

# Feuchteabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit und des Biegeelastizitätsmoduls für Holz

Steffen KÖRPER\*, Stephan GÖLLER\*\*, Martin KRAUSE\*, Ina STEPHAN\*\*

BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin

\* FG 8.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren

\*\* FG 4.1 Biologie im Umwelt- und Materialschutz

**Kurzfassung.** An 54 Probekörpern aus Buche, Kiefer und Fichte wurde die Ultraschallgeschwindigkeit und der Biegeelastizitätsmodul abhängig von der Feuchte unterhalb der Fasersättigung im Bereich von 0 bis 20 % Holzfeuchte bestimmt. Die Messungen der Probekörper wurden für 10 verschiedene Feuchtegehalte durchgeführt und ausgewertet. Die Ultraschallgeschwindigkeiten  $c_{LL}$ ,  $c_{RL}$  und  $c_{TL}$  wurden bestimmt. Es wird gezeigt, wie sehr die Ergebnisse aufgrund der strukturellen Unterschiedlichkeiten von Holz streuen. Der Einfluss der Feuchte wird an einzelnen Probekörpern verifiziert. Anschließend wird eine Korrelation der Ultraschallgeschwindigkeit mit dem Biegeelastizitätsmodul durchgeführt und allgemeingültige Aussagen für eine Abschätzung der Feuchteveränderung mittels einer Ultraschalllaufzeitmessung abgeleitet.

## 1. Einführung

Holz ist und bleibt auch in Zukunft ein Baustoff mit hohem Marktpotential. Im Ingenieurholzbau und beim Bauen im Bestand stellt sich die Frage, inwiefern die Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung aussagekräftige Ergebnisse bezüglich der Belastbarkeit und der Qualität des anisotropen Werkstoffes Holz liefern können. Seit 2004 werden Ultraschallechoverfahren zur Integritätsprüfung von Holzbauteilen entwickelt und eingesetzt. [1], [2]. Über den Einfluss der Holzfeuchte auf die verschiedenen Ultraschallgeschwindigkeiten, insbesondere für Transversalwellen, liegen bisher nur wenige ausführliche Studien vor. [3], [4], [5].

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Feuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit und auf den Biegeelastizitätsmodul untersucht und die beiden Größen werden miteinander korreliert. Gegenstand der Betrachtungen ist der Holzfeuchtebereich unterhalb des Fasersättigungspunktes. Unterhalb dieses Punktes ist das gesamte Wasser in der Zellstruktur des Holzes und nicht in dessen Hohlraum- und Porenstruktur gebunden. Bei der industriellen Holzverarbeitung liegt die Verkaufs- und Einbaufeuchte fast ausschließlich unterhalb dieses Punktes. Nur Hölzer, die direktem Kontakt zu Wasser ausgesetzt sind oder nach dem Holzeinschlag noch nicht abgetrocknet sind, erreichen Feuchten oberhalb des Fasersättigungspunktes.

## 2. Messkomponenten

### 2.1 Probekörper

Wie in Abbildung 1 dargestellt, lassen sich entsprechend den Wachstumsrichtungen von Holz verschiedene Achsen erkennen: axial, radial und tangential. Entlang dieser Symmetrieachsen breiten sich die Ultraschallwellen, in dem ansonsten anisotropen Werkstoff, quasi isotrop aus.



#### Probekörperdetails

Holzarten:

Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)

Kiefer (*Pinus sylvestris* L.)

Fichte (*Picea abies* Karst.)

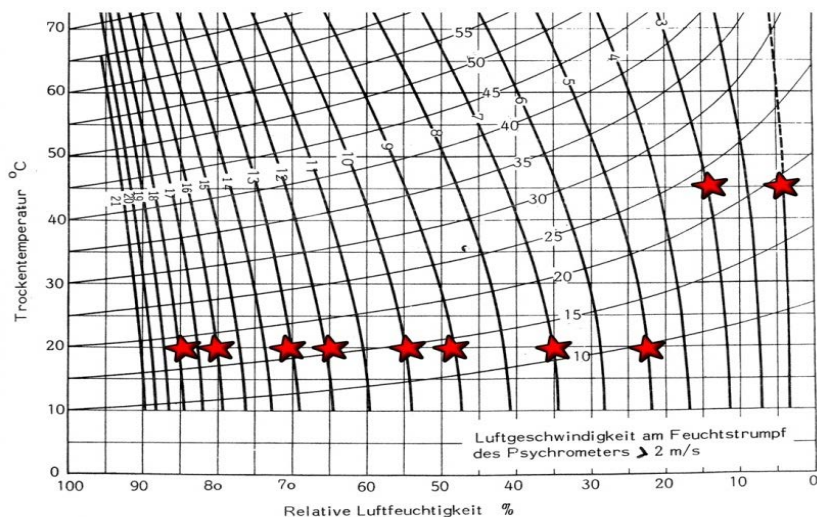
Format: 50 cm x 5 cm x 2,5 cm

Auswahl: Anlehnung an DIN EN 252

**Abbildung 1:** Wachstumsrichtungen, veranschaulicht am Probekörper aus Kiefer

### 2.2 Klimakammer

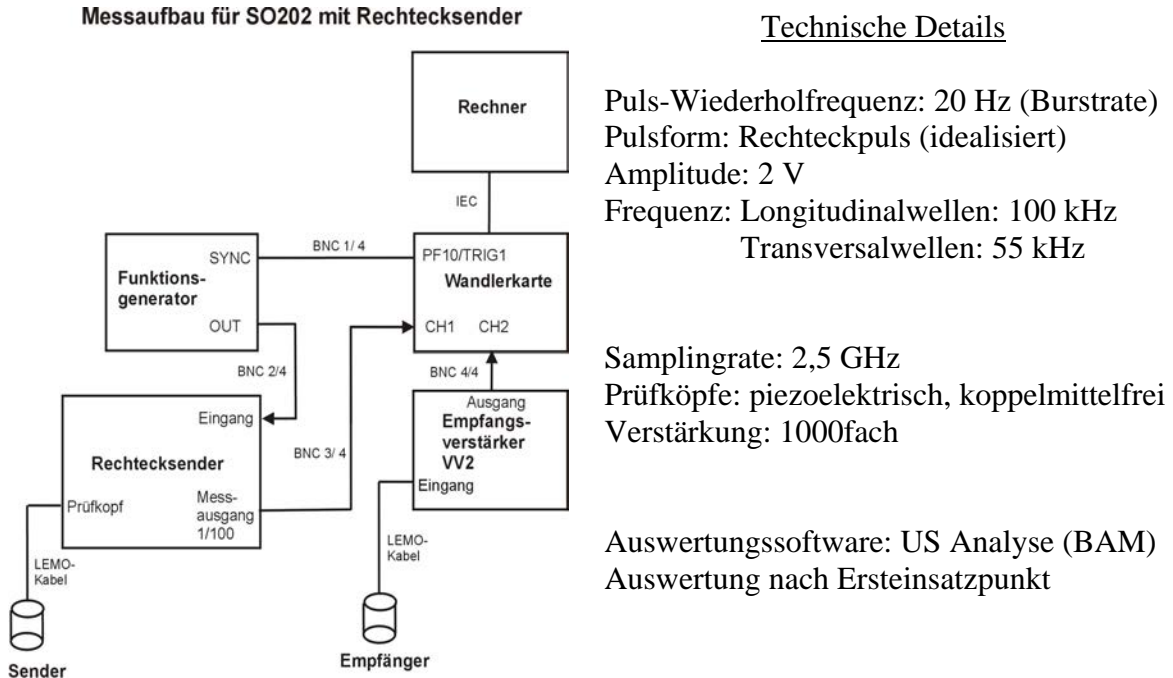
Abhängig vom umgebenden Klima stellt sich im Holz ein Ausgleichszustand der Holzfeuchte ein. Die beiden wichtigen Einflüsse sind dabei die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. Bei Verwendung von Holz als Baumaterial liegt diese Ausgleichsfeuchte i.d.R. zwischen 5 % und 20 %. Abbildung 2 gilt als gute Näherung für die Ausgleichsfeuchte in Holz und wurde für die Einstellungen der Klimakammer verwendet. Die in dieser Messreihe gewählten 10 Feuchtezustände sind mit roten Sternen eingetragen. Die Einstellung eines Feuchtezustandes beträgt 2 bis 3 Wochen. Die Restveränderung der Probekörpermasse beträgt maximal 0,5 g pro 24 h. Die exakte Holzfeuchte wird mit Hilfe der Trockenmasse berechnet. Diese erhält man durch die Darrtrocknung, einem Verfahren bei der die Probekörper bei 103 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet werden. [6]. Weil aus der hohen Temperatur Veränderungen in der Holzstruktur und den Holzinhaltsstoffen (z.B. Harze) resultieren können, wurde die Bestimmung der Darrtrockenmassen am Ende der Messreihe durchgeführt.



**Abbildung 2:** Holzfeuchte bei gegebener Trockentemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit [7]

### 2.3 Ultraschallmessung

Die Ultraschallgeschwindigkeit wird aus der Laufzeit eines Ultraschallimpulses über dem zurückgelegten Weg berechnet. Zur Bestimmung der Laufzeit wurde die Messapparatur SO202 der BAM mit folgenden Schaubild verwendet:

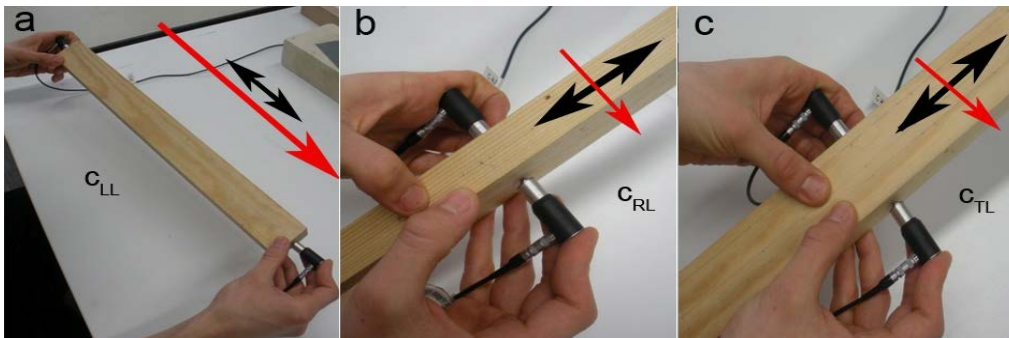


**Abbildung 3:** Schaubild und technische Details der Laufzeitmessapparatur

Es wurden drei repräsentative Schallgeschwindigkeiten in L- R- und T-Richtung ausgewählt:  $c_{LL}$ ,  $c_{RL}$  und  $c_{TL}$  (s. Tabelle 1 und Abbildung 4). Für jede dieser Messvarianten wurden entlang eines Probekörpers fünf Messpunkte aufgebracht, also 15 Messpunkte pro Probekörper. Insgesamt wurden somit  $10 \times 54 \times 15 = \text{ca. } 8000$  Ultraschalleinzelmessungen durchgeführt.

**Tabelle 1:** Messvarianten der verschiedenen Ultraschallgeschwindigkeiten

	$c_{LL}$	$c_{RL}$	$c_{TL}$
Wellenart	Longitudinal	Transversal	Transversal
Ausbreitungsrichtung	Axial	Radial	Tangential
Polarisationsrichtung	Axial	Axial	Axial
Abbildung 4	a	b	c



**Abbildung 4:** Ausbreitungsrichtung (rot) und Polarisationsrichtung (schwarz)

## 2.4 Messung des Biegeelastizitätsmoduls

Die Messungen des Biegeelastizitätsmoduls wurden in Anlehnung an DIN 52186 in tangentialer und radialer Belastungsrichtung durchgeführt (s. Abbildung 5 b und c). Die Belastung eines Probekörpers wird automatisch bis zu einem Abbruchkriterium durchgeführt und das Biegemodul automatisch ausgegeben. Das Abbruchkriterium schützt den Probekörper davor, über den elastischen Bereich hinaus belastet und somit bei der Messung beschädigt zu werden. Die Probekörper wurden bei allen Messungen immer mit derselben Seite eingelegt, so dass der Druck immer auf derselben Seite des jeweiligen Prüfkörpers aufgebracht wurde.

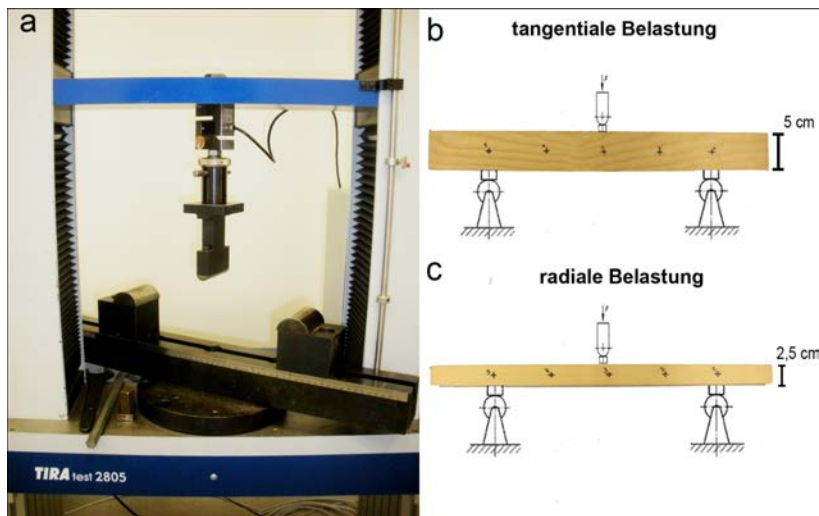


Abbildung 5: Biegeelastizitätsmessung TIRAtest 2805

## 3. Ergebnisse

Die Auswertung gliedert sich inhaltlich in 4 Teile:

In 3.1: Die Ergebnisse für alle gemachten Messungen an mehreren Probekörpern

In 3.2: Die Ergebnisse für einzelne Probekörper mit linearer Regressionsgerade

In 3.3: Korrelation der Ultraschallgeschwindigkeit mit dem Biegeelastizitätsmodul

In 3.1: Die Steigung der Regressionsgeraden für alle Probekörper zusammengefasst

### 3.1 Ergebnisse für mehrere Probekörper

Betrachtet man alle Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit in einem Diagramm, lässt sich erkennen, dass die verschiedenen gemessenen Geschwindigkeiten  $c_{LL}$ ,  $c_{RL}$  und  $c_{TL}$  unabhängig von der Holzart unterschiedliche mittlere Bereiche und unterschiedliche Bandbreiten besitzen (s. Abbildung 6). Die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung von Longitudinalwellen  $c_{LL}$  beträgt ca. das Dreifache der Wellenausbreitung von Transversalwellen  $c_{RL}$  und  $c_{TL}$ . Die Boxplots beziehen sich auf alle Messwerte unabhängig vom Feuchtegehalt.

Die Messungen mit Transversalwellen  $c_{TL}$  und  $c_{RL}$  unterscheiden sich bei der Versuchsdurchführung nur durch die Ausbreitungsrichtung der Wellen. Die Schwingungsrichtung beider Messvarianten ist identisch. Dennoch weichen die mittleren Ultraschallgeschwindigkeiten und der Bereich in dem 50 % der Messungen liegen (oberes und unteres Quartil des Boxplots) sichtbar von einander ab. Transversalwellen in radialer

Richtung sind somit schneller als Transversalwellen in tangentialer Richtung. Dies hängt mit dem Aufbau der Holzstruktur zusammen. Dementsprechend ist auch das Biegemodul in radialer Belastungsrichtung höher als in tangentialer. Ein Erklärungsansatz kann hier nicht gegeben werden.

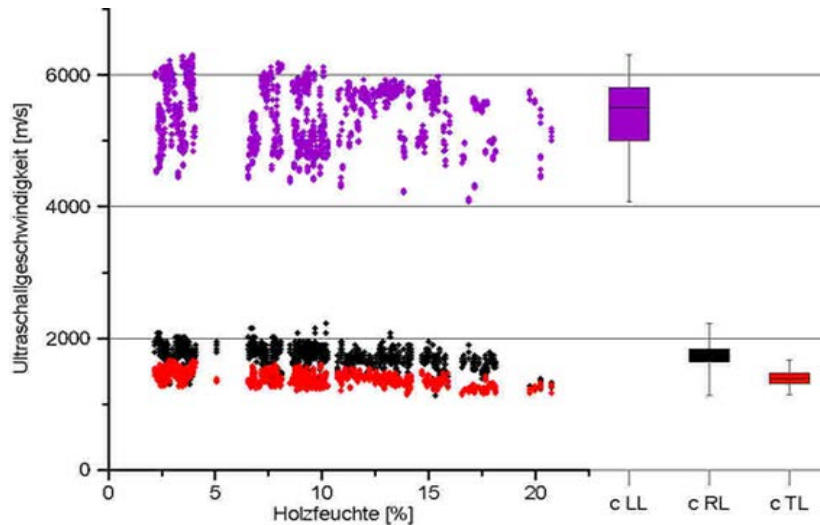


Abbildung 6: Ultraschallgeschwindigkeiten von allen Messungen

Die Holzart spielt bei der Streuung der Messwerte eine entscheidende Rolle. Die große Streuung der gemessenen Werte resultiert aus den Materialeigenschaften von Holz. Die Holzarten Buche, Kiefer, Fichte besitzen aufgrund der physikalischen Unterschiede eine andere mittlere Ultraschallgeschwindigkeit, hier am Beispiel der  $c_{LL}$ -Messung in Abbildung 7 dargestellt. Dabei lässt sich nicht pauschal sagen, dass die Ultraschallgeschwindigkeit in Buche höher ist als in Kiefer. Je nach Wellenart ändern und überschneiden sich die Werte.

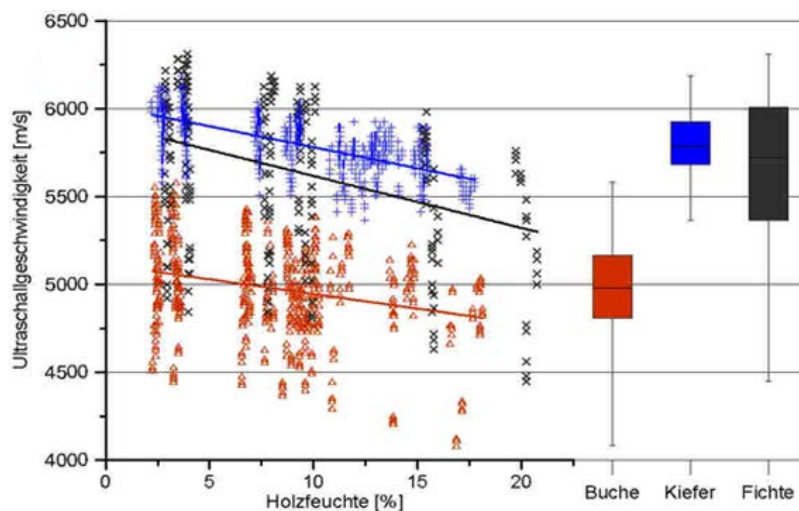


Abbildung 7: Ultraschallgeschwindigkeit  $c_{LL}$  für Buche, Kiefer, Fichte

Selbst Messungen entlang eines Probekörpers führen zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Woher diese Schwankungen kommen ist bei der Vielzahl der Einflussmöglichkeiten, wie z.B. der Verlauf der Jahresringe oder der Frühholz- Spätholzanteil nur schwer zu bestimmen.



### 3.2 Ergebnisse für einzelne Probekörper

Die Holzfeuchte und die Ultraschallgeschwindigkeit lassen sich für einzelne Messpunkte auf Probekörpern in einen linearen Zusammenhang stellen (s. Abbildung 8). Die ermittelten relativen Standardabweichungen sind als Fehlerbalken in die Abbildung eingetragen. Die Ausgleichsgeraden verlaufen durch die Mehrzahl der durch Fehlerbalken begrenzten Bereiche um die Messpunkte.

Die Ausgleichsgeraden verlaufen durch die Mehrzahl der durch Fehlerbalken begrenzten Bereiche um die Messpunkte.

Für  $c_{RL}$  ist die Anzahl der Messpunkte, die mehr als den Bereich der Fehlerbalken von der Ausgleichsgeraden entfernt liegen, sehr groß. Grund dafür könnte eventuell das geringe Verhältnis Probekörperlänge in radialer Richtung zur Wellenlänge, was zu einer unvollständigen Ausbildung der Welle und somit zu Unsicherheiten bei der Auswertung führen kann. Die einzelnen Abbildungen sind zum Vorteil der Auflösung in unterschiedlichen x-Achsenkalierungen dargestellt. Es lässt sich zusammenfassen, dass eine lineare Regression der Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeit möglich ist.

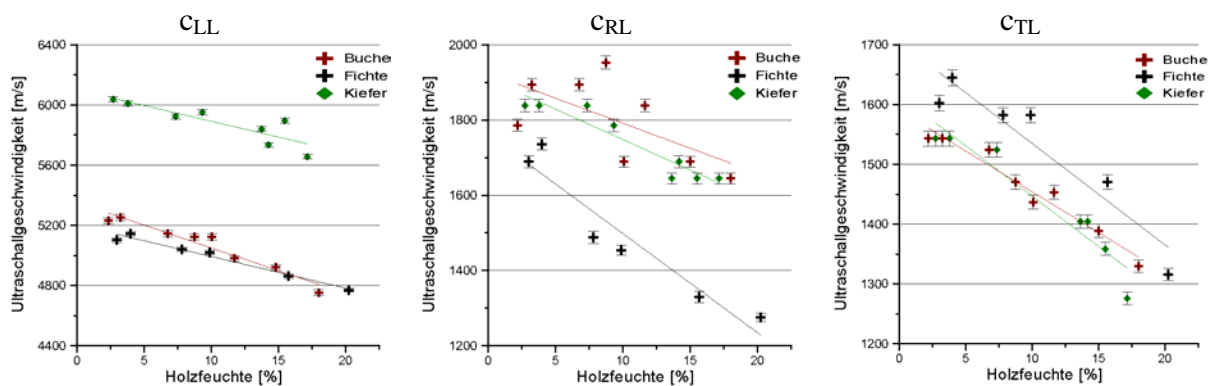


Abbildung 8: Ultraschallgeschwindigkeiten für einzelne Messpunkte

### 3.3 Korrelation der Ultraschallgeschwindigkeit mit dem Biegeelastizitätsmodul

Im Bereich von 5 bis 20 % HF lässt sich eindeutig ein Zusammenhang zwischen Biegemodul und der Ultraschallgeschwindigkeit feststellen, in Abbildung 9 beispielsweise für das Biegemodul in radialer Belastungsrichtung dargestellt. Es besteht für einen Probekörper - über die lineare Abhängigkeit mit der Feuchte - eine eindeutige Zuordnung. Für die Korrelation wurden die Messwerte der 5 Messpunkte entlang eines Probekörpers für eine bessere Ortsauflösung gemittelt. Jeder einzelne Messpunkt in Abbildung 9 ist somit das Ergebnis von 5 Messungen entlang des Probekörpers. Das Biegemodul wird für den gesamten Probekörper bestimmt. Vergleicht man unterschiedliche Probekörper, können diese für dieselbe Ultraschallgeschwindigkeit unterschiedliche Biegemodule besitzen.

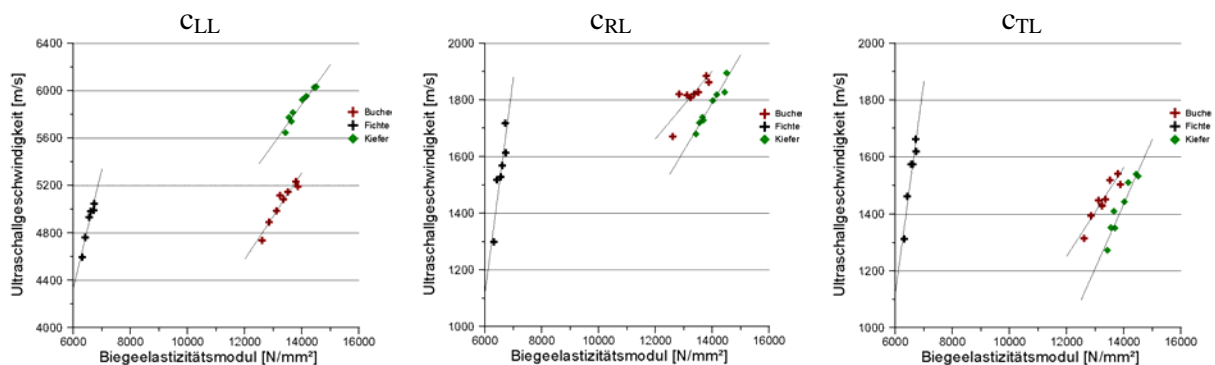


Abbildung 9: Korrelation der Ultraschallgeschwindigkeit mit dem Biegeelastizitätsmodul (radial)

### 3.4 Die Steigung der Ultraschallgeschwindigkeit über der Feuchte

Die Steigung der Ultraschallgeschwindigkeit besitzt die Einheit [(m/s) / %HF] oder [m/(s\*%HF)]. Eine Übersicht über die Steigungen aller berechneten Regressionsgeraden, aufgespalten nach den drei Messvarianten  $c_{LL}$ ,  $c_{RL}$  und  $c_{TL}$ , gibt Abbildung 10. Es lässt sich erkennen, dass die oberen und unteren Quartile einen relativ engen Bereich von ca. 10 m/s/%HF umspannen. Der Median liegt für  $c_{LL}$  und Kiefer beispielsweise bei ca. -25. Das obere Quartil bei ca. -21 und das untere Quartil bei ca. -29.

Ein Ablesebeispiel für die  $c_{LL}$ -Ultraschallgeschwindigkeit für Kiefer zeigt die Unsicherheit bei der Abschätzung der Holzfeuchte durch eine Ultraschallmessung: Beträgt die Steigung -21 m/s/%HF (oberes Quartil), dann ändert sich die Ultraschallgeschwindigkeit um 210 m/s. Bei -29 m/s/%HF (unteres Quartil) um 290 m/s. Somit liegt bei 50% der Probekörper aus Kiefer bei einer Veränderung der Holzfeuchte die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit  $c_{LL}$  zwischen 210 m/s und 290 m/s. Umgekehrt liegt für eine Veränderung von  $c_{LL} = 100$  m/s von 0,5 die Veränderung der Holzfeuchte mit einem Vertrauensbereich bei 3,4 % bis 4,8 %.

Die größten ermittelten Steigungen der Regressionsgeraden liegen teilweise im positiven Bereich. Ausreißer wurden in dieser Arbeit nicht entfernt.

Der Bereich zwischen größtem und kleinstem ermittelten Wert spannt einen Bereich von ungefähr 40 m/s/%HF auf. Die Steigung für Fichte liegt immer etwas tiefer als die Steigungen der anderen Holzarten. Die Steigung der Kiefer liegt nahe beim Niveau der Steigung der Buche. Allgemein überschneiden sich die Quartile häufig.

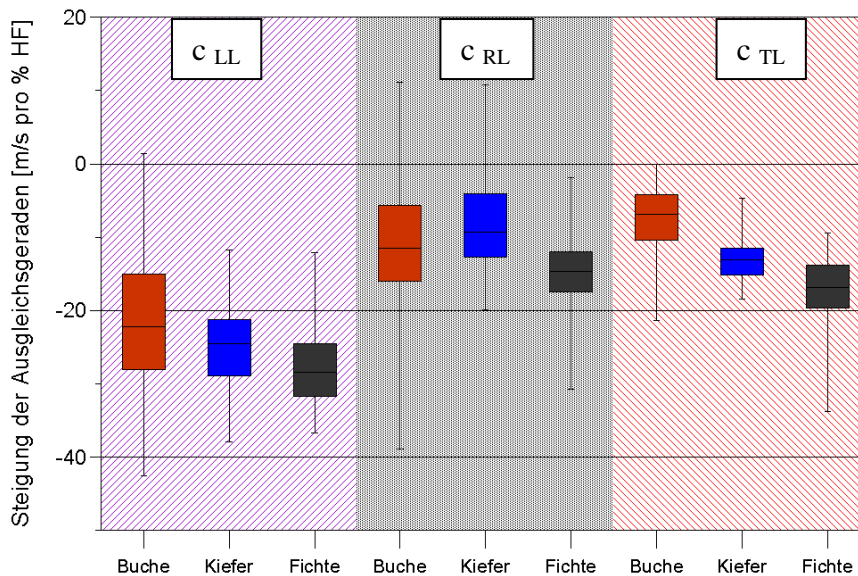


Abbildung 10: Steigungen der Ausgleichsgeraden der US Messungen

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird über die Feuchteabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit von Longitudinal- und Transversalwellen sowie des Biegeelastizitätsmoduls in Kiefer-, Fichten- und Buchenholz berichtet.

Bekannterweise sind die Ultraschallgeschwindigkeiten je nach Wachstumsrichtung sehr unterschiedlich. Vergleicht man die Messungen an unterschiedlichen Probekörpern, so sind die Streuungen sehr groß und liegen z.B. für die Messung mit Longitudinalwellen in

der Größenordnung von 2000 m/s. Die Gründe sind unterschiedliche Holzstrukturen, wie z.B. Äste, Harzkanäle oder andere Fehlstellen. Im Vergleich dazu sind die Veränderungen der Ultraschallgeschwindigkeit aufgrund der Holzfeuchte sehr gering. Es ist also nicht möglich durch Messung der Ultraschalllaufzeit an unterschiedlichen Holzkörpern auf deren Feuchte zu schließen. Zur Beurteilung der Feuchte eines Holzkörpers muss somit immer eine Referenzmessung am selben Probekörper bei bekannter Holzfeuchte vorliegen. Über die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit lässt sich die Veränderung der Holzfeuchte abschätzen, da ein linearer Zusammenhang der beiden Messgrößen im Bereich von 3 % bis 20 % HF gezeigt wurde. Durch die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit an einem Holzkörper lässt sich aus den gleichen Gründen keine eindeutige Aussage über dessen Biegeelastizitätsmodul treffen. Bei gleicher Ultraschallgeschwindigkeit besaßen unterschiedliche Probekörper unterschiedliche Biegemodule. Allerdings ist es im Bereich 5 % bis 20 % HF möglich, bei einer Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit über die Veränderung der Holzfeuchte die Veränderung des Biegemoduls abzuschätzen, weil auch der Biegemodul einen linearen Zusammenhang zur Feuchte aufweist. Durch die Analyse der gesamten gemessenen Daten wurde gezeigt, wie gut diese relativen Abschätzungen sind.

Die Steigungen der linearen Regressionsgeraden für die Ultraschallgeschwindigkeit zur Feuchte liegt für alle gemessenen Probekörper in einem Bereich von ca. + 10 bis – 40 m/s/%HF. Dabei liegt die Mehrzahl der berechneten Steigungen bei ca. – 10 bis – 30 m/s/%HF. Verwendet man diese Steigung, um von einer Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit auf eine Veränderung der Holzfeuchte zu schließen, bleiben Unsicherheiten von mehreren Prozent Holzfeuchte vorhanden.

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der TU Berlin, Fakultät V, Fachgebiet Systemdynamik und Reibungsphysik unter der Leitung von Prof. Valentin Popov. Für die Förderung des Vorhabens *Hochgenaue Strukturerkennung von Holzbauteilen mit 3D-Ultraschall* sei dem Bundesamt für Bau- und Raumordnung (BBR) gedankt.

## Referenzen

- [1] Hasenstab, Andreas: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren, , Dissertation, Bundesamt für Materialforschung und -prüfung, TU Berlin, 2006
- [2] Maack, Krause: Ultraschall-Echoverfahren an Holzbauteilen beim Bauen im Bestand, , DGZfP-Jahrestagung, BAM Berlin 2009
- [3] Konarski, Wazny: Zusammenhang zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und den mechanischen Eigenschaften pilzbefallenen Holzes, Springer-Verlag, Holz als Roh- und Werkstoff, 1977
- [4] Niemz, Peter: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW – Verlag, Holz Anatomie – Chemie – Physik, 1993
- [5] Yildiz, Özkan: Experimentelle Ermittlung von Unsicherheitsbeiträgen des Ultraschall-Echoverfahrens bei der Laufzeitmessung des Rückwandechos an Holzbauteilen, Diplomarbeit, Bundesamt für Materialforschung und -prüfung, TU Berlin, 2009
- [6] DIN EN 113: Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten, Holschutzmittel, Normenausschuß Materialprüfung, Holzwirtschaft und Möbel NHM, 1996
- [7] Lohmann Ulf: Holzhandbuch, DRW – Verlag, zweite Auflage, 1982