

Zerstörungsfreie Prüfung von Laubholz in Holzbauprodukten und im eingebauten Zustand

Katja FRÜHWALD, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
Andreas HASENSTAB, Augsburg

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Prüfung der Festigkeit und Steifigkeit von Laubschnittholz wurde anhand der Ultraschalllaufzeit von Longitudinalwellen in Transmission axial zur Faser sowie anhand der Eigenfrequenz aus Längsschwingung untersucht. Eine brauchbare Vorhersage der elastischen Eigenschaften des Holzes ist insbesondere bei Messungen an trockenem Holz mit einheitlicher Holzfeuchte möglich. Eine Abschätzung der Festigkeit mittels alleiniger Prüfung der Schallgeschwindigkeit bzw. Eigenfrequenz in Längsrichtung ist nicht möglich, da die für die Festigkeit entscheidenden Äste nicht erkannt werden. Dagegen können mit niederfrequenter Ultraschallechotechnik Strukturmerkmale wie Äste und Schäden wie Fäulnis sowohl bei Nadelhölzern als auch bei einheimischen und tropischen Laubhölzern detektiert werden.

1. Einführung

Der Einsatz von Laubholz im Bauwesen steht immer noch am Anfang, obwohl Laubhölzer, v. a. Buchenholz,

- in großen Mengen zur Verfügung stehen,
- bessere elastomechanische Eigenschaften als die einheimischen Nadelhölzer aufweisen (d. h. Querschnitte mit geringeren Abmessungen und entsprechend filigranere Konstruktionen möglich sind),
- eine höhere Rohdichte besitzen (d. h. Querschnitte mit geringeren Abmessungen im Anschlussbereich möglich sind),
- häufig über eine höhere Dauerhaftigkeit verfügen (z. B. Eiche, Edelkastanie, Robinie sowie Tropenhölzer) und
- eine entsprechende Optik aufweisen.

Gründe für den geringen Einsatz von Laubholz im Bauwesen sind einerseits die bislang für Laubholz fehlenden sinnvollen Berechnungsgrundlagen in der deutschen Holzbaunorm, die mangelnde Erfahrung zur Qualität und Herstellung von Holzbauprodukten aus Laubholz und daher ihre fehlende Verfügbarkeit sowie das Gewohnheitsverhalten aller Beteiligten. Dabei ist die Idee, Laubholz im Baubereich lastabtragend einzusetzen, nicht neu: Bis zu Beginn des 19. Jh. wurde in den Regionen Deutschlands, in denen Laubwälder vorherrschen, Laubholz standardmäßig im Bauwesen eingesetzt (z. B. Eichenfachwerk, Dachstühle aus Laubholz bis ca. 1830).

In neuerer Zeit wurden neben der Forschung insbesondere zu Brettschichtholz aus Buche [7, 3] einige praktische Erfahrungen mit Laubholz in der Schweiz gesammelt, wo erste Pi-

lot- und Demonstrationsobjekte aus Laubholz-Brettschichtholz bereits vor 25 Jahren ausgeführt wurden. Beispiele für verleimte Buche sind z. B. die

- Seeparkhalle Arbon, CH (1984)

Die Seeparkhalle (Abbildung 1) mit einer Grundfläche von 27 m x 45 m dient als Mehrzweckhalle. Tragstruktur ist ein Raumbachwerk (mit einer Höhe von 2,5 m), das durch eine fachwerkartige Verstärkung aus Stahl in zwei Tragfelder (27 m x 30 m und 27 m x 15 m) unterteilt wird. Das Stabtragwerk besteht aus 266 gusseisernen Kugeln als Knoten und 1057 Stabelementen aus Brettschichtholz (Querschnitt 110 mm x 110 mm bis 180 mm x 180 mm; Länge ca. 3 m). $\frac{1}{4}$ der Brettschichtholzstäbe (die hoch beanspruchten mittleren Gurte und Randdiagonalen) sind aus Buche aufgrund der höheren Festigkeit des Holzes und der damit verbundenen höheren Leistung der Anschlüsse. Als Grundlage zur Bemessung dienten Einzelversuche am Strukturmodell und 1:1 Versuche der Anschlusssteile.



Abbildung 1: Seeparkhalle in Arbon, CH (1984) [Fotos von A. Bernasconi]

- Dörflibrücke in Eggiwil, CH (1985)

Die Dörflibrücke (Abbildung 2) ist eine zweispurige Straßenbrücke ohne Lastbeschränkung mit einer Bogenspannweite von ca. 30 m und einer Fahrbahnbreite von ca. 7 m. Der Zweigelenbogen mit Zugband besteht aus Fichten-Brettschichtholz, die voll verleimte, quer vorgespannte Fahrbahnplatte aus Tannen-Brettschichtholz. Da geringe Querschnitte erwünscht waren, wurde für die hoch beanspruchten Querträger und Hänger Brettschichtholz aus Buche eingesetzt (mit Resorcin-Formaldehyd-Harz (RF) verklebt); die Bemessung erfolgte dabei aufgrund von Prüfergebnissen. Der Querträger (Querschnitt: 2 x 700 mm x 200 mm) unterliegt einer sehr hohen Schub- und hohen Biegebeanspruchung, die Auflagerkräfte werden auf Querdruck eingeleitet. Die Hänger (Querschnitt: 160 mm x 160 mm) unterliegen einer hohen Last. Da die Buche nicht dauerhaft gegen holzerstörende Pilze, aber gut tränkbar ist, erfolgte nach der Verleimung am fertigen Element eine Imprägnierung mit Teeröl. Insgesamt waren Herstellung und Verleimung der Buchen-Brettschichtholzträger jedoch – auch aufgrund fehlender Erfahrung – sehr aufwändig.



Abbildung 2: Dörflibrücke in Eggiwil, CH (1985) [Fotos von A. Bernasconi]

Die vorhandene Erfahrungen mit Laubholz im Bauwesen basieren auf Einzelobjekten, die als Sonderlösungen aufgrund spezieller Anforderungen entstanden sind. Da kaum Bemess-

sungsgrundlagen vorhanden waren, war die Bemessung eher Aufgabe der Forschung und erfolgte aufgrund von Einzelversuchen im 1:1 Maßstab.

Holz als natürlich gewachsener Rohstoff weist erhebliche Streuungen in seinen Materialeigenschaften auf. Verursacht werden sie durch eine Vielzahl von Strukturmerkmalen und anderen Einflussgrößen, die selbst starke Streuungen und zudem komplexen Wechselwirkungen untereinander aufweisen. Fast die gesamte Literatur beschränkt sich wegen der überwiegenden Verwendung im Baubereich auf Nadelholz (Fichte / Tanne / Kiefer / Lärche), eine direkte Übertragung auf Laubholz ist jedoch wegen des grundsätzlich anderen Holzaufbaues im Allgemeinen nicht möglich. Aufgrund der völlig unterschiedlichen anatomischen Struktur von Nadel- und Laubhölzern sind die die Festigkeit und Steifigkeit beeinflussende Strukturmerkmale völlig andere.

Der Holzkörper besteht aus Zellen unterschiedlicher Art bzw. Funktion, Größe, Form, Anzahl und Verteilung. Entsprechend den drei Hauptfunktionen des Holzes – mechanische Festigung, Wasserleitung und Stoffspeicherung – werden drei Haupt-Gewebearten unterschieden: Festigungs-, Leit- und Speichergewebe. Hinzu kommen ggf. noch die Nebengewebe: Exkretgewebe (die Harzkanäle umgeben) und Sondergewebe (z. B. Wundholz, Reaktionsholz). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Holzgewebetypen mit den darin vorkommenden Zelltypen bei Nadel- und Laubholz.

Tabelle 1: Holzgewebe und ihre darin vorkommenden Holzzellen differenziert nach Nadel- und Laubholz

Gewebetyp	Nadelholz	Laubholz
Leitgewebe	Frühholztracheiden (<i>dünnwandig</i>)	Gefäße (= Tracheen)
Speichergewebe	Parenchymzellen	Parenchymzellen
Festigungsgewebe	Spätholztracheiden (<i>dickwandig</i>)	(Holz-)Fasern (Librifasern bzw. Fasertracheiden)
Exkretgewebe	Epithelzellen	Epithelzellen
Sondergewebe am Beispiel Reaktionsholz	Druckholztracheiden	Zugholzfasern

Der Hauptanteil der Holzzellen verläuft parallel zur Stammachse bzw. in „Faserrichtung“. Zu diesen achsenparallel orientierten Zellen liegen rechtwinklig, d. h. im stehenden Stamm waagrecht und radial orientierte, als Holzstrahlen bezeichnete Zellbänder. Sie sind i. d. R. rein bzw. überwiegend parenchymatisch und gewährleisten die radialen Transport- und Speicherungsmechanismen.

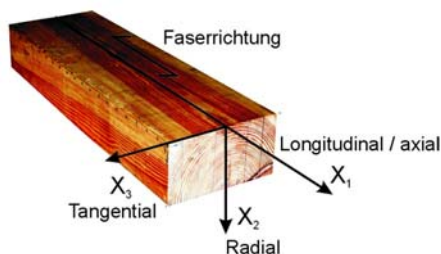


Abbildung 3: Anatomische Haupttrichtungen von Holz

Die entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubholzarten haben gegenüber den Nadelholzarten, die mit nur zwei Zelltypen – den Tracheiden und den Parenchymzellen – einen verhältnismäßig einfachen und regelmäßigen Holzaufbau haben, einen komplizierteren Holzaufbau. So kommen im Laubholz zur spezifischeren Funktionsanpassung neben Tracheiden

und Parenchymzellen weitere Zellelemente und Gewebe hinzu, wie z. B. die Gefäße und Libriformfasern (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 4).

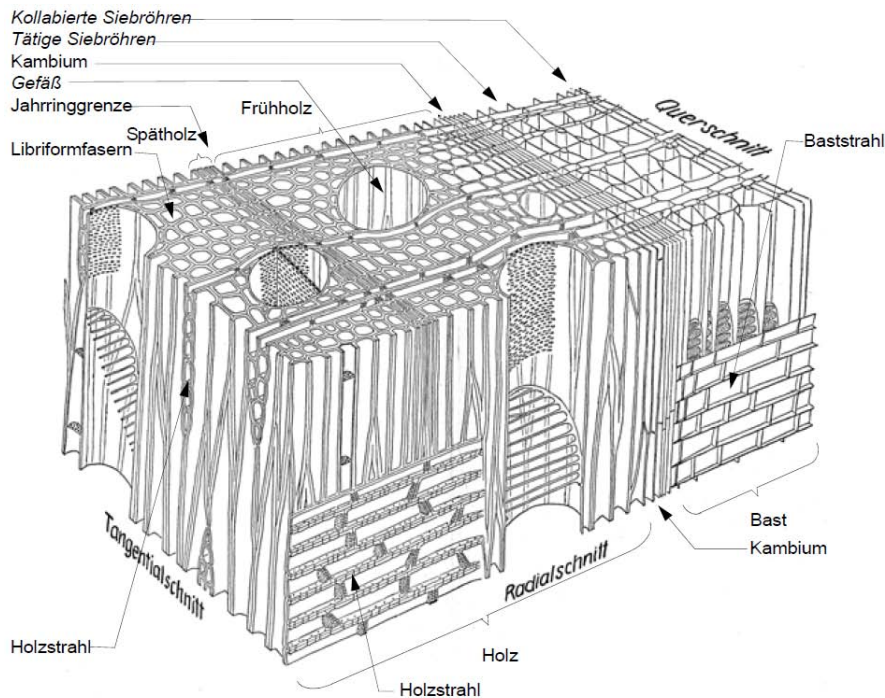


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast der Birke in dreidimensionaler Darstellung [nach Mägdefrau (1951)]

Die charakteristischen Eigenschaften von Laubholz in Bauteilgröße werden insbesondere von der Größe und Lage der Äste bzw. darum sich befindlicher lokaler Faserabweichungen sowie – wichtig v. a. für Holz im eingebauten Zustand – von Fäule und ggf. ausgeprägten Rissen beeinflusst [8, 9, 20]. Im Unterschied zu den Nadelhölzern zeigen jedoch bei den meisten Laubholzarten die Äste geringe farbliche Unterschiede und einen oft unscharfen Übergang der Astfläche zum umgebenden Holz, was die Asterkennung bei der Aufnahme der Äste (insbesondere bei sägerauen Oberflächen) erheblich erschwert und größere Sorgfalt sowie Erfahrung als bei Nadelholz erfordert. Die bei den Nadelhölzern relativ stark beeinflussende Rohdichte spielt bei Laubhölzern keine (bei zerstreutporigen Laubhölzern wie z. B. Buche, Pappel) bis eine sehr geringe (bei ringporigen Laubhölzern wie z. B. Eiche, Esche, Robinie) Rolle.

In der Praxis ist es daher sowohl bei der Festigkeitssortierung von Bauholz als auch bei der Begutachtungen von Holz im eingebauten Zustand wichtig, diese Fehlstellen bzw. Materialinhomogenitäten im Inneren des Holzes zu finden.

2. Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Schnittholz mittels schmalbandiger Longitudinalwellen in Transmission

2.1 Methoden

Am weitesten verbreitet ist das Ultraschalllaufzeit-Verfahren, wobei die Schalllaufzeit zwischen Sender und Empfänger gemessen wird. Das Ultraschall-Messgerät Sylvatest Duo von Cableries & Trefileries de Cossonay S. A. (Schweiz) wurde speziell für die Holzsortierung entwickelt. Es arbeitet mit einer festen Ultraschallfrequenz im Bereich von 22...30 Hz und wird üblicherweise mit Konusschallköpfen verwendet.

Die Impuls-Laufzeit wird bei Probekörpern aus Holz von vielen Parametern beeinflusst, da Holz durch seine organische Entstehung, seine Anisotropie, sein hygroskopisches Verhalten etc. viele unterschiedlichen Materialzustände und Materialeigenschaften aufweisen kann [vgl. dazu auch 4, 11, 18, 22]:

- Morphologische Holzeigenschaft der Holzart, z. B. Faserlänge, Jahrringbreite bzw. Spätholzanteil, Holzmerkmale wie Äste und Pilzbefall, Laufweg des Schalls bezogen auf die Faserrichtung
- Physikalische Holzeigenschaften, z. B. Rohdichte, Holzfeuchte, Temperatur
- Sonstige Faktoren bei der Messung, z. B. Abmessungen der Prüfkörper, Schallkopf und seine Ankopplung, aufgebrachte statische Lasten (z. B. Messung im Stapel), Hitzebehandlung des Holzes oder Vorhandensein von Fremdstoffen

Da in der vorliegenden Untersuchung Holz bei unterschiedlichen Holzfeuchten gemessen wurde, wird im Folgenden insbesondere der Einfluss der Holzfeuchte beschrieben. Mit steigender Holzfeuchte nimmt die Schallgeschwindigkeit ab. Die stärkste (lineare) Abnahme liegt im Holzfeuchtebereich von 0% bis Fasersättigung vor, der nach [16] auf den Einfluss der Holzfeuchte auf die Steifigkeit und auf die Dichte zurückzuführen ist. Oberhalb Fasersättigung ist – wegen des ausschließlichen Einflusses durch das freie Wasser – die weitere Abnahme der Schallgeschwindigkeit deutlich geringer und strebt asymptotisch an die Schallgeschwindigkeit in Wasser [2, 4, 16, 17, 21]. Korrekturformeln zur Umrechnung der Holzfeuchte auf die Referenz-Holzfeuchte von 12 % werden in [21] für Nadelholz sowie in [2] für Fichte und für die Laubholzarten Buche, Eiche und Esche angegeben.

2.2 Material und Vorgehensweise

In der im Folgenden beschriebenen Untersuchung wurden sowohl ringporige Laubhölzer (Edelkastanie, Eiche, Esche, Robinie) als auch zerstreutporige Laubhölzer (Buche, Zitterpappel) untersucht.

Bei den meisten der 241 Kanthölzern und 995 Brettschichtholzlamellen erfolgte dreimal eine Ultraschall-Transmissionsmessung in longitudinaler Richtung (d. h. in Faserrichtung) mit dem Sylvatest:

- das „nasse“ Rundholz vor dem Einschnitt im Sägewerk (unbekannte, ziemlich sicher stark schwankende Holzfeuchten),
- das „nasse“ Schnittholz im Stapel direkt nach dem Einschnitt im Sägewerk (ebenfalls meist unbekannt, ziemlich sicher stark schwankende Holzfeuchten),
- das „trockene“ Schnittholz im Stapel nach der technischen Trocknung auf die Zielfeuchte von $u = 12\%$ (Bestimmung der Holzfeuchte an jedem Probekörper).

Zur Ankopplung wurden jeweils die Stirnseiten angebohrt und die Spitzen der Konusschallköpfe hineingesteckt. Es wurde die Ultraschalllaufzeit gemessen, aus der die Ultraschallgeschwindigkeit und der dynamische E-Modul berechnet wurden. Da die Holzfeuchten unterschiedlich stark von der Referenzholzfeuchte ($u = 12\%$) abwichen, erfolgte eine Korrektur der Ultraschallgeschwindigkeit hinsichtlich der Holzfeuchte nach [2].

Für die Brettschichtholzlamellen wurden der Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit, für die Kanthölzer der Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit nach [6] ermittelt.

2.3 Ergebnisse

Eine der Laubholzarten (Buche, Esche und Robinie) zeigten sehr hohe elastomechanische Eigenschaften (mit Festigkeitsklassen weit über denen in den aktuellen europäischen Normen, z. B. [5]). Dagegen zeigten Edelkastanie, Eiche und Pappel deutlich niedrigere – im

Vergleich zu europäischen Nadelhölzern aber immer noch erhöhte – elastomechanische Eigenschaften. Verglichen mit den europäischen Nadelhölzern ist bei den Laubhölzern die Rohdichte (mit Ausnahme der Edelkastanie und Zitterpappel) deutlich höher.

Die meisten europäischen Normen zur Festigkeitssortierung (z. B. [5]) basieren auf einer starken Korrelation zwischen der Rohdichte und den elastomechanischen Eigenschaften, wie sie für die meisten Nadelholzarten beobachtet wird. Dieser starke Zusammenhang konnte aber für die untersuchten Laubholzarten nicht bestätigt werden. Das heißt von der Rohdichte kann bei Laubhölzern nur bedingt auf die Festigkeit geschlossen werden.

Bei Nadelhölzern besteht ein sehr starker Zusammenhang zwischen dem statischem E-Modul und der Festigkeit, weshalb viele Verfahren der maschinellen Festigkeitssortierung auf der Bestimmung des dynamischen E-Moduls basieren (z. B. Festigkeitssortierung mit dem Eurogrecomat ehemals von Grecon, Grademaster ehemals von Dimter, Golden Eye 706 von Microtec, Ultraschallverfahren wie Sylvatest Duo, Eigenfrequenzmessungen wie ViSCAN von Microtec oder Timber Grader MTG von Brookhuis).

Bei Laubhölzern ist der Zusammenhang zwischen dem statischem E-Modul und der Festigkeit deutlich schlechter. Daher ist zu erwarten, dass jede zerstörungsfreie Prüfung basierend auf Ultraschall- oder Eigenfrequenzmessung, die auf den elastischen Eigenschaften des Materials beruhen, zu schlechteren Ergebnissen bei einer Sortierung nach der Festigkeit führen muss im Vergleich zu Nadelhölzern. Vielmehr ist eine Sortierung hinsichtlich des globalen E-Moduls zu erwarten.

In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass von der Ultraschallgeschwindigkeit des „nassen“ Rundholzes (mit unbekannter, schwankender Holzfeuchte) nicht auf die Festigkeit des trockenen Schnittholzes und nur mit mäßiger Genauigkeit auf den globalen statischen E-Modul geschlossen werden kann. Nur wenig verbesserte sich die Korrelation für nasses Schnittholz: Auch hier ist nur ein schwacher Zusammenhang mit der Zugfestigkeit und nur ein mittlerer mit dem globalen Zug-E-Modul des trockenen Schnittholzes zu beobachten. Sowohl die Prüfung von „nassem“ Rundholz als auch von „nassem“ Schnittholz bedeuten eher eine Vorsortierung hinsichtlich des globalen E-Moduls und weniger eine Festigkeitssortierung.

Im Vergleich zum nassen Material besser – bei aber immer noch schwachen bis mittleren Korrelationen – ist die Abschätzung der Festigkeit aus der Ultraschallgeschwindigkeit des trockenen Materials. Aufgrund einer fehlenden bis bestenfalls mittleren Korrelation zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit bringt die Berechnung des dynamischen E-Moduls aus der Ultraschallgeschwindigkeit und der Rohdichte keine Verbesserung im Vergleich zur Ultraschallgeschwindigkeit. Weil der größte Teil des Materials nach der technischen Trocknung nahe bei der Ausgleichsfeuchte von $u = 12\%$ bei 20/65 Normklima war, bringt eine Korrektur der Ultraschallgeschwindigkeit bzw. des dynamischen E-Moduls auf die Referenzfeuchte von $u = 12\%$ keine Verbesserung der Korrelation. Grundsätzlich ist jedoch eine Abschätzung der Festigkeit aus der Ultraschallgeschwindigkeit bzw. dem dynamischen E-Modul kaum möglich, da die Festigkeit bei Laubhölzern weniger mit dem statischen E-Modul zusammenhängt, sondern vielmehr von der Lage und Größe der Äste und anderen Strukturmerkmalen wie Faserabweichung, Fäule und großen Rissen beeinflusst werden, die die Ultraschalllaufzeit in Transmission longitudinal durch das Holz nur wenig beeinflussen (vgl. Abbildung 5). Durch die Strukturmerkmale kann es zu einer Verlängerung des Schallweges kommen, eine Unterscheidung hinsichtlich Art, Größe und Lage des festigkeitsvermindernden Strukturmerkmals ist aber nicht möglich.

Bei Ultraschall-Transmissionsmessung quer zur Faser können Bereiche mit Strukturstörungen detektiert werden. Zu beachten ist, dass die Ultraschalllaufzeit quer zur Faser deutlich von der Durchschallungsrichtung radial bzw. tangential beeinflusst wird (vgl. Abbildung 6 links). Dies kann aber in der baupraktischen bzw. industriellen Anwendung häufig nicht berücksichtigt werden, da nicht zu erkennen ist, wie der Jahrringverlauf im Inneren des Balkens tatsächlich ist.

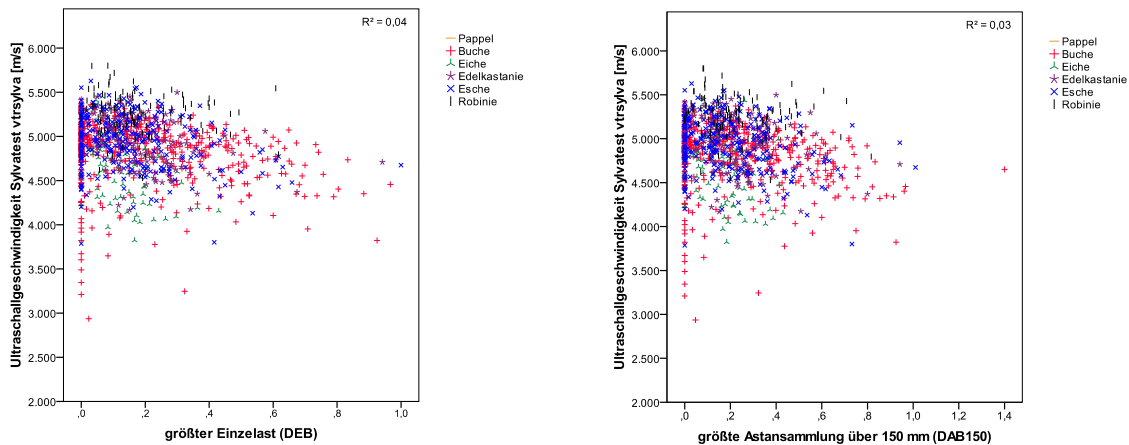


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen dem größten Einzelast (DEB gemäß DIN 4074) (links) bzw. der größten Astansammlung über 150 mm (DAB gemäß DIN 4074) (rechts) und der Ultraschallgeschwindigkeit des trockenen Schnittholzes $v_{tr,sylva}$

Bei starken Korrelationen ist eine Abschätzung des statischen globalen E-Moduls aus der Ultraschallgeschwindigkeit von trockenem Holz bzw. – bei etwas höheren Korrelationen – aus dem dynamischen E-Modul möglich. Verglichen mit Nadelhölzern sind die vorliegenden Korrelationen bei Laubholz aber deutlich geringer.

3. Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Holz mit niederfrequenter Ultraschallechotechnik

3.1 Methoden

Das Prinzip des Ultraschallechoverfahrens mit Longitudinal- und Transversalwellen ist ausführlich in [11] dargestellt, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

Messungen an der BAM ergaben, dass die in Abschnitt 2.3 und Abbildung 6 links beschriebenen Effekte der radial/tangential-Anisotropie von Longitudinalwellen für Transversalwellen vernachlässigbar sind. So zeigte sich, dass bei einer Polarisation der Transversalwellen parallel zur Faser die Unterschiede zwischen tangential und radial sehr gering sind und für eine Messung mit einem Arrayprüfkopf bestehend aus 12 Punktkontakt-Prüfköpfen als Sender und 12 Prüfköpfen als Empfänger vernachlässigbar sind. Holz stellt sich für Transversalwellen mit einer Wellenlänge im Zentimeterbereich als axial isotrop dar, d. h. für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle ist nur die Polarisation in Bezug auf die Faser ausschlaggebend.

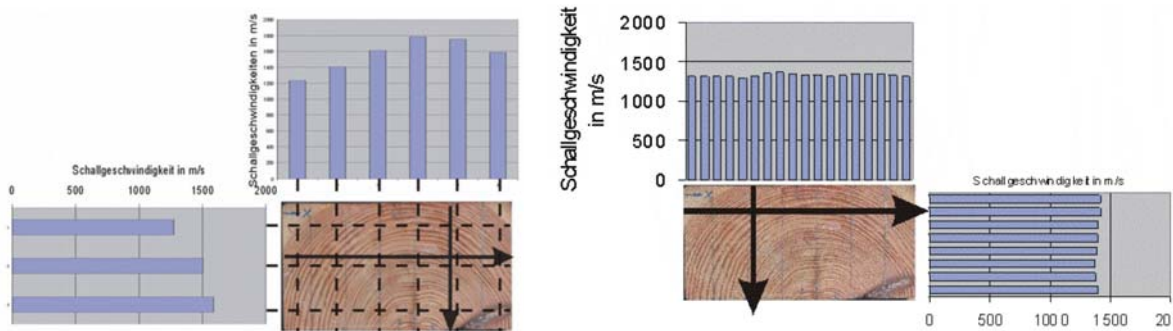


Abbildung 6 links: Querschnitt von Kiefer mit Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen entlang der gepunkteten Linie, am Rand mit tangential/radialem und in der Mitte mit rein radialem Anteil (100 kHz, Krautkraemer 0,2GC)

Abbildung 6 rechts: Querschnitt von Kiefern mit Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen an verschiedenen Punkten (55 kHz, Acsys TD20)

3.2 Detektion von Strukturmerkmalen wie Ästen und Rissen sowie Fäule an Nadelhölzern

In verschiedenen Veröffentlichungen [u. a. 11, 12, 15, 1] wird die Detektion von Strukturmerkmalen wie Ästen und Rissen sowie Fäule und teilweise auch Insektenbefall mittels Transversalwellen in Echotechnik an Nadelhölzern beschrieben.

Die in Abbildung 7 untersuchten oberflächlich sichtbar intakten Bauteile mit Fäulnisschäden hatten eine große Anzahl von kleinen Schwindrissen, was die Echomessung mit Longitudinalwellen unmöglich machte, mit Transversalwellen zu einer guten Detektion von Fäule (→ fehlendes Rückwandecho) und einem Riss rechtwinklig zur Messrichtung (→ keine Oberflächenwellen) führte.

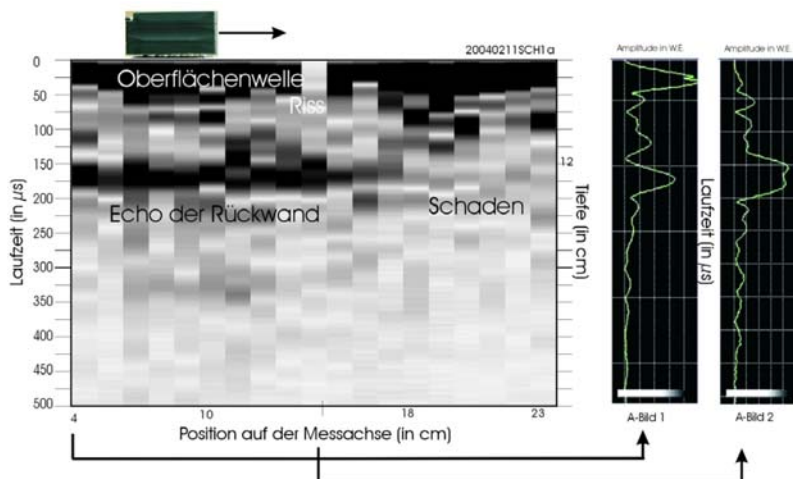


Abbildung 7: Ergebnisse einer Ultraschallechomessung entlang eines Probekörpers (12 cm x 23 cm x 54,5 cm) mit Fäulnisschaden im rechten Teil der Messung, Schwindriss löscht Oberflächenwellen aus

In Abbildung 8 sind die Messungen an einem Fichten-Brettschichtholzträger mit einigen Rissen dargestellt. Die Ultraschallmessungen zeigten zudem zahlreiche innenliegende Äste, die mittels Bohrwiderstandsmessung verifiziert wurden.

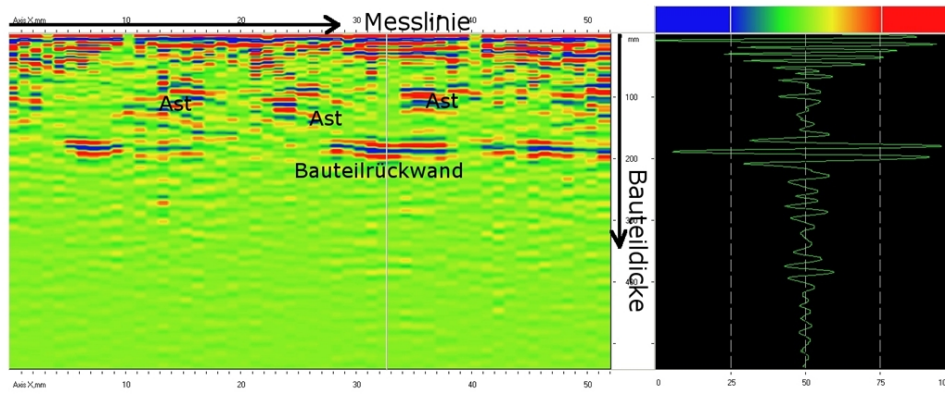


Abbildung 8: Ergebnisse einer Ultraschallechomessung entlang eines Fichten-Brettschichtholzträgers (Höhe = 20 cm) mit Rückwandecho: Äste und Risse auf der gegenüberliegenden Oberfläche (Bereiche ohne Rückwandecho)

3.3 Detektion von Strukturmerkmalen wie Ästen und Rissen sowie Fäule an Laubhölzern

An der einheimischen Eiche und tropischem Bongossi konnte gezeigt werden, dass auch bei Laubhölzern mit Transversalwellen in Echotechnik Strukturmerkmale wie Äste und Rissen sowie Fäule detektiert werden können. Aufgrund der in Abschnitt 2.1 beschriebenen verschiedenen Einflussfaktoren auf die Ultraschalllaufzeit, insbesondere der morphologische Merkmale der jeweiligen Holzart, können die Ultraschallgeschwindigkeiten jedoch in einem völlig anderen Größenordnungsbereich wie bei Nadelhölzern liegen. Daher müssen jeweils Kalibrierungen auf die jeweilige Holzart erfolgen.

Messungen mit Transversalwellen an einem Eichenbalken mit einer Dicke von 26,6 cm ergaben mit Longitudinalwellen keine Ergebnisse, mit Transversalwellen schwache Rückwandechos (Abbildung 9).

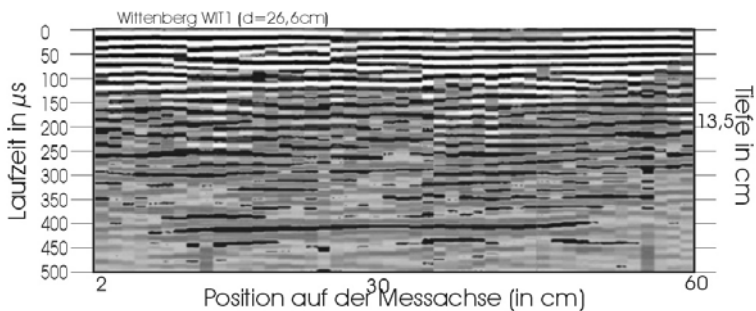


Abbildung 9: Ergebnisse einer Ultraschallechomessung mit Transversalwellen (A1220, 55 kHz) entlang eines Eichenprobekörpers, $d = 26,6 \text{ cm}$ ($v = 1.330 \text{ m/s}$), Rückwandecho bei $410 \mu\text{s}$

In Abbildung 10 sind exemplarisch Ergebnisse einer Ultraschallechomessung entlang eines Bongossibalkens der in [14] beschriebenen Holzbrücke dargestellt. Von diesem Brückentyp wurden bereits mehrere Bauwerke mit Auffälligkeiten untersucht. Die Untersuchungen ergaben, dass z. B. bei den Durchdringungspunkten des Querträgers durch den Längsträger teilweise Innenfäule vorhanden war, die aber nur eine sehr geringe Ausbreitung hatte und so kein Standsicherheitsproblem darstellt.

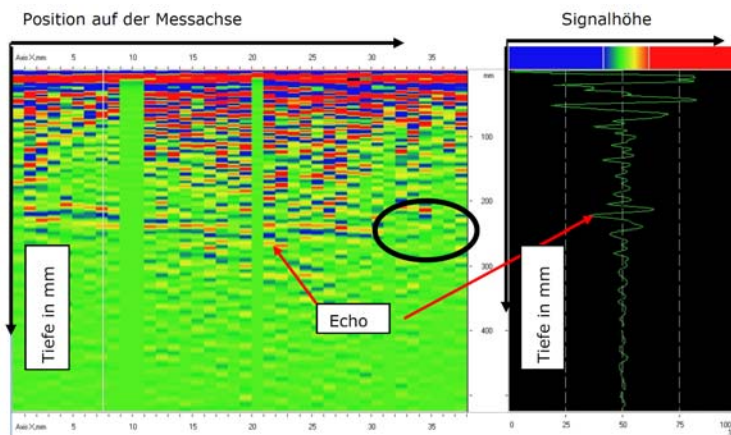


Abbildung 10: Ergebnisse einer Ultraschallechomessung der entlang eines Bongossibalkens, Kreis markiert Bereich ohne Echo, der mit Bohrwiderstand genauer untersucht wurde

4. Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Schnittholz mittels Eigenfrequenz aus Längsschwingung

4.1 Methoden

Details zur Messung der Eigenfrequenz aus Längsschwingung an Holz können [10] entnommen werden, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird. Der ViSCAN von MICROTEC GmbH basiert auf der Messung der Eigenfrequenz aus der Längsschwingung. Dabei erfolgt die Schwingungsanregung durch einen Luftzylinder mit Rückholfeder, auf dessen freiem Ende der Kolbenstange eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 30 mm angebracht ist. Befindet sich ein Brett im Quertransport in der Position des Luftzylinders, wird der Zylinderkolben über eine Impulsansteuerung des Magnetventils nach vorne geschossen. Die sich kurz nach der Anregung einstellende Longitudinalschwingung des Brettes wird berührungslos mit einem Laser-Vibrometer gemessen. Das Laser-Vibrometer misst die Geschwindigkeit an der Holzoberfläche über das rückgestrahlte Laser-Licht. Die gemessenen Daten werden an die Schwingungsauswertung übertragen, die aus einem Industrie-PC mit eingebauter Datenerfassungskarte mit vier analogen Messkanälen, einem mitlaufenden Filter je Kanal für die Abtastung der vom Vibrometer übertragenen Daten über Sigma-Delta-Wandler und einem Anschlussmodul zur Anbindung an den Industrie-PC (IVS-AD) besteht. Die gemessene Schwingung wird mittels FFT-Analyse ausgewertet. Die Auflösung der Frequenzanalyse beträgt 1 Hz.

4.2 Material und Vorgehensweise

In der im Folgenden beschriebenen Untersuchung wurde das bereits in Abschnitt 2 beschriebene Untersuchungsmaterial bestehend aus ringporigen Laubhölzern (Edelkastanie, Eiche, Esche, Robinie) und zerstreutporigen Laubhölzern (Buche, Zitterpappel) verwendet.

An 199 technisch getrockneten Kanthölzern und 489 technisch getrockneten Brettschichtholzlamellen wurde die Eigenfrequenz der longitudinalen Schwingung mit dem ViSCAN gemessen, aus der die Schallgeschwindigkeit und der dynamische E-Modul berechnet wurden. Da keine Literatur zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Eigenfrequenz bei Laubhölzern vorlag, erfolgte hier keine Holzfeuchtekorrektur auf die Referenzholzfeuchte ($u = 12\%$).

Für die Brettchichtholzlamellen wurden der Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit, für die Kanthölzer der Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit nach [6] ermittelt.

4.3 Ergebnisse

Die Besonderheiten der elastomechanischen Eigenschaften von Laubhölzern im Vergleich zu Nadelhölzern (insbesondere die geringe Abhängigkeit der Festigkeit von der Rohdichte und der geringe Zusammenhang zwischen statischem E-Modul und Festigkeit) wurden bereits in Abschnitt 2 beschrieben.

Die Korrelationen zwischen den Eigenfrequenzmessungen aus Longitudinalschwingungen und der Festigkeit bzw. Steifigkeit sind insbesondere hinsichtlich der Festigkeit höher als die mit Ultraschalltransmission in Längsrichtung ermittelten. Die Berechnung des dynamischen E-Moduls aus der Eigenfrequenz und der Rohdichte verbessert die Korrelation lediglich für die ringporigen Laubhölzern (Edelkastanie, Eiche, Esche, Robinie) bei Biegebelastung. Für die zerstreutporige Buche ist dagegen keine Verbesserung zu beobachten, weil kein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Festigkeit bzw. dem E-Modul besteht.

Im Gegensatz zur Ultraschallgeschwindigkeit ist damit eine Abschätzung der Festigkeit aus der Eigenfrequenz bzw. dem dynamischen E-Modul scheinbar möglich, obwohl die Äste – Hauptinflussfaktor auf die Festigkeit – nur eine sehr schwache Korrelation mit der Eigenfrequenz zeigen (vgl. Abbildung 11).

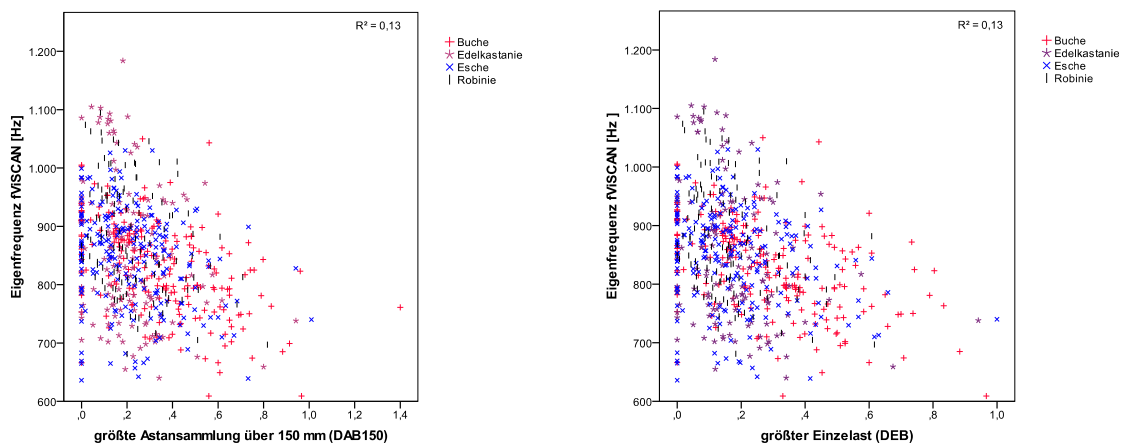


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen dem größten Einzelast (DEB gemäß DIN 4074) (links) bzw. der größten Astansammlung über 150 mm (DAB gemäß DIN 4074) (rechts) und der Eigenfrequenz f_{VISCAN} an trockenem Schnittholz

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Einsatz von Laubholz im Bauwesen steht immer noch am Anfang, obwohl Laubhölzer, vor allem Buchenholz, in großen Mengen zur Verfügung stehen und bessere elastomechanische Eigenschaften sowie häufig eine höhere Dauerhaftigkeit als die einheimischen Nadelhölzer aufweisen.

Holz weist als natürlich gewachsener Rohstoff durch eine Vielzahl von Strukturmerkmalen und anderen Einflussgrößen erhebliche Streuungen in seinen Materialeigenschaften auf. Fast die gesamte F&E und Literatur beschränkt sich auf Nadelholz, eine direkte Übertra-

gung der Ergebnisse auf Laubholz ist aber wegen des grundsätzlich anderen Holzaufbaues nicht möglich. Die charakteristischen Eigenschaften von Laubholz werden insbesondere von der Größe und Lage der Äste bzw. damit verbundener lokaler Faserabweichungen sowie – wichtig vor allem bei Holz im eingebauten Zustand – von Fäule und ggf. ausgeprägten Rissen beeinflusst. Bei den meisten Nadelholzarten sind die Äste farblich eindeutig vom umgebenden Holz zu unterscheiden, bei den meisten Laubholzarten weisen die Äste geringe farbliche Unterschiede und einen oft unscharfen Übergang der Astfläche zum umgebenden Holz auf, was die visuelle und optoelektronische Asterkennung erheblich erschwert. Die Rohdichte hat bei den Nadelhölzern einen gewissen Einfluss auf die Festigkeit, bei Laubhölzern spielt die Rohdichte dagegen keine bis eine vernachlässigbare Rolle.

In der Praxis ist es daher sowohl bei der Festigkeitssortierung von Laubschnittholz als auch bei der Begutachtungen von Holz im eingebauten Zustand wichtig, die Fehlstellen wie z. B. Äste bzw. Materialinhomogenitäten im Inneren des Holzes wie z. B. Fäule zu lokalisieren.

Es wurde die zerstörungsfreie Prüfung der Festigkeit und Steifigkeit von Laubschnittholz anhand der Ultraschalllaufzeit von schmalbandigen Longitudinalwellen in Transmission in longitudinaler Richtung bzw. des daraus ermittelten dynamischen Elastizitätsmoduls sowie anhand der Eigenfrequenz bzw. des dynamischen Elastizitätsmoduls aus Längsschwingung untersucht. Es zeigte sich, dass eine brauchbare Vorhersage der elastischen Eigenschaften des Holzes insbesondere bei Messungen an trockenem Holz mit einheitlicher Holzfeuchte möglich ist. Eine Abschätzung der Festigkeit ist mittels alleiniger Prüfung der Schallgeschwindigkeit bzw. Eigenfrequenz nicht möglich, da die für die Festigkeit entscheidenden Äste nicht erkannt werden. Zudem sind beide Verfahren ausschließlich im Rahmen einer industriellen Steifigkeitssortierung der Holzbauprodukte sinnvoll, für eine Anwendung bei der Untersuchung an Holz im eingebauten Zustand sind sie dagegen nicht praktikabel.

Mit niederfrequenter Ultraschallechotechnik können an Vollholz und Brettschichtholz Strukturmerkmale wie Äste und Schäden wie Fäulnis sowohl bei Nadelhölzern als auch bei einheimischen und tropischen Laubhölzern detektiert werden, auch wenn im eingebauten Zustand nur eine Bauteilseite zugänglich ist.

Referenzen

- [1] Baron, T. (2009): Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden / Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhausuniversität Weimar
- [2] Berkholz, R. C. (2001): Einfluss der Holzfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit bei verschiedenen Holzarten. Diplomarbeit an der Fachhochschule Eberswalde
- [3] Blaß, H. J., Denzler, J., Frese, M., Glos, P., und Linsenmann, P. (2005): Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau Band 1, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- [4] Burmester, A. (1965): Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 23(6), S. 227
- [5] DIN EN 338 (2008): Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [6] DIN EN 408 (2004): Holzbawerke. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz. Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [7] Frühwald, A., Ressel, J. B., und Bernasconi, A. (2003): Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Forschungsbericht der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes
- [8] Frühwald, K.; Schickhofer, G. (2005): Strength Grading of Hardwoods. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, S. 199-210

- [9] Glos, P., und Lederer, B. (2000): Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben DGfH-Nr. F - 98 / 12. Institut für Holzforschung der Technischen Universität München
- [10] Görlacher, R. (1990): Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinal-schwingungen. Dissertation an der Universität Fridericiana (TH) Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
- [11] Hasenstab, A. (2006): Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertatoin an der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI
- [12] Hasenstab, A. (2007): Ultraschallecho mit Longitudinal- und Transversalwellen zur zerstörungsfreien Prüfung von Holz, Holztechnologie, 48 (2), S. 39-44
- [13] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C., Hillemeier, B. (2006): Ultraschall-Echo-Messungen an Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 64 (6), S. 475-481
- [14] Hasenstab, A., Neumann, H.-H., Maierhofer, C., Arndt, R., Bluhm, J. (2010): Praktische Untersuchungen an Kulturgütern und Verkehrsbauten in der Baudenkmalpflege. Bauwerksdiagnose Berlin, 17.-18.02.2010
- [15] Haustein, T., von Laar C., Hasenstab A., Osterloh K. (2007): Apparative Verfahren zur Diagnose von Schäden durch Insekten an Holzbauteilen. Beitrag zu einem Tagungsband: 18. Hanseatische Sanierungstage 2007 "Feuchteschutz", Kühlungsborn Herausgeber: H. Venzmer Huss-Medien GmbH Berlin, S.35-48
- [16] Kabir, M. F., Sidek, H. A. A., Daud, W. M., Khalid, K. (1997): Effect of Moisture Content and Grain Angle on the Ultrasonic Properties of Rubber Wood. Holzforschung, 51, S. 263
- [17] Kollmann, F., Krech, H. (1960): Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Holz als Roh- und Werkstoff, 18(2), S. 41
- [18] Kumbartzky, K. (1998): Vergleich verschiedener Verfahren zur Festigkeitssortierung von Schnittholz. Diplomarbeit an der Universität München, Fakultät für Forstwissenschaften
- [19] Mägdefrau, K. (1951): Botanik. Winter-Verlag, Heidelberg.
- [20] Quer, M. (1997): Einfluß unterschiedlicher waldbaulicher Behandlungsmodelle auf die Verwertung und Verarbeitung von Eschenschnittholz (*Fraxinus excelsior* L.). Dissertation an der Universität Göttingen, Forstwissenschaftlicher Fachbereich
- [21] Sandoz, L. J. (1993): Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. Wood Science and Technology, S. 373
- [22] Steiger, R. (1996): Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK)