Regressionskonstante

Durch Umstellung der Gleichung (1) können die Grenzwerte unter Verwendung der charakteristischen Kennwerte nach EN 338 [2] als Zielgröße berechnet werden (s. (2)).

$$S_{MOE} = \frac{MOE_{req} - b_{MOE}}{a_{MOE}} \quad (2)$$

Dabei ist: S_{MOE} der Grenzwert für den Sortierparameter; MOE_{req} die erforderliche Zielgröße (hier: E-Modul nach EN 338); a_{MOE} der Regressionskoeffizient; b_{MOE} die Regressionskonstante

Die Überprüfung der abgeleiteten Grenzwerte erfolgt entsprechend der Festlegungen der EN 14081-3:2016 [22] anhand der nach EN 384 [23] ermittelten charakteristischen Materialkennwerte. Erfüllen die charakteristischen Kennwerte der Stichprobe die Anforderungen der jeweiligen Festigkeitsklassen nach EN 338 [2], gelten die Grenzwerte als verifiziert. Andernfalls sind eine Anpassung und erneute Überprüfung erforderlich.

Die Grenzwerte der Sortierparameter werden nur für die Sortierstufen SGL 2 & 3 abgeleitet, da in der Sortierstufe SGL 1 eine Zuordnung über die DIN 4074-1/-5 [5, 6] erfolgen kann. Die zugrunde liegenden Regressionsbeziehungen sind in der Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Regressionsbeziehungen zwischen Sortierparameter (IP ... indicating property) und Zielgröße (E_m ... statischer Biege-Elastizitätsmodul)

Sortierstufe	Holzart	Regressionsgleichung ¹⁾	Korrelationskoeffizient r
SGL 2	Fichte	$E_m = IP_{dir} - 2,18 \cdot 10^{-11} / E_m = IP_{ind} - 2,91 \cdot 10^{-11}$	0,790 / 0,799
	Kiefer	$E_m = IP_{dir} - 2,55 \cdot 10^{-11} / E_m = IP_{ind} - 2,55 \cdot 10^{-11}$	0,817 / 0,816
	Eiche	$E_m = IP_{dir} - 1,64 \cdot 10^{-11} / E_m = IP_{ind} - 3,64 \cdot 10^{-12}$	0,869 / 0,878
SGL 3	Fichte	$E_m = IP_{dir} + 7,26 \cdot 10^{-12} / E_m = IP_{ind} - 1,27 \cdot 10^{-12}$	0,803 / 0,815
	Kiefer	$E_m = IP_{dir} + 3,64 \cdot 10^{-12} / E_m = IP_{ind} - 3,64 \cdot 10^{-11}$	0,931 / 0,916
	Eiche	$E_m = IP_{dir} + 5,46 \cdot 10^{-12} / E_m = IP_{ind} - 3,64 \cdot 10^{-11}$	0,885 / 0,899

1) IP - Sortierparameter, E_m - stat. Biege-Elastizitätsmodul, dir - direkte Messung, ind - indirekte Messung

Die Grenzwerte der Sortierparameter wurden vorläufig für folgende Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016 [2] abgeleitet:

- Nadelholz (Fichte/Kiefer): C18, C24, C30, C35, C40
- Laubholz (Eiche): D18, D24, D30, D35, D40

Die Überprüfung der Grenzwerte erfolgt sowohl über die Ermittlung des charakteristischen Elastizitätsmoduls $E_{0,mean}$ nach EN 384 [23] als auch über einen Vergleich der Zuordnungen über den Sortierparameter und den versuchstechnisch ermittelten statischen Biege-Elastizitätsmodul. In Anlehnung an die Festlegungen zur Ermittlung des charakteristischen Mittelwertes des Elastizitätsmoduls nach EN 384:2019 [23], Gl. (10) ist eine Grenzwertunterschreitung von maximal 5% als zulässig betrachtet worden. Die abgeleiteten Grenzwerte sind in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Grenzwerte der Sortierparameter für die Sortierstufen SGL 2 & 3

Festigkeitsklasse n. EN 338	Fichtenholz [N/mm ²]	Kiefernholz [N/mm ²]	Festigkeitsklasse n. EN 338	Eichenholz [N/mm ²]
<C18	<9000	<9000	<D18	<9500
C18	9000	9000	D18	9500
C24	11000	11000	D24	10000
C30	12000	12000	D30	11000
C35	13000	13000	D35	12000
C40	14000	14000	D40	13000

Der Vergleich zwischen der Sortierung über die Ultraschallgeschwindigkeit und den Sortierparameter ergab eine Übereinstimmung im Bereich von ca. 85-95 % (s. Tab. 7).

Tab. 7: Übereinstimmung zwischen der Klassenzuordnung anhand der in Tab. 6 aufgeführten Grenzwerte sowie der Ergebnisse der zerstörenden Materialversuche

Sortierstufe	Sortierkriterien ¹⁾	Prozentuale Übereinstimmung		
		Fichte	Kiefer	Eiche
SGL 2	A/FN/R	85,1 %	91,3 %	91,3 %
	A/FN/R/v/U (direkte Messung)	84,8 %	92,3 %	91,3 %
SGL 3	A/FN/R/v/U (indirekte Messung)	85,1 %	94,0 %	91,6 %
	A/FN/R/E/ ρ (direkte Messung)	84,5 %	94,0 %	90,6 %

¹⁾ A - Ästigkeit, FN - Faserneigung, R - Risse, v - Schallgeschwindigkeit, U - übertragene elektrische Spannung, E - dyn. E-Modul, ρ - Rohdichte

Gleichzeitig ist durch die apparativ unterstützte Sortierung eine höhere Ausbeute an Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit (> C30/D30 nach EN 338 [2]) zu verzeichnen (s. beispielhaft Abb. 3). Insbesondere bei Fichtenholz steigt der Anteil von 34 % auf 38 %.

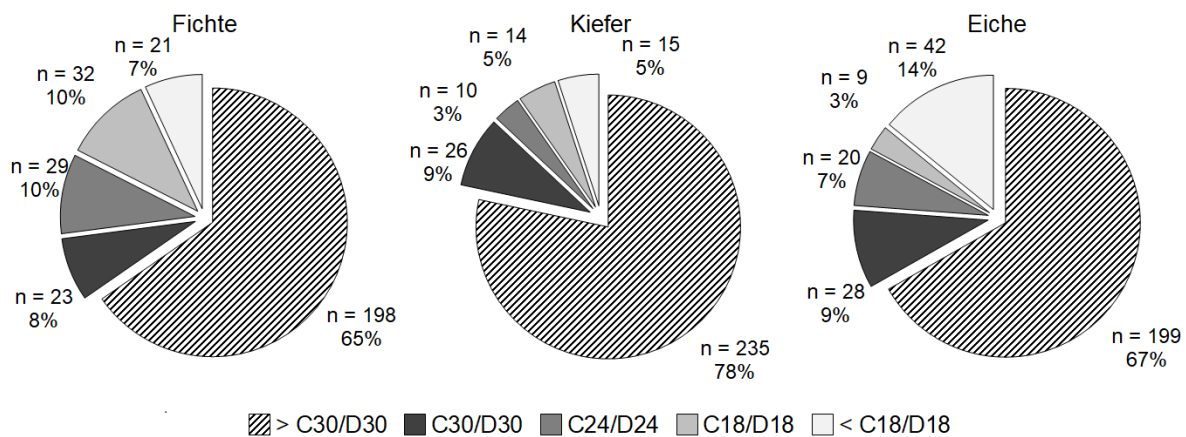


Abb. 3: Ergebnisse der Sortierung in der Sortierstufe SGL 2 (indirekte Ultraschall-Impulslaufzeitmessung; n = Anzahl)

4. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung grundlegend für die Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen geeignet ist. Aufgrund der teils geringen eindimensionalen Korrelationen zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und dem stat. Biege-Elastizitätsmodul sollte auf eine reine apparative Sortierung verzichtet werden. Die zusätzliche Berücksichtigung weiterer zerstörungsfrei/-arm messbarer Kenngrößen führt zu einer deutlichen Verbesserung der Korrelationen und des Sortierergebnisses. Die vorgeschlagene Sortiermethode muss noch durch Erprobung an alten Holzbauteilen in-situ sowie im Labor überprüft werden. Dies wird Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von privaten 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, 2016-06
- [2] DIN EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2016-07
- [3] SANDOMEER, M. K.; STEIGER, R.: *Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz*. In: *Zukunft Holz - Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential* (2009), S. 361-370.
- [4] LISSNER, K.; RUG, W.: *Holzbausanierung beim Bauen im Bestand*. 2. Auflage. VDI Springer Verlag, Berlin. 2018
- [5] DIN 4074-1: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-06
- [6] DIN 4074-5: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2008-12
- [7] RUG, W.; SEEMANN, A.: *Festigkeit von Altholz*. In: *Holztechnologie* 29 (1988), S. 186-190

- [8] INIGUEZ-GONZALEZ, G.; MONTON, J.; ARRIAGA, F.; SEGUES E.: *In-Situ Assessment of structural timber density using Non-destructive and Semi-destructive Testing*. In: BioResources 10 (2015) Heft 2, S. 2256-2265
- [9] GÖRLACHER, R.: *Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz*. In: Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 219-222
- [10] STEIGER, R.: *Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierte M/N-Beanspruchung – Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (1996)
- [11] AUGUSTIN, M.: *Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz*. Technische Universität Graz, Lehrstuhl für Holzbau (2004)
- [12] LINKE, G.; RUG, W.; PASTERNAK, H.: *Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Bericht zum Stand der Technik*. In: Bauingenieur 92 (2017), S. 229-236
- [13] DIN EN 408: *Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-10
- [14] DIN EN 13183-1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholzes – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2002-07
- [15] DIN EN 13183-2: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholzes – Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2002-07
- [16] LINKE, G.; RUG, W.; PASTERNAK, H.: *Strength grading of structural timber in existing structures with the ultrasonic time-of-flight measurement*. In: 5th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Sept. 25.-27. 2019, Guimaraes, Portugal
- [17] BLASS, H. J.; GÖRLACHER, R.: *Visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung von Vollholz*. In: Mikado 5 (1996), S. 64-71
- [18] BLASS, H. J.; FRESE, M.: *Sortierverfahren für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung*. In: Holz als Roh und Werkstoff 62 (2004), S. 325-334
- [19] SANDOZ, J.-L.: *Grading of construction timber by ultrasound*. In: Wood Science and Tech-nology 23 (1989), S. 95-108
- [20] LOEBJINSKI, M.; KÖHLER, J.; RUG, W.; PASTERNAK, H.: *Development of an optimisation-based and practice orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures*. In: 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Oct. 28.-31. 2018, Ghent, Belgium.
- [21] DIN EN 14081-2: *Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 2: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die Erstprüfung*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2018-12
- [22] DIN EN 14081-3: *Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 3: Maschinelle Sortierung; zusätzliche Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2018-12
- [23] DIN EN 384: *Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2019-02