

Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Bericht zum Stand der Technik

G. Linke, W. Rug, H. Pasternak

Zusammenfassung Die Materialeigenschaften des Rohstoffs Holz 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 wie beispielsweise das Ultraschall-Verfahren unterstützend zum Einsatz kommen. Die Anwendbarkeit dieser Prüfmethode für die Festigkeitssortierung von neuem Schnittholz ist durch zahlreiche Untersuchungen belegt. Bei Bauholz in historischen Gebäuden sind die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen nur bedingt übertragbar. Hierfür sind umfangreiche systematische Untersuchungen erforderlich.

Strength grading of timber in historic constructions – state of the art report

Abstract The properties of timber have partially significant variations. To use it as a regulated construction material the limitation of these variations is required. This is achieved by strength grading. Non-/semi-destructive methods such as the ultrasonic method can be used for strength grading. The applicability of this method for the strength grading of new timber is proven by several studies. The results of these studies are not completely applicable on timber in historic constructions. Therefore, an extensive systematical study is required.

1 Festigkeitssortierung von Bauholz

Der Rohstoff Holz weist erhebliche Streuungen in seinen Materialeigenschaften auf, welche aus dem strukturellen Aufbau resultieren. Zusätzlich werden sie von Standort- sowie Wuchsbedingungen beeinflusst. Für die Verwendung von Holz als bauaufsichtlich geregeltes Bauprodukt ist die Eingrenzung der Streuungen jedoch unbedingte Voraussetzung. Dies erfolgt durch eine Festigkeitssortierung des Bauholzes entsprechend seiner Materialeigenschaften. Nach der aktuell in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Holzbau-Bemessungsnorm DIN EN 1995-1-1:2010 [1] muss Bauholz für tragende Zwecke der DIN EN 14081-1 [2] entsprechen. Die DIN EN 14081-1 [2] regelt europaweit die



Bild 1. Hölzerne Tragkonstruktion eines Lagergebäudes aus dem 19. Jahrhundert, die Instandsetzung erforderte die Festigkeitssortierung des verbauten Holzes
Fig. 1. Wooden support structure of a warehouse from the 19th century, the redevelopment required the strength grading of the obstructed timber

Anforderungen an die Sortierung sowie die Kennzeichnung von festigkeitssortiertem Bauholz. Diese Anforderungen werden laut DIN 20000-5 [3], Abschnitt 4.2 von den deutschen Sortiervorschriften [4], [5] erfüllt. Konkret heißt es: „DIN 4074-1 und DIN 4074-5 erfüllen die Anforderungen nach DIN EN 14081-1:2016-06, 5.1.2.“ (Bild 1)

Bei der Sortierung wird zwischen der visuellen und der maschinellen Sortierung unterschieden. Eine visuelle Sortierung von Holzbauteilen konzentriert sich auf die visuell erfassbaren wuchsbedingten Eigenschaften – beispielsweise Äste, Jahrringbreite, Faserneigung, Risse – und sortiert das Holz in drei Sortierklassen (Nadelholz: „S“-Klassen; Laubholz: „LS“-Klassen). Hierbei wird in Bauholz mit geringer (S7, LS7), üblicher (S10, LS10) sowie überdurchschnittlicher Tragfähigkeit (S13, LS13) unterschieden. Die Kombination aus visueller Sortierung und apparativen Methoden ermöglicht darüber hinaus die Sortierung in die Klasse S15/LS15. In DIN 4074-1 & -5 [4], [5], Abschnitt 7.2 heißt es konkret: „Nach visuell und apparativ feststellbaren Merkmalen ist über die in Abschnitt 6 festgelegte Sortierung hinaus eine Sortierung in folgende Sortierklasse möglich: – Schnittholz der Klasse S15“. Die Zuordnung der visuellen Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [6] ist in der DIN EN 1912 [7] geregelt und erfolgt nach der Herkunft, der Holzart und der in den einzelnen europäischen Ländern geltenden Sortierklassen.

Bei der maschinellen Festigkeitssortierung von neuem Bauholz ist die Übertragung von Sortier- in Festigkeitsklassen nicht erforderlich. Die heutzutage verfügbare stationäre Anlagentechnik verwendet neben optischen Messverfahren auch zerstörungsfreie Prüfmethode zur Feststellung der Materialeigenschaften. Zum Einsatz kommen dabei Durchbiegungsverfahren, Durchstrahlungsverfahren

Dipl.-Ing. (FH) Gunter Linke

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug

Hochschule für nachhaltige Entwicklung
Alfred-Möller-Straße 1, 16225 Eberswalde

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Brandenburgische Technische Universität
Konrad-Wachsmann-Allee 2, 03046 Cottbus

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

Table 1. Relation between observable/non-destructively measureable strength indicating properties (IP) and destructively measured strength properties (from [8])

Schätzwert der Festigkeit (IP)	Bestimmtheitsmaß (R²)
Jahringbreite	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

(Röntgen-/Kernstrahlung, Mikrowellen) und dynamische Messmethoden wie beispielsweise Eigenfrequenzmessung und Ultraschallverfahren ([8]). Anhand der Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfmethoden ist dann eine direkte Zuordnung zu Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [6] möglich. Eine maschinelle Sortierung darf jedoch nur von Betrieben durchgeführt werden, die über fachkundiges Personal und zertifizierte Anlagentechnik verfügen ([9], [10]). Bei verbautem Holz in historischen Gebäuden können die für neues Bauholz entwickelten Sortiervverfahren nicht oder nur mit großen Einschränkungen angewendet werden. Im Wesentlichen betrifft dies die eingeschränkte Einsehbarkeit der Bauteile, die fehlende Personalqualifizierung sowie das Fehlen im Altbau flexibel handhabbarer und zertifizierter Gerätetechnik ([11]).

Die Praxis zeigt, dass eine Festigkeitssortierung von verbautem Holz gegenwärtig nur selten durchgeführt wird. Aussagen über die Tragfähigkeit werden allenfalls intuitiv getroffen. Statische Berechnungen werden dann meist unter der Annahme von Vollholz der Sortierklasse S10 nach DIN 4074–1 [4] sowie LS10 nach DIN 4074–5 [5] geführt. Dadurch können Tragfähigkeitsreserven (Bauteile und Verbindungen mit höherer Tragfähigkeit) oder Tragfähigkeitsdefizite (Bauteile und Verbindungen mit geringer Tragfähigkeit) nicht erkannt werden. Dies führt unter Umständen zu wenig substanzschonenden und nicht fachgerechten Instandsetzungsmaßnahmen. Weiterhin kann mithilfe von zuverlässigkeitstheoretischen Methoden eine exaktere Bewertung der Standsicherheit und Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen vorgenommen werden. Voraussetzung ist dabei die Festigkeitssortierung des verbauten Holzes mit in situ geeigneten zuverlässigen Methoden ([12]). 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. Zwischen den visuell feststellbaren Sortierkriterien und den Festigkeitseigenschaften von Holz besteht nur eine geringe Korrelation ([8], [13]). Dies führt zu einer geringen Trennschärfe und Leistungsfähigkeit und Aussagefähigkeit. Die Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien/-armen Mess- und Prüfmethoden zur Ermittlung der Materialeigenschaften führt zu einer wesentlichen Verbes-

Tabelle 2. Ausgewählte zerstörungsfreie/-arme Prüfmethoden zur Untersuchung von Holzbauteilen in bestehenden Gebäuden (entnommen aus [14])

Table 2. Selected non-/semidestructive methods for the examination of timber in existing structures (taken from [14])

Kenngroße	Verfahren / Indikatoren	Hinweise	
Rohdichte	Bohrkernproben	za Labor	
	Bohrwiderstandsmessung	za in situ	
	Eindringwiderstandsmessung	za in situ	
	Durchstrahlungsverfahren	zf in situ	
E-Modul	Dynamische Messmethoden (Eigenfrequenzmessung, Ultraschall)	zf in situ	
	Belastungsversuch (EN 380)	z/zf in situ	
Festigkeit	Bohrkernproben – Druckfestigkeit (DIN 52185) – Biegefestigkeit (DIN 52186) – Scherfestigkeit (DIN 52187) – Dynstat (TGL 25106 Blatt 9/ DIN 52189) – Zugfestigkeit (DIN 52188)	za Labor	
Festigkeit	Dynamische Messmethoden (Eigenfrequenzmessung, Ultraschall)	zf in situ	
	Ausbau von Bauteilen – Druckfestigkeit (DIN EN 408) – Biegefestigkeit (DIN EN 408) – Scherfestigkeit (DIN EN 408) – Zugfestigkeit (DIN EN 408)	z Labor	
zf	zerstörungsfrei	in situ	Untersuchung am Objekt
za	zerstörungsarm	Labor	Untersuchung im Labor
z	zerstörend		

serung der Effizienz, wie die in **Tabelle 1** angegebenen, bei der maschinellen Sortierung von neuem Holz ermittelten Bestimmtheitsmaße belegen.

In der Vergangenheit sind zahlreiche derartige zerstörungsfreie/-arme Prüfmethoden zur Untersuchung von Holzbauteilen in Bestandsgebäuden entwickelt, untersucht und erprobt worden ([14]). **Tabelle 2** gibt eine Übersicht über verschiedene Methoden zur Feststellung von Materialkennwerten, die eng mit Festigkeitseigenschaften korrelieren, zum Beispiel die Rohdichte, Elastizitätsmodul oder Druckfestigkeit.

Die labortechnische Untersuchung von entnommenen Proben ermöglicht die exakte Bestimmung der Materialeigenschaften. Hierzu liegen bereits mehrere Untersuchungen vor ([46], [47], [48]). Die Entnahme und labortechnische Untersuchung von Bohrkernen oder ausgebauten Bauteilen ist jedoch nur in den seltensten Fällen möglich, da die Denkmalpflege Eingriffe in die historische Bausubstanz meist nicht gestattet. Neben der sehr zerstörungsarmen Eindringwiderstandsmessung ist eine quantitative Bestimmung der Materialeigenschaften in situ nur mittels dynamischer Messmethoden möglich.

Zu den dynamischen Messmethoden gehören die Eigenfrequenzmessung und das Ultraschallverfahren. Bei der Eigenfrequenzmessung wird das Holzbauteil durch einen Impuls (Schlag oder Stoß) zum Schwingen angeregt. Nach kurzer Zeit stellen sich Biegeschwingungen 1. Ordnung ein. Aus Schwingungsdauer, Bauteilgeometrie und Rohdichte kann der dynamische Elastizitätsmodul errechnet werden ([15]). Bei dem Ultraschallverfahren werden Schallimpulse oberhalb der menschlichen Hörgrenze in das Holzbauteil eingeleitet. Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit

dieses Impulses können die mechanischen Eigenschaften des Bauteils ermittelt werden (u.a. [16], [17], [18]). Beide Methoden gehören heutzutage zum internationalen Stand der Technik und werden bei der Sortierung von Schnittholz im Sägewerk angewendet.

2 Das Ultraschall-Verfahren

2.1 Theoretische Grundlagen

Der Begriff Ultraschall bezeichnet mechanische Wellen oberhalb der menschlichen Hörgrenze ($f > 20\text{ kHz}$). Diese werden in Longitudinalwellen (Schwingung parallel zur Ausbreitungsrichtung) und Transversalwellen (Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) unterteilt. Die Erzeugung erfolgt mithilfe des piezo-elektrischen Effektes. Hierbei werden Quarzkristalle mittels hochfrequenter elektrischer Spannung zum Schwingen angeregt. Die Schwingungen werden als mechanische Schwingungen abgegeben und im Empfänger wieder in elektrische Spannungen umgewandelt. Das Ultraschallverfahren beruht auf der engen Beziehung zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallimpulses sowie Steifigkeit und Rohdichte. In homogenen, isotropen Materialien ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit wie in Gleichung (1) dargestellt.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(1)

mit v Impuls-Ausbreitungsgeschwindigkeit
 E Elastizitätsmodul des Materials
 ρ Dichte des Materials

Die in Gleichung (1) dargestellte Beziehung ist jedoch nur anwendbar, wenn die Wellenlänge geringer ist als die Querschnittsbreite des Prüfkörpers ([17]). Bei der Prüfung von Holzbauteilen ist dies in den meisten Fällen nicht gegeben. Bereits bei einer Frequenz von $f = 20\text{ kHz}$ ergibt sich jedoch eine Wellenlänge von 250 mm . Die Verwendung von niederfrequenten Ultraschallwellen ist jedoch erforderlich, da der inhomogene und anisotrope Werkstoff Holz eine hohe Signaldämpfung aufweist ([16], [17], [19]). Die heutzutage verfügbare Geräte arbeiten mit Frequenzen von $f = 20\text{ kHz} \dots 50\text{ kHz}$.

2.2 Messmethoden

Generell wird in das Impuls-Echo-Verfahren und die Impulslaufzeitmessung unterschieden. Bei dem Impuls-Echo-Verfahren wird der Impuls senkrecht zur Faserrichtung eingeleitet. Der Impuls wird an Grenzflächen (Bauteiloberflächen oder Fehlstellen) reflektiert und von der Sender-/Empfängersonde aufgezeichnet. Sie dient vor allem der Fehlstellen-Erkennung ([17], [20]). Bei der Impulslaufzeitmessung werden zwei separate Sonden (Sender und Empfänger) am Holzbauteil angebracht. Die Zeit, in welcher der Impuls die Strecke zwischen dem Sender und dem Empfänger zurücklegt, wird durch ein Messgerät aufgenommen. Diese Methode eignet sich für die Bestimmung der Materialeigenschaften ([17]). Weitere Unterscheidungen entsprechend der Position der Sonden am Holzbauteil sind in Bild 2 dargestellt. Bild 3 zeigt beispielhaft die Durchführung der direkten und indirekten Messung.

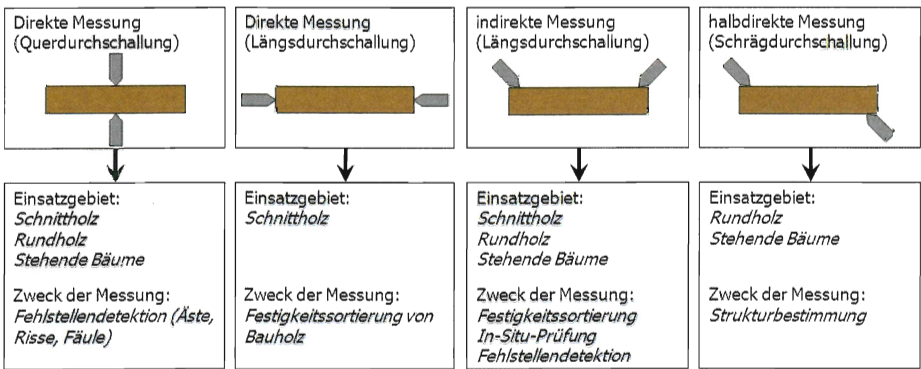


Bild 2. Messmethoden der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (nach [21])
Fig. 2. Methods for the ultrasonic time-of-flight measurement (according to [21])



Bild 3. Durchführung der direkten (oben) und indirekten (unten) Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (1 ... Sender-/Empfängersonde, 2 ... Messgerät)
Fig. 3. Application of the direct (top) and indirect (bottom) ultrasonic time-of-flight measurement (1 ... emitting/receiving probe, 2 ... measuring device)

fänger) am Holzbauteil angebracht. Die Zeit, in welcher der Impuls die Strecke zwischen dem Sender und dem Empfänger zurücklegt, wird durch ein Messgerät aufgenommen. Diese Methode eignet sich für die Bestimmung der Materialeigenschaften ([17]). Weitere Unterscheidungen entsprechend der Position der Sonden am Holzbauteil sind in Bild 2 dargestellt. Bild 3 zeigt beispielhaft die Durchführung der direkten und indirekten Messung.

2.3 Bisherige Untersuchungen an Bauholz

Tabelle 3 enthält eine Übersicht über den bisherigen Stand der Forschung und bezüglich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von Bauholz.

Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass der überwiegende Teil der bisherigen Untersuchungen die Neuholzsortierung beinhaltet. Die Untersuchungen von Kranitz, et al. in [43] und [44] sowie Tichelmann/Grimminger in [28] zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede bei der Festigkeitssortierung von neuem und altem Bauholz bestehen. Das an neuem Holz entwickelte Ultraschallverfahren kann somit für altes Bauholz angewendet werden ([28], [43], [44]). Das ist auch der Grund, warum das Ultraschall-Verfahren in den letzten zehn Jahren vermehrt bei der Festigkeitssortierung im Altbau zum Einsatz kommt ([49]). Erkennbar ist, dass sich das Ultraschall-Verfahren bei zahlreichen einzelnen Objekten bewährt hat. Dabei handelt es sich aber zumeist um objektbezogene Einzeluntersuchungen mit geringem statistischem Umfang. Umfängliche, systematische Untersuchungen fehlen bis dato.

Tabelle 3. Auswertung der Literatur zur Untersuchung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitsortierung von Bauholz
Table 3. Assessment of the literature concerning the ultrasonic time-of-flight measurement for the strength grading of timber

Jahr	Autor(en)	Inhalt	Untersuchungs-gegenstand	Wesentliche Ergebnisse	Quelle
1982	Waubke/ Märkl	•	Fichte (131 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[22]
1988	Waubke	•	Fichte (134 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Korrelationsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[23]
1989	Kessel/San- doz	⌘	Fichte (341 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Bewertung der Optimierung der Sortierung durch Ultraschall	[24]
	Sandoz	•	Fichte (341 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m , f_m & ρ	[25]
1990	Kessel	•	Eiche (10 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[26]
1991	Steiger	•	Fichte (575 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[16]
1993	Sandoz	•	Fichte (73 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Quantifizierung Feuchte-/ Temperatureinfluss	[27]
1993	Tichelmann/ Grimminger	⌘	Fichte (32 Stk.) <i>altes Holz (BH)</i>	Ultraschallsortierung für altes Holz anwendbar	[28]
1995/ 1996	Steiger	•	Fichte <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[29] [30]
1996	Sandoz	•	Fichte (12 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m	[31]
1997	Schob/ Niemz et al.	⌘/•	Radiata Pine (160 Stk.) <i>neues Holz (ff)</i>	Bewertung des Einflusses von Fehl-/Schadstellen	[32]
	Niemz/ Kuzera	⌘/•	Roble/Rauli (60 Stk.) <i>neues Holz (ff)</i>	Bewertung des Einflusses von Fehl-/Schadstellen	[33]
	Steiger	⌘/•	Fichte (53 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Zusammenfassung Stand der Technik Angabe von Klassengrenzen für die Festigkeitssortierung	[34] [35]
1998	Tobisch/ Mittag	⌘	Fichte/Eiche <i>neues Holz (BH)</i>	Bewertung des Einflusses von Ästen und Faulstellen	[36]
1999	Niemz et al.	⌘	Fichte (140 Stk.) <i>neues Holz (ff)</i>	Bewertung des Einflusses von Probengeometrie, Messfrequenz und Fehl-/Schadstellen	[37]
1999	Niemz et al.	⌘	Fichte (120 Stk.) Buche (120 Stk.) <i>neues Holz (ff)</i>	Bewertung des Einflusses des Faserverlaufes	[38]
2002	Niemz et al.	⌘	Fichte (1 Stk.) <i>neues Holz (ff)</i>	Bewertung der Schallschwächung	[39]
2004	Augustin	⌘/•	Fichte (120 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Zusammenfassung Stand der Technik Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[18]
2005	Hanhijärvi et al.	•	Fichte (111 Stk.) Kiefer (108 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Korrelationsbeziehungen zw. Kenngrößen Ultraschall und E_m & f_m	[40]
2008	Hanhijärvi et al.	•	Fichte (921 Stk.) Kiefer (934 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Korrelationsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[41]
2009	Steiger/ Arnold	•	Fichte (696 Stk.) <i>neues Holz (BH)</i>	Regressionsbeziehungen zw. v_{Schall} und E_m & f_m	[42]
2010	Kranitz et al.	•	Fichte (28 Stk.) Eiche (9 Stk.)	Regressionsbeziehungen zw. E_{dyn} und ρ	[43]
			Kiefer (9 Stk.) <i>altes Holz (BH)</i>	Bewertung des Einflusses der Alterung	[44]
⌘ grundlegende Information			BH	Proben in Bauholzdimension	
• detaillierte Informationen			ff	kleine, fehlerfreie Proben	

Untersuchungen zu wesentlichen Einflussfaktoren

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses wird nach [17] von folgenden Faktoren maßgeblich beeinflusst:

- Art der Ankopplung und des Kopplungsmittels,
- Ausbreitungsrichtung der Wellen (quer/schräg/längs zur Faserichtung), Geometrie des Prüfkörpers,
- Materialart und -qualität, struktureller Aufbau,
- Dichte und Elastizität,
- Holzfeuchtigkeit und Temperatur.

Die Art der Ankopplung sowie die Notwendigkeit eines Kopplungsmittels spielt bei den heutzutage verwendeten konusförmigen Ultraschall-Sonden keine Rolle ([18]). Die Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwellen und der Einfluss des Faserwinkels wurde von Niemz/et al. in [38] an kleinen, fehlerfreien Proben untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich, dass ein enger Zusammenhang zwischen dem Winkel zwischen Faser- und Ausbreitungsrichtung und der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht ($r = 0,995$). Bereits bei einem Winkel von 15° ergeben um 15 % ... 30 % reduzierte Schallgeschwindigkeiten (Bild 4). In der Praxis werden die Sonden bei der indirekten Messmethode (Bild 2 und Bild 3) in einem Winkel von 30° angesetzt. Die wesentliche Voraussetzung für zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse ist dabei die Einhaltung dieses Winkels bei Mehrfachmessungen. Die Holzfeuchte und Temperatur besitzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften und damit auch auf die Impuls- Ausbreitungsgeschwindigkeit. Grundlegende Untersuchungen hierzu sind von Sandoz in [27] geführt worden. Es konnte ein negativer Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit und Holzfeuchtigkeit sowie Temperatur festgestellt werden (Bild 5). Aus den Ergebnissen der Laborversuche konnten nachfolgende Korrekturgleichungen abgeleitet werden (Gleichung (2), Gleichung (3), Gleichung (4) und [27], [31]): Korrekturformeln zur Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit:

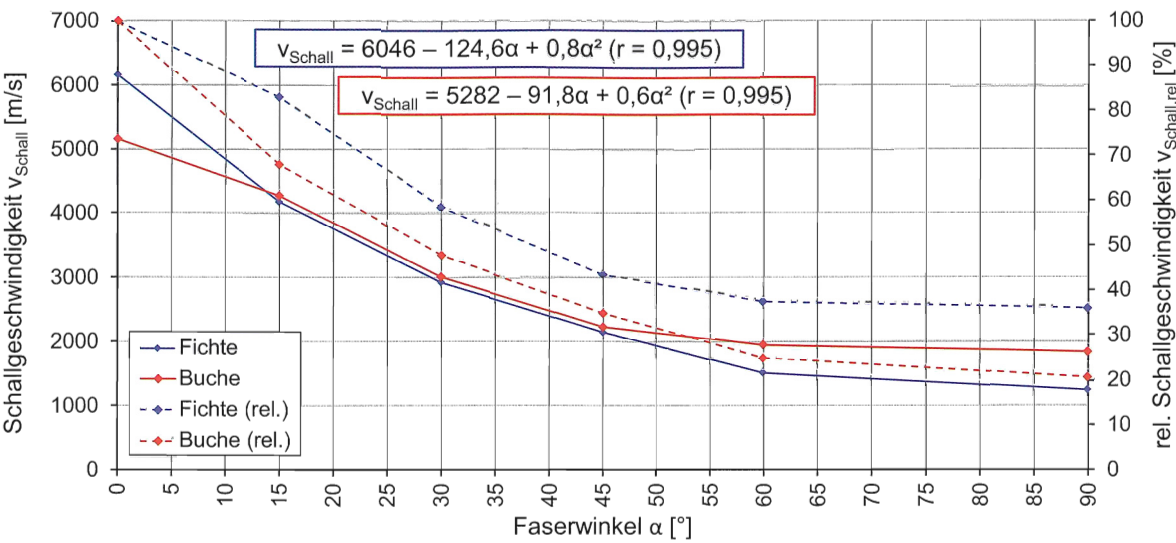


Bild 4. Einfluss des Winkels zwischen Faser- und Ausbreitungsrichtung auf die Schallgeschwindigkeit von Fichten- und Buchenholz (nach [38])
Fig. 4. Influence of the angle between fiber direction and direction of propagation on the ultrasonic velocity of spruce and beech (according to [38])

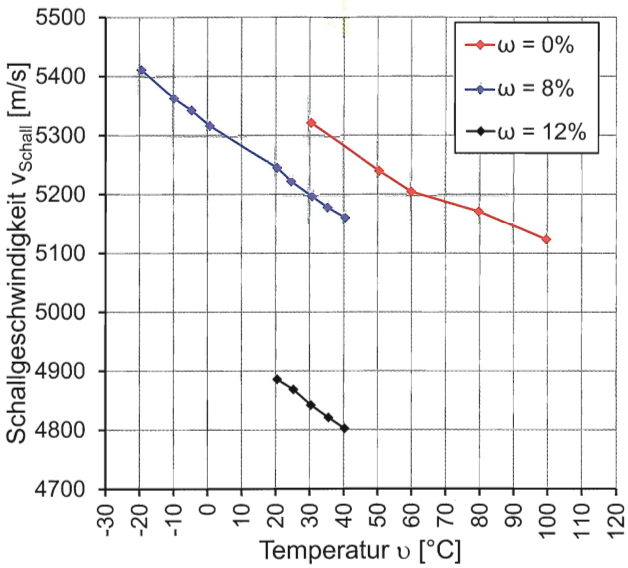
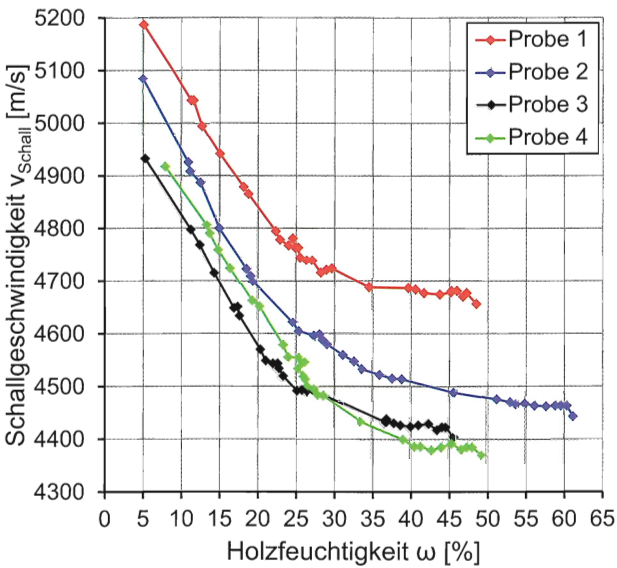


Bild 5. Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit von Fichtenholz (nach [27])
Fig. 5. Influence of the moisture content and the temperature on the ultrasonic velocity of spruce (according to [27])

$$v_{12} = v_{\omega} + 29 \cdot (\omega - 12) \quad (\text{für } \omega \leq 32 \%) \quad (2)$$

$$v_{12} = 580 + v_{\omega} + 4 \cdot (\omega - 32) \quad (\text{für } \omega > 32 \%) \quad (3)$$

mit v_{12} Ausbreitungsgeschwindigkeit bei $\omega = 12 \%$
 v_{ω} Ausbreitungsgeschwindigkeit bei $\omega \neq 12 \%$
 ω Holzfeuchtigkeit

Korrekturformel zur Berücksichtigung der Temperatur:

$$v_{20} = v_v / [1 - 0,0008 \cdot (v - 20)] \quad (\text{für } \omega = 12 \%) \quad (3)$$

mit v_{20} Ausbreitungsgeschwindigkeit bei $v = 20^{\circ}\text{C}$
 v_v Ausbreitungsgeschwindigkeit bei $v \neq 20^{\circ}\text{C}$;
 v Temperatur

Untersuchungen zur Fehlstellenerkennung

Die Anwendbarkeit des Ultraschall-Impulslaufzeitmessung zur Erkennung von Fehlstellen (d.h. Äste, Innenfäule und Querschnittsschwächungen) ist in mehreren Studien untersucht worden ([32], [33], [36]). Tendenziell ist eine messba-

re Reduzierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Größe der Fehlstelle zu verzeichnen. Jedoch werden Fehlstellen mit geringer Ausprägung nicht zuverlässig erkannt. Diese Ergebnisse belegen, dass die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Erkennung von Fehlstellen nicht geeignet ist. Wird zusätzlich eine sorgfältige handnahe Inaugenscheinnahme hinsichtlich äußerlich erkennbarer Fehlstellen durchgeführt, kann dieses Defizit ausgeglichen werden. Bei Verdacht auf von außen nicht erkennbare Fehlstellen (bspw. Innenfäule) sollten weitere apparative Methoden – beispielsweise Bohrwiderstandsmessungen – zum Einsatz kommen.

Untersuchungen zur Festigkeitssortierung

Erste grundlegende Untersuchungen zur Beziehung zwischen der Schallgeschwindigkeit und den für die Festigkeitssortierung relevanten Materialkennwerten Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul an Prüfkörpern in Bauteildimension sind zu Beginn der 1980er-Jahre ge-

Tabelle 4. Beziehungen zwischen Schallgeschwindigkeit, Rohdichte, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul nach ausgewählter Literatur für Fichten-/Kiefernholz

Table 4. Relations between ultrasonic velocity and density, bending strength & modulus of elasticity according to selected literature for pine and spruce

Jahr	Autor	Rohdichte ρ	Biegefestigkeit f _m	stat. Biege-E-Modul E _m
1982	Waubke / Märkl [22]	/	$0,9 \cdot 10^{-6} v^2 + 5,567$; $r = 0,586$	$3,5 \cdot 10^{-3} v^2 - 456$; $r = 0,768$
1989	Sandoz [25]	$-(658 \cdot 10^3 / (464 \cdot 10^1 - v^2 \cdot 10^{-4}))$; $r = 0,43$	$((v - 3\,630) / 275)^2$; $r = 0,68$	$290 \cdot 10^{-2} \cdot (v^2 \cdot 10^{-4} - 995 \cdot 10^{-7})^{-1}$; $r = 0,82$
1991	Steiger [16]	/	$0,02 \cdot v - 82$; $r = 0,633$	$5,43 \cdot v - 17\,250$; $r = 0,677$
1995/1996	Steiger [29], [30]	/	$0,021 \cdot v_{\min} - 77,3$; $r = 0,60$	$6,156 \cdot v_{\text{mean}} - 22\,984$; $r = 0,75$
1996	Sandoz [31]	/	/	$4,896 \cdot v - 14\,660$; $r = 0,95$
2004	Augustin [18]	/	$0,06 \cdot v_{\min} - 304,96$; $r = 0,687$	$11,93 \cdot v_{\text{mean}} - 56\,491,65$; $r = 0,84$
2008	Hanhijärvi et al. [41]	$r = 0,37$ (Fichte) $r = 0,59$ (Kiefer)	$r = 0,67$ (Fichte) $r = 0,76$ (Kiefer)	$r = 0,73$ (Fichte) $r = 0,81$ (Kiefer)

Tabelle 5. Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung von Nadel-Schnittholz zu den Festigkeitsklassen nach EN 338 nach [34], [35]

Table 5. Limit values of the ultrasonic velocity for the classification of coniferous wood to the classes in EN 338 according to [34], [35]

Bauholzqualität	Festigkeitsklasse nach EN 338	Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit bei ω = 12 % [m/s]
hochwertiges Bauholz	C 40	$5\,900 \leq v$
hochwertiges Bauholz	C 35	$5\,750 \leq v < 5\,900$
normales Bauholz	C 27	$5\,500 \leq v < 5\,750$
minderwertiges Bauholz	C 22	$5\,250 \leq v < 5\,500$
minderwertiges Bauholz	C 18	$5\,100 \leq v < 5\,250$
nicht als Bauholz verwendbar	/	$v < 5\,100$

führt worden (Waubke/Märkl in [22], [23]). Weitere wesentliche Untersuchungen folgten in den darauffolgenden Jahrzehnten durch Sandoz [24], [25], [26], [31], Steiger [16], [29], [30], [34], [35], [42], Augustin [18] und Hanhijärvi [40], [41] (Tabelle 3). Gegenstand der Untersuchungen waren hauptsächlich Prüfkörper aus neuem Fichten-/Kiefernholz. Die aus den Untersuchungsergebnissen resultierenden Korre-

lations- und Regressionsbeziehungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Aus Tabelle 4 geht hervor, dass die Ultraschallgeschwindigkeit und die Rohdichte mit $r = 0,37 \dots 0,59$ gut miteinander korrelieren. Die Beziehungen zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit sowie dem Biege-Elastizitätsmodul sind mit $r = 0,58 \dots 0,76$ und $r = 0,67 \dots 0,95$ deutlich stärker ausgeprägt (Bild 6).

Die in Bild 6 dargestellten Regressionsbeziehungen zeigen eine klare Proportionalität zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit sowie dem statischen Biege-Elastizitätsmodul. Ausgehend von den festgestellten Regressionsbeziehungen leitete Steiger 1997 [34], [35] aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen Grenzwerte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung von Schnittholz zu den Festigkeitsklassen nach EN 338 ab (Tabelle 5).

werte der Ultraschallgeschwindigkeit für die Zuordnung von Schnittholz zu den Festigkeitsklassen nach EN 338 ab (Tabelle 5).

3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen haben dazu geführt, dass das Ultraschall-Verfahren in mehreren europäischen Ländern (u.a. Schweiz, Österreich) bereits zum allgemein anerkannten Stand der Technik bei der Festigkeitssortierung von Neuholz gehört. In Deutschland ist dies momentan nicht der Fall.

Die Ursache hierfür liegt in einer Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung von 1993 [45] begründet. Demnach seien die vorliegenden Untersuchungsergebnisse nur auf die zum Zeitpunkt der Untersuchung vorhandenen Rahmenbedingungen anwendbar. Eine Extrapolation sei nicht möglich. Die Verwendung des „Ultraschall-Verfahrens zur Festigkeitssortierung von Schnitt- und Rundholz ist somit in Deutschland derzeit ohne Zustimmung der Bauaufsicht im Einzelfall nicht möglich“ [45]. Unter definierten Rahmenbedingungen und separater Erfassung von Fehl-

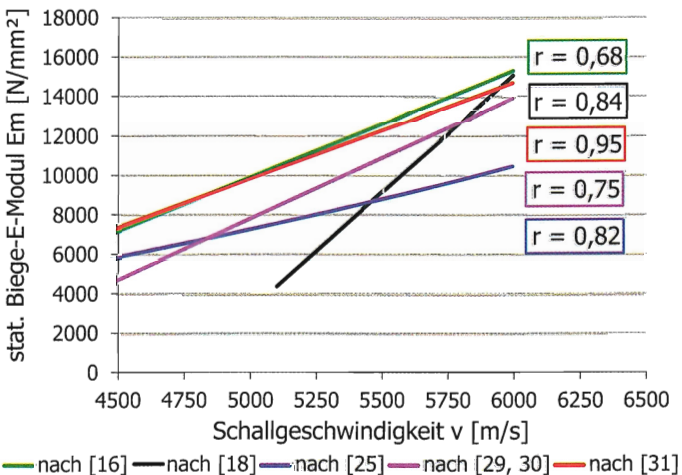
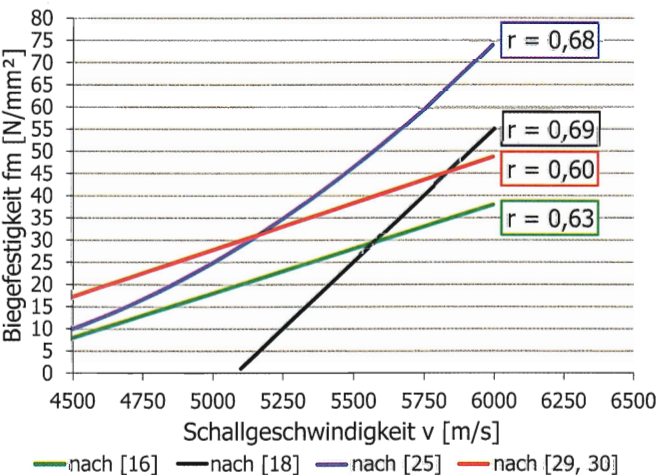


Bild 6. Regressionsbeziehungen für Fichten-/Kiefernholz zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Biegefestigkeit (links) & dem statischen Biege-Elastizitätsmodul (rechts) nach ausgewählten Literaturangaben

Fig. 6. Regression relations for pine and spruce between ultrasonic velocity and bending strength (left) & modulus of elasticity (right) according to selected literature

stellen wird sie nach [45] durchaus „als Ergänzung zur visuellen Sortierung für sinnvoll erachtet“. Hierzu seien jedoch umfangreiche Untersuchungen zur Absteckung der Rahmenbedingungen erforderlich.

Mehrere Untersuchungen bestätigen hingegen die Praxisrelevanz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Festigkeitssortierung von neuem Bauholz aus Nadelholz. Weiterhin konnten wesentliche Rahmenbedingungen (bspw. Temperatur-/Holzfeuchteinfluss, Grenzen der Fehlstellenerkennung) auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse aufgezeigt und versuchstechnisch abgesichert werden. Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung kann, wie der analysierte Entwicklungsstand zeigt, als apparative Unterstützung zur Festigkeitssortierung von neuem Nadel-schnittholz verwendet werden.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Ultraschall-Impuls-laufzeitmessung bei der Festigkeitssortierung von verbaumtem Holz liegen jedoch nur wenige systematische Untersuchungen vor (Tabelle 3). Es bleibt daher aus Sicht der Verfasser zu klären, ob wesentliche Unterschiede bei der Ermittlung der Materialeigenschaften von verbaumtem Holz mit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung bestehen. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser zerstörungsfreien Prüfmethode ausreicht, um die hierüber ermittelten Materialkennwerte einer zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung zur aktuellen Tragfähigkeit bestehender Holzkonstruktionen zugrunde zu legen.

Dazu sind umfangreiche und systematische Untersuchungen an neuem und altem Bauholz erforderlich.

Literatur

- [1] DIN EN 1995–1–1:2010 – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1–1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [2] DIN EN 14081–1:2011 – Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [3] DIN 20000–5:2016 – Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 5: Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt
- [4] DIN 4074–1:2012 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadel-schnittholz
- [5] DIN 4074–5:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz
- [6] DIN EN 338:2010 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [7] DIN EN 1912:2013 – Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten
- [8] Sandomeer M. K.; Steiger R.: Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz. In: Institut für Holzbau, Hochschule Biberach (Hrsg.): Zukunft Holz – Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential. Institut für Holzbau, Biberach, 2009, S. 361–370.
- [9] DIN 4074–3:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnittholz; Anforderungen und Prüfungen
- [10] DIN 4074–4:2008 – Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 4: Nachweis der Eignung zur apparativ unterstützten Schnittholz-sortierung
- [11] Lißner K.; Rug W.: Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweissführung 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.
- [12] Loebjinski M.; Rug W.; Pasternak H.: Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand. In: Bauingenieur 92 (2017), Heft 2, S. 65–73.
- [13] Glos P.: Holz im technischen Einsatz, Perspektiven der Sortierung und Qualitätssicherung. Internationales Holzbauforum, Garmisch-Partenkirchen, 1995.
- [14] Lißner K.; Rug W.: Holzbausanierung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York., 2017 [in Vorbereitung].
- [15] Görlacher R.: Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), Heft 6, 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.
- [18] Augustin M.: Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz. Graz, TU Graz, Lehrstuhl für Holzbau, Diplomarbeit, 2004.
- [19] Niernz P.: Schallausbreitung in Holz und Holzwerkstoffen. In: Holz-Zentralblatt Nr. 102 (2003), S. 1470–1471.
- [20] Frühwald K.; Hasenstab A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Laubholz in Holzbauprodukten und im eingebauten Zustand. Fachtagung Bauwerksdiagnose, Berlin, 2010.
- [21] Kessel M. H.: Festigkeitsuntersuchung von Eichenbalken. In: Bauen mit Holz (1990), Heft 3, S. 174–180.
- [22] Waubke N. V.; Märkl J.: Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Teil 1: Vorversuche mit Kanthölzern. In: Holz als Roh- und Werkstoff 40 (1982), S. 189–192.
- [23] Waubke N.: Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. Einflüsse anwendungsbezogener Parameter. In: Bauen mit Holz 3 (1988), S. 152–154.
- [24] Kessel M. H.; Sandoz J. L.: Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz – Einfluss der Klassengrenzen der Sortierparameter. In: Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989), Heft 8, S. 323–327.
- [25] Sandoz J.-L.: Grading of construction timber by ultrasound. In: Wood Science and Technology, Vol. 23 (1989), Iss. 1, pp. 95–108.
- [26] Kessel M. H.: Festigkeitsuntersuchung von Eichenbalken. In: Bauen mit Holz (1990), S. 174–180.
- [27] Sandoz J.-L.: Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. In: Wood Science and Technology, Vol. 27 (1993), Iss. 5, pp. 373–380.
- [28] Tichelmann K.; Grimminger U.: Zerstörungsfreie Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Konstruktionsholz durch Ultraschall-Laufzeitmessung. In: Bautechnik 70 (1993), Heft 4, S. 218–228.
- [29] Steiger R.: Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktion. IBK-Bericht Nr. 209; Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995.

- [30] 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.
- [31] Sandoz J.-L.: Ultrasonic Solid Wood Evaluation in Industrial Application; In: 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, 1996.
- [32] Schob, M.; Niemz P.; Kucera L. J.; Baradit E.: Einfluss von Holzfehlergröße und Messanordnung auf die Schallgeschwindigkeit in Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997), S. 235–236.
- [33] Niemz P.; Kucera L. J.: Einfluss künstlich erzeugter Defekte und natürlicher Holzfehler auf die Schallausbreitungsgeschwindigkeit. In: Holz-Zentralblatt Nr. 50 (1997), S. 796.
- [34] Steiger R.: Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichtenholz; Holzforschung und Holzverwertung 5 (1997), S. 83–90
- [35] Steiger R.: Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall. In: Holz-Forschung, Holz-Verwertung (1997), S. 28–35.
- [36] Tobisch S.; Mittag C.: Zerstörungsfreie Untersuchungen von Schadphänomenen an Bauholz (1) – Einfluss simulierter Schadstellen auf die Kenngrößen der Ultraschall- und Bohrwiderstandsmessung. In: Holz-Zentralblatt Nr. 16 (1998), S. 236–238.
- [37] Niemz P.; Kucera L. J.; Schob M.; Scheffler M.: Experimentelle Untersuchungen zur Erkennung von Defekten in Holz mittels Ultraschall. In: Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999), Heft 2, S. 96–102.
- [38] Niemz P.; Kucera L. J.; Bernatowicz G.: Untersuchungen zum Einfluss des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 57, Heft 3, (1999), S. 225.
- [39] Niemz P.; Kucera L. J.; Haller P.; Koban M.: Experimentelle Untersuchungen zur Schallausbreitung in Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002), S. 46–47.
- [40] Hanhijärvi A.; Ranta-Maunus A.; Turk G.: Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project – phase 1; VTT Publications (2005), Espoo (FIN).
- [41] Hanhijärvi A.; Ranta-Maunus A.: Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project – phase 2; VTT Publications (2008), Espoo (FIN).
- [42] Steiger R.; Arnold M.: Strength grading of Norway Spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. In: Wood Science and Technology 43 (2009), pp. 259–278.
- [43] Kranitz K.; Deublein M.; Niemz P.: Strength estimation of aged wood by means of ultrasonic devices; The Future of Quality Control for Wood & Wood Products, The Final Conference of COST Action E53; Edinburgh, 2010.
- [44] Kranitz K.; Niemz P.: Untersuchungen zu Eigenschaften von gealtertem Holz; Forschungskolloquium Holzbau Forschung + Praxis, Stuttgart, 2010.
- [45] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Möglichkeiten und Grenzen der Holzsortierung mittels Ultraschall. In: Holz-Zentralblatt Nr. 92/93.
- [46] Rug W.; Seemann A.: Festigkeit von Altholz. In: Holztechnologie 29 (1988), Heft 4, S. 186–190.
- [47] Rug W.; Seemann A.: Ermittlung von Festigkeitswerten an alten Holzkonstruktionen. In: Holztechnologie 30 (1989), Heft 2, S. 69–73.
- [48] Rug W.; Seemann A.: Strength of old timber; CIB-Conference, Paris, 1989.
- [49] COST Action fp1101: Combined use of NDT/SDT methods for the assessment of structural timber members – State of the Art Report, 2015.

Impressum

Bauingenieur

ISSN 0005-6650
92. Jahrgang 2017

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger (Sprecher)
Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
Tel. 02 41 / 80 25 170
Fax 02 41 / 80 22 335
jhegger@imb.rwth-aachen.de

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam
Institut für Geotechnik, TU Wien
Karlsplatz 13/220–2, 1040 Wien, Österreich
Tel. 00 43 1 58801 / 22100
Mobil 00 43 664 2033381
Fax 00 43 1 58801 / 22199
dietmar.adam@tuwien.ac.at

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheeno
Institut für Technologie und Management
im Baubetrieb
Karlsruher Institut für Technologie
Geb. 50.31, Am Fasanengarten, 76131 Karlsruhe
Tel. 07 21 608 42646
Fax 07 21 695 245
shervin.haghsheeno@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
Brandenburgische Universität (BTU)
Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus
Tel. 03 55 / 69 21 07
Fax 03 55 / 69 21 44
hartmut.pasternak@b-tu.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers
Institut für Kontinuumsmechanik
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 11, 30167 Hannover
Tel. 05 11 / 7 62-32 20
wriggers@ikm.uni-hannover.de

Alle Hauptaufsätze sind durch die
Herausgeber begutachtet und rezensiert.

Korrespondierende Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. J.-D. Wörner
Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. techn. Dr.-Ing. e. h. M. Wicke
Universität Innsbruck

Prof. Dr.-Ing. J. C. Walraven
Delft University of Technology

Dr.-Ing. D. Bühler
Deutsches Museum München

**verantwortlich für
Hauptaufsätze:**
Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Produkte & Projekte:
Heike Weßel, Redaktion
Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
Tel. 02 11 / 61 03-484
Fax 02 11 / 61 03-148
wessel@springer-vdi-verlag.de

**Der Bauingenieur ist
offizielle Organzeitschrift des
VDI-Fachbereichs Bautechnik.**

Hinweise für Autoren und Veröffentlichungs-
grundlagen finden Sie im Internet unter
www.bauingenieur.de
(Auswahl: Hinweise für Autoren).

Verlag

Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf
Commerzbank AG, BLZ 300 800 00,
Kontonummer: 02 121 724 00
SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300,
IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00

Geschäftsführung
Christian W. Scheyko

Layout
Alexander Reiß

Druck
KLIEMO printing, Hütte 53, 4700 Eupen, Belgien

Copyright
**Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge
und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.**

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des
Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des
Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbeson-
dere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikro-
verfilmungen und die Einspeicherung und
Verarbeitung in elektronischen Systemen. Für unver-
langt eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr
übernommen werden.

Vertrieb und Leserservice
Tel. 02 11 / 61 03-140
Fax 02 11 / 61 03-414
vertrieb@springer-vdi-verlag.de

Vertriebsleitung
Christian W. Scheyko

Bezugspreis
11 Ausgaben (davon 7/8 als Doppelheft)
Jahresabonnement: € 395,-
VDI-Mitglieder: € 355,50
VDI-Bau-Mitglieder: € 197,50

Studenten: € 99,- (gegen Studienbescheinigung)
Preise Inland inkl. MwSt., Ausland exkl. MwSt.
zzgl. Versandkosten (Inland: € 14,-,
Ausland: € 34,-, Luftpost auf Anfrage)
Einzelheft: € 43,- inkl. MwSt. zzgl.
Versandkosten
Der Bezugszeitraum beträgt mindestens ein Jahr.
Das Abonnement verlängert sich um ein weiteres
Jahr, wenn es nicht 6 Wochen vor Ablauf des be-
rechneten Bezugszeitraumes schriftlich gekündigt
wird.



Anzeigenleitung
Christian W. Scheyko
Tel. 0211 / 6103-222
Fax 0211 / 6103-113
scheyko@springer-vdi-verlag.de

Anzeigenverkauf
Verlagsbüro Sven Pachinger
Tel. 0521 / 977 998-80
Fax 0521 / 977 998-90
E-Mail: sven.pachinger@
verlagsbuero-pachinger.de

Es gilt der Anzeigentarif Nr. 50
vom 1. Januar 2017.

Auslandsvertretungen

Österreich
Publicitas GmbH
Leondingerstraße 27, 4020 Linz, Österreich
Tel. 00 43 / 7 32 / 66 88 76
Fax 00 43 / 7 32 / 61 27 83

Weitere Informationen unter
www.bauingenieur.de