

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

**IfB**

Institut für Baustoffe  
Institute for Building Materials

# Ermittlung elastomechanischer Kennwerte von Rotbuchenholz

---

## Abschlussbericht

[Dezember, 2011]

Projektnummer: 2010.09

### Durchführung

ETH Zürich, Institut für Baustoffe,  
Arbeitsgruppe Holzphysik  
Schafmattstrasse 6  
CH-8093 Zürich

**Projektleitung:** Prof. Dr. Peter Niemz

### Förderung

Fonds zur Förderung der Wald- und  
Holzforschung  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
Abteilung Wald

**Projektbearbeiter:** Tomasz Ozyhar

**Projektbearbeitung:** 01/2011 -12/2011



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 PROBLEMSTELLUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>2 ZIEL DES PROJEKTES</b> .....	<b>4</b>
<b>3 PROJEKTBESCHREIBUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1 Bestimmung der elastischen Eigenschaften</b> .....	<b>5</b>
3.1.1 Identifikation von Schubmoduln aus Ultraschallmessung .....	5
3.1.2 Identifikation der Elastizitätsmoduln und Poissonzahlen aus Druck- und Zugversuchen .....	6
<b>3.2 Bestimmung der Festigkeitseigenschaften</b> .....	<b>6</b>
3.2.1 Zug- und Druckfestigkeiten.....	6
3.2.2 Bruchzähigkeit $K_{IC}(TL)$ $K_{IC}(RL)$ $K_{IC}(RT)$ $K_{IC}(TR)$ .....	7
<b>4 MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>7</b>
<b>4.1 Versuchsmaterial</b> .....	<b>7</b>
<b>4.2 Messmethoden</b> .....	<b>7</b>
4.2.1 Ultraschall-Methode.....	7
4.2.2 Druckversuch und Zugversuch.....	10
4.2.2.1 Material und Methoden .....	10
4.2.2.2 Bestimmung der Elastizitätsmoduln und der Poissonzahlen .....	13
4.2.2.3 Bestimmung der Festigkeiten.....	14
4.2.3 Zugversuch an Kompaktproben (CT) .....	15
<b>5 ERGEBNISSE</b> .....	<b>17</b>
<b>5.1 Feuchteabhängige elastische Eigenschaften</b> .....	<b>17</b>
5.1.1 Schubmoduln mittels Ultraschall-Messmethode .....	17
5.1.2 Elastizitätsmodul und Poisson Zahlen.....	19
5.1.3 Visualisierung des feuchteabhängigen, linear elastischen Verhaltens von Buchenholz .....	25
<b>5.2 Feuchteabhängige Festigkeitseigenschaften</b> .....	<b>27</b>
5.2.1 Zug- und Druckfestigkeit.....	27
5.2.2 Bruchzähigkeit in Abhängigkeit der Holzfeuchte .....	31
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>33</b>
<b>7 LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>36</b>

# 1 Problemstellung

Für die Holzwirtschaft der Schweiz wird ein starker Zuwachs an Laubholz prognostiziert, der mit einem Rückgang der Nadelholzvorräte einhergehen wird (Krackler et al. 2010). Dies wird zwangsläufig zu einer Verschiebung des Sortimentes an Nutzholzarten führen. Langfristig ist mit einer erhöhten Nachfrage an Laubholz (vor allem Buche) zu rechnen, insbesondere in den heute ausschliesslich durch Nadelholz dominierten Einsatzbereichen des Holzbaus. Gegenwärtig liegt der hauptsächliche Verwendungszweck von Buchenholz allerdings in der energetischen Verwertung. Zur Umsetzung einer Kaskadennutzung und der damit einhergehenden gesteigerten Wertschöpfung ist die erweiterte Anwendung von Buchenholz im konstruktiven Holzbau notwendig.

Die Berechnungsmethoden im Ingenieurwesen, bspw. Simulationen und FE-Modellierungen, benötigen einen Input an charakteristischen Materialkennwerten. Das orthotrope Materialverhalten von Holz wird durch das Hookesche Gesetz beschrieben und erfordert neun unabhängige Elastizitätskonstanten in den drei orthogonalen Symmetrieebenen des Holzes. Die Stoffbeziehungsmatrix für eine orthotrope Berechnung beinhaltet folgende Kennwerte:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

oder allgemein

$$\varepsilon = S \cdot \sigma \quad (2)$$

wobei:

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  Dehnungen (Körper ändert Volumen, aber nicht die Gestalt)

$\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$  Gleitungen (Körper ändert Gestalt, aber nicht das Volumen)

$\sigma$  Normalspannungen

$\tau$  Schubspannungen

$S_{ii}$  für  $i = 1, 2, 3$  = Dehnungszahlen

$S_{ii}$  für  $i = 4, 5, 6$  = Gleitzahlen

$S_{ik}$  für  $i, k = 1, 2, 3$  = Poissonzahlen;  $i \neq k$

Dabei gilt:

für die E-Moduln:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}, E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}, E_3 = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} \quad (3)$$

für die G-Moduln:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}, G_{13} = \frac{\tau_{13}}{\gamma_{13}}, G_{23} = \frac{\tau_{23}}{\gamma_{23}} \quad (4)$$

Für die Dehnungszahlen:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad (5)$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}}, S_{55} = \frac{1}{G_{13}}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (6)$$

$$S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_2}, S_{13} = \frac{-\nu_{31}}{E_3}, S_{23} = \frac{-\nu_{32}}{E_3} \quad (7)$$

$$S_{21} = \frac{-\nu_{12}}{E_1}, S_{31} = \frac{-\nu_{13}}{E_1}, S_{32} = \frac{-\nu_{23}}{E_2} \quad (8)$$

wobei:

- $\nu$  Poissonzahlen
- $G$  Schubmodul

Im Gegensatz zu Nadelholz liegen für Laubholz keine vollständigen Datensätze der Materialkonstanten vor. Insbesondere hinsichtlich einer Differenzierung zwischen radialer und tangentialer Richtung fehlt für Laubholz eine umfassende Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften. Orientierende Arbeiten zu Laubhölzern fokussieren zumeist Festigkeiten parallel und senkrecht zur Faserrichtung. Dies trifft auch auf die in der Norm DIN68364 (2003-05) zusammengefassten Kennwerte osteuropäischer Laubhölzer, bspw. aus dem Karpatenraum, oder im Schiffsbau verwendeter, tropischer Hölzer zu. Entsprechende Messwerte zu den richtungsabhängigen Elastizitätsmoduln und Poisson-Konstanten sowie zu den Schubmoduln sind in der Literatur nur teilweise vorhanden.

Zudem haben die vorherrschenden klimatischen Bedingungen einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das mechanische Verhalten von Holz. Während für die Fichte eine umfassende feuchteabhängige Charakterisierung im elastischen Bereich bereits vorhanden ist (Neuhaus 1983), wurde für Laubholz bisher keine Bestimmung der elastischen Kennwerte in Abhängigkeit der Materialfeuchte durchgeführt.

## **2 Ziel des Projektes**

Im Fokus des Projektes steht die Ermittlung der wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Rotbuchenholz aus der Schweiz, differenziert nach den drei Hauptachsen, als Funktionen der Holzfeuchte. Anschliessend wird der umfangreiche Datensatz feuchteabhängiger Kennwerte für die Berechnung von Holzelementen mit der Finiten Elemente Methode bereitgestellt.

## **3 Projektbeschreibung**

Eine vollständige Charakterisierung des feuchteabhängigen elastischen Verhaltens von Rotbuchenholz umfasst die Ermittlung der drei Elastizitätsmoduln  $E$ , der drei Schubmoduln  $G$ , sowie der sechs Poissonzahlen  $\nu$  (s. Gl. 1). Dazu werden einerseits konventionelle Zug- und Druckversuche durchgeführt, andererseits werden die dynamischen Kennwerte mittels der Ultraschall-Prüfmethode ermittelt.

Ergänzend zu den elastischen Eigenschaften werden in den Zug- und Druckversuchen die feuchteabhängigen Festigkeiten in allen drei Symmetrieebenen ermittelt, die zugehörigen Bruchdehnungen sowie der Anteil der plastischen Verformungen ausgewertet.

Hinsichtlich der Bruchmechanik von Buchenholz werden Kompakt-Zugversuche durchgeführt, um den Widerstand gegen Risswachstum, die sogenannte Bruchzähigkeit, zu bestimmen. Neben den strukturbedingten Versagenseigenschaften in den anatomischen Richtungen des Holzes wird auch der Einfluss klimatischer Bedingungen untersucht und ausgewertet.

Die nachfolgenden Unterkapitel geben einen strategischen Überblick zu denen, im Rahmen des Projektes, durchgeführten Untersuchungen. Die detaillierte Beschreibung der Messmethodik, die Angaben zum verwendeten Material sowie die Aufbauten der einzelnen Versuche sind in Kapitel 4 dargelegt.

### **3.1 Bestimmung der elastischen Eigenschaften**

#### **3.1.1 Identifikation von Schubmoduln aus Ultraschallmessung**

Für Holz existieren keine standardisierten Prüfvorschriften zur Ermittlung der Schubmoduln. Zudem gestaltet sich deren Bestimmung mittels quasi-statischer Prüfmethode als schwierig. Die Methode der Ultraschallmessung erfordert demgegenüber einen

vergleichsweise geringen Aufwand und bietet den Vorteil der zerstörungsfreien Prüfung. Da an einem Prüfkörper die Schubmoduln in allen drei anatomischen Richtungen bestimmt werden können, ist der Materialaufwand sehr gering. Um zusätzlich den Einfluss der Holzfeuchte quantifizieren zu können, werden verschieden klimatisierte Proben geprüft.

### **3.1.2 Identifikation der Elastizitätsmoduln und Poissonzahlen aus Druck- und Zugversuchen**

Das elastische Verhalten des Holzes wird durch seinen strukturellen Aufbau beeinflusst, daher werden die Elastizitätsmoduln und Poissonzahlen in Abhängigkeit der Belastungsart untersucht. Es werden quasi-statische Druck- und Zugversuche für die drei holzanatomischen Richtungen durchgeführt. Um zusätzlich Aussagen über den Einfluss der Holzfeuchte auf das elastische Verhalten treffen zu können, werden Prüflinge in verschiedenen Klimata vorkonditioniert. Der gewählte Versuchsaufbau ermöglicht einen Vergleich zwischen dem Zug-Elastizitätsmodul und dem Druck-Elastizitätsmodul.

## **3.2 Bestimmung der Festigkeitseigenschaften**

### **3.2.1 Zug- und Druckfestigkeiten**

Neben den elastischen Eigenschaften ist das Festigkeitsverhalten von Holz besonders im Hinblick auf die mögliche Anwendung in tragenden Konstruktionen von grosser Bedeutung. In Analogie zur Bestimmung der elastischen Kennwerte, werden die Festigkeiten unter Druck- und Zugbelastung parallel wie auch quer zur Faser (radial und tangential) in Abhängigkeit von der Holzfeuchte ermittelt. Für ein besseres Verständnis des Festigkeitsverhaltens werden neben den Festigkeiten auch die Bruchdehnungen aufgenommen. Desweiteren wird der Anteil der plastischen Verformung in Abhängigkeit von der Holzfeuchte untersucht.

### **3.2.2 Bruchzähigkeit $K_{Ic}(TL)$ $K_{Ic}(RL)$ $K_{Ic}(RT)$ $K_{Ic}(TR)$**

Bei Bauteilen, welche einer Last ausgesetzt sind, kann eine initiierte Rissausbreitung zum Versagen des Materials führen. Um diesem vorzubeugen, ist die Kenntnis der Bruchzähigkeit, d.h. der Widerstand eines Materials gegen einsetzendes Risswachstum, notwendig. Die Bruchzähigkeit in TL, RL, RT und TR Richtung wird bei unterschiedlichen Holzfeuchten in einem Kompaktzugversuch bestimmt.

## **4 Material und Methoden**

### **4.1 Versuchsmaterial**

Das untersuchte Probenmaterial wurde einem, in der Ostschweiz gewachsenen, Stamm der Gattung *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) entnommen. Die durchschnittliche Rohdichte ermittelt aus den Abwägungen und Abmessungen aller Versuchsproben bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% und einer Temperatur von 20°C (Holzfeuchte ca. 12%) betrug 689 kg/m<sup>3</sup>.

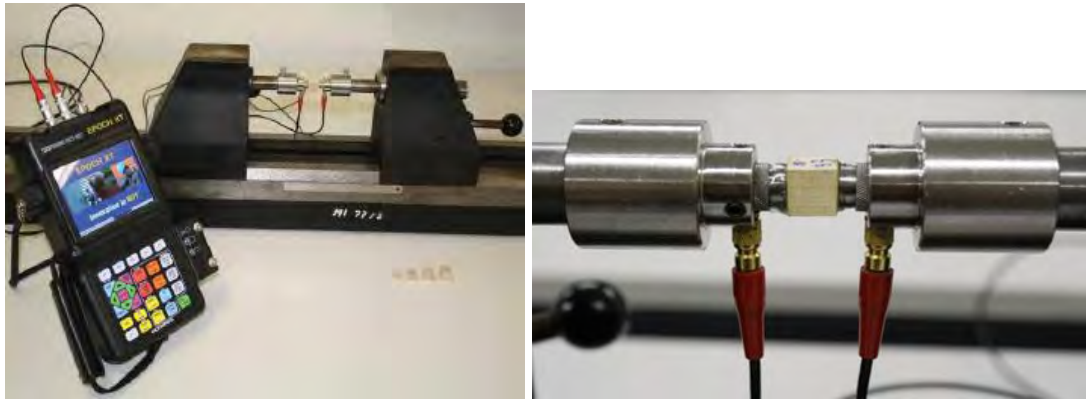
Die Probenherstellung erfolgte mit Holzbearbeitungsmaschinen der Arbeitsgruppe Holzphysik in der internen Schreinerei. Nach dem Probenzuschnitt erfolgte die Lagerung der Prüfkörper in den entsprechenden Klimaräumen bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte. Abhängig von Ausgangsfeuchte und erwarteter Sollfeuchte des Prüflings dauerte die Klimatisierung zwei bis vier Wochen.

### **4.2 Messmethoden**

#### **4.2.1 Ultraschall-Methode**

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit einem EPOCH XT Ultraschallprüfgerät der Firma Panametrics durchgeführt (s. Abb. 1). Zur Bestimmung der Schubmoduln wurden

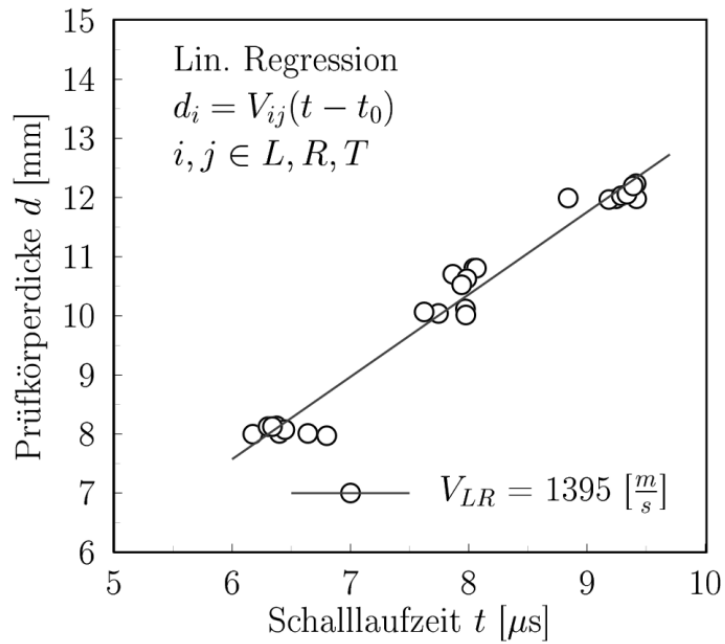
Scherwellen im Durchschallungsmodus verwendet. Die verwendeten Sensoren (STAVELEY, S0104) arbeiten mit einer Frequenz von 1 MHz.



**Abbildung 1** Ultraschallmessgerät mit Messsensoren (rechts) zur Bestimmung der Schubmoduln

Die Prüfkörper sind Würfel aus Buchenholz mit einer Kantenlänge von jeweils 8, 10 bzw. 12 mm. Für die Bestimmung der Schubmoduln unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wurden die Prüfkörper bei 45, 65, 85 und 95% relativer Luftfeuchte vorklimatisiert. Zehn bis fünfzehn Prüfkörper wurden pro Klimastufe und Dimension geprüft. Die Bestimmung der Rohdichte und der Holzfeuchte erfolgte nach DIN52182 (1976-09) und ISO3130 (1975-11) an Zwillingsproben. Die Zwillingsprobenpaare wurden dem Ausgangsmaterial als direkt benachbarte Prüfkörper entnommen. Zur Gewährleistung eines optimalen Kontaktes zwischen der Probe und dem Messsensor wurde auf die Prüfkörper als Kopplungsmittel Ultragel aufgetragen. Ein konstanter Anpressdruck der Proben an den Messköpfen wurde durch die Einspannvorrichtung sichergestellt.

Da die Schalllaufzeiten für unterschiedliche Probendicken ermittelt wurden, konnte die Schallgeschwindigkeit direkt mittels linearer Regression bestimmt werden (s. Abb. 2). Folglich handelt es sich bei den in dieser Arbeit präsentierten Schubmoduln um Absolutwerte. Auf die sonst übliche Angabe der Variationskoeffizienten wird daher verzichtet.



**Abbildung 2.** Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch lineare Regression der Messdaten zur Schalllaufzeit, ermittelt für unterschiedliche Prüfkörperdicken. (Abb. LR Ebene bei einer Holzfeuchte von 16.8%).

Mit den ermittelten Schallgeschwindigkeiten konnten anschliessend die Schubmoduln aus Gl.

9 bestimmt werden:

$$G_{ij} = c_{ij}^2 \cdot \rho \quad (9)$$

wobei:

- $G_{ij}$  Schubmodul [ $N/mm^2$ ]
- $c_{ij}$  Schallwellengeschwindigkeit [ $m/s$ ]
- $\rho$  Dichte [ $g/mm^3$ ]
- $i$  Fortpflanzungsrichtung der Transversalwelle
- $j$  Schwingungsrichtung der Transversalwelle

## **4.2.2 Druckversuch und Zugversuch**

### **4.2.2.1 Material und Methoden**

Die Prüfungen unter Druckbelastung wurden abweichend von der DIN52185 (1976-09) und der DIN52192 (1979-05) an quaderförmigen Proben mit den Abmassen von 15mm x 15mm x 45mm durchgeführt.

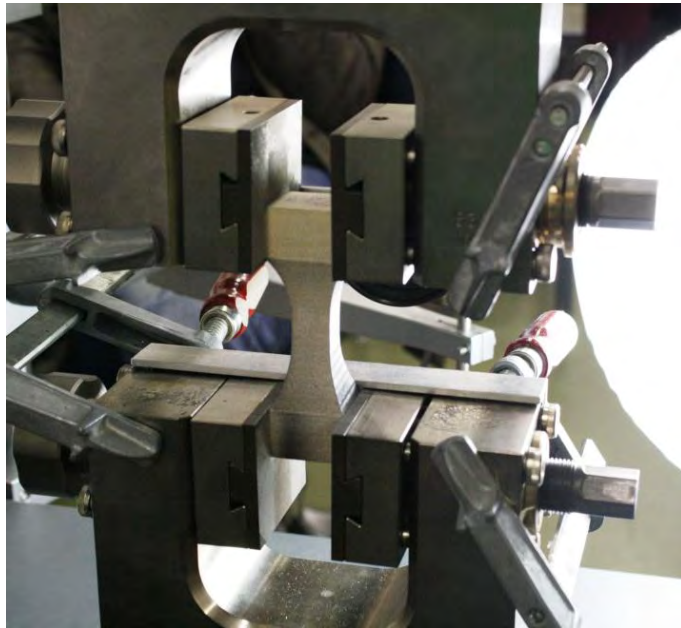
Für die Untersuchungen zum Verhalten von Buchenholz unter Zugbelastung wurden zwei unterschiedliche Probengeometrien ausgewählt. Die Zugversuche mit Belastungsrichtung parallel zur Faserrichtung wurden gemäß Standard DIN52188 (1979-05) durchgeführt. Da keine Normen für die Zugprüfung von Vollholz quer zur Faser existieren, wurden für die Belastung in radialer und tangentialer Richtung speziell „Knochenproben“ angefertigt (Abb.3). Ähnliche Probengeometrien wurden bereits von Keunecke et al. (2008) zur Bestimmung elastischer Eigenschaften unter Zugbelastung erfolgreich verwendet. Die Geometrie des Prüfkörperrohlings ist ein Quader mit den Abmassen 95mm x 30mm x 30mm. Mit einer Oberfräse wird entlang einer angelegten Lehre die allseitige Verjüngung an der Längsseite der Probe eingearbeitet. Die Verjüngung setzt sich aus drei geometrischen Formen zusammen, die nahtlos ineinander übergehen: abgerundet, gerade und wieder abgerundet. Dabei befindet sich die kleinste Querschnittsfläche (15mm x 15mm) im geraden Bereich und stellt durch die dort maximal auftretenden Spannungen eine Sollbruchstelle dar. Dieser Querschnitt entspricht der verwendeten Probengeometrie für die Druckversuche, somit ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus Druck- und Zugversuchen gewährleistet.

Druck- wie auch Zugversuche wurden an darrtrockenen Proben und für vier Feuchtestufen ausgeführt. Dazu wurden die Prüfkörper bei 20°C und jeweils 25, 65, 85 und 95% relative Luftfeuchte vorklimatisiert. Zusätzlich wurden Proben schonend darrgetrocknet.



**Abbildung 3** Prüfkörper für Zugversuche mit Belastung in radialer und tangentialer Richtung (linker Prüfkörper mit Speckle-Muster für die Anwendung der DIC-Methode)

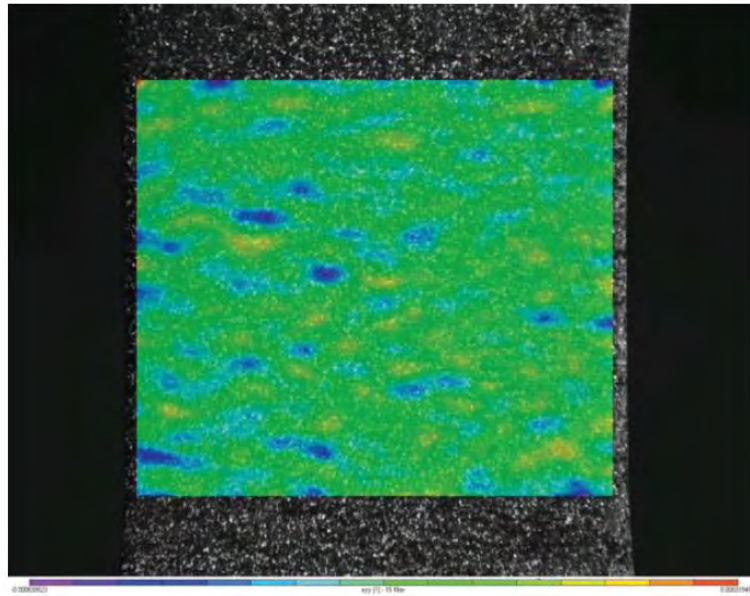
Die Druckversuche parallel zur Faser wurden in Anlehnung an die DIN52185 (1976-09) durchgeführt, die Untersuchungen senkrecht zur Faser nach DIN52192 (1979-05). Die Prüfung unter Druckbelastung parallel zur Faserrichtung erfolgte an einer Universalprüfmaschine Zwick Z100 mit einer 100kN-Kraftmessdose. Die Untersuchungen in radialer und in tangentialer Richtung wurden an einer Zwick Z10 Universalprüfmaschine mit einer Kraftmessdosenkapazität von 10kN durchgeführt. Zur Vermeidung von Biegemomenten wurde die Prüfmaschine mit einem Gelenkeinsatz zwischen Kraftmessdose und Druckplatte versehen. Analog zu den Druckversuchen wurden die Prüfungen auf Zug in longitudinaler Richtung an der Universalprüfmaschine Z100 mit einer 100kN-Kraftmessdose realisiert, während die Zugbelastung in radialer und tangentialer Richtung an der Universalprüfmaschine Zwick Z10 durchgeführt wurden.



**Abbildung 4** Messaufbau des Zugversuchs mit Belastung in radialer und tangentialer Richtung.

Die Dehnungen der Proben unter Druck- bzw. Zugbelastung wurden mittels Methode der digitalen Bildkorrelation erfasst. Dazu wurde eine CCD-Kamera mit der maximalen Auflösung von 2048 x 2048 Pixel installiert. Während des Versuches werden, mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als 1 Hz, von der Probenoberfläche Fotografien aufgenommen und gespeichert. Die Verschiebungen des applizierten, kontrastreichen Zufallsmusters (Speckle Muster) auf der Prüfkörperoberfläche werden in der Software VIC-2D (Video Image Correlation) über die Methode der Kreuzkorrelation zweier Bilder bei unterschiedlichen Belastungsstufen berechnet.

Für ein zweidimensionales Dehnungsfeld (s. Abb. 5) werden in der Software die jeweiligen Dehnungskomponenten bestimmt.



**Abbildung 5** Dehnungsverteilung der Hauptdehnung in Belastungsrichtung eines Prüfkörpers im Druckversuch.

Hierzu musste auf alle Proben im Vorfeld ein hauchdünnes und kontrastreiches Speckle-Muster unter Verwendung einer Airbrush-Pistole mit pigmentierter Acryl-Farbe aufgetragen werden (s. Abb. 3). Eine weiße Grundierung und anschließendes Auftragen von schwarzen Speckles lieferten ein heterogenes, zufälliges und hochauflösendes Graustufenmuster.

#### **4.2.2.2 Bestimmung der Elastizitätsmoduln und der Poissonzahlen**

Für eine elastische Druck- oder Zugbelastung stellt das Elastizitätsmodul  $E$  das Verhältnis aus aufgebrachtter Spannung  $\sigma$  und resultierender Dehnung  $\varepsilon$  dar. Folglich kann das Elastizitätsmodul  $E$  (Anstieg im Spannungs-Dehnungs-Diagramm) aus Gleichung 10 identifiziert werden:

$$E_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\varepsilon_i} = \frac{\sigma_{i,2} - \sigma_{i,1}}{\varepsilon_{i,2} - \varepsilon_{i,1}}, \quad i \in R, L, T. \quad (10)$$

In Anlehnung an die gebräuchlichen Normen wurde das E-Modul im linearen Bereich zwischen 10-40% der zu erwartenden maximalen Festigkeit ermittelt. Die maximale Festigkeit wurde im Vorversuch bestimmt. Beispielhaft ergibt sich für den Druckversuch ein Messbereich in Radialrichtung zwischen  $F_1=150\text{N}$  und  $F_2=300\text{N}$ , in Tangentialrichtung zwischen  $F_1=250\text{N}$  und  $F_2=750\text{N}$  und in longitudinale Richtung zwischen  $F_1=1500\text{N}$  und  $F_2=3800\text{N}$ .

Die Poissonzahlen wurden im linear elastischen Bereich (entspricht dem Bereich der E-Modul Bestimmung) aus Gleichung 10 bestimmt:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_j}, \quad i, j \in R, L, T \quad \text{and} \quad i \neq j \quad (11)$$

i– Belastungsrichtung

j – Querkontraktionsrichtung

#### **4.2.2.3 Bestimmung der Festigkeiten**

Für die Beschreibung des Festigkeitsverhaltens ist die Kenntnis der maximal ertragbaren Beanspruchung eines Werkstoffes notwendig. Im Falle der Zugbeanspruchung wurde die Festigkeit als die Bruchspannung  $\sigma_{\max}$ , welche beim Zugversagen der Probe auftritt, definiert.

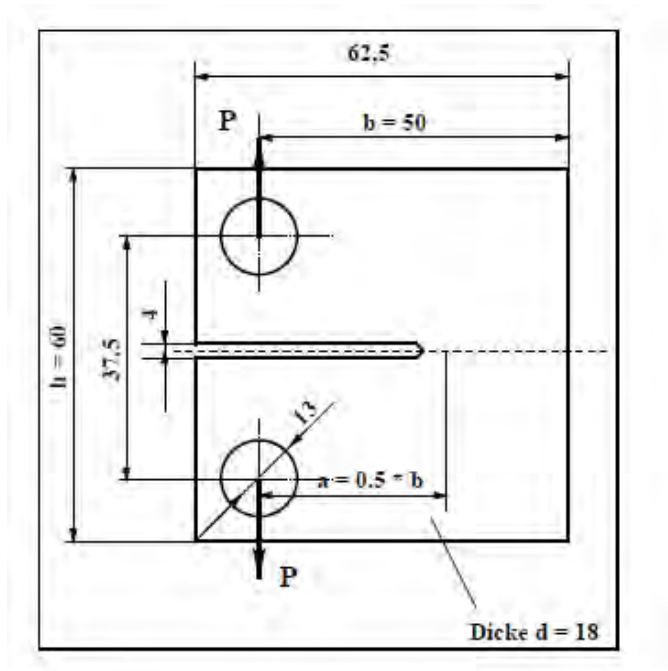
Da im Druckversuch in radialer und tangentialer Richtung keine maximale Spannung messbar ist, wurde für diese Richtungen die technische Spannung  $\sigma_{0,2\%}$  als Festigkeitskennwert angegeben. Bei dieser Spannung weist die Zugprobe nach ihrer Entlastung eine bleibende Dehnung von 0.2% auf. Bestimmt wird diese im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Hilfe von einer Parallelen zur Geraden am Kurvenanfang durchgehend durch den Punkt von 0.2% Dehnung. Praktisch entspricht die technische

Spannung der Fließgrenze und beschreibt den Übergang zwischen dem linear elastischen und dem plastischen Bereich.

Um einen Vergleich zwischen der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit in radialer und tangentialer Richtung zu ermöglichen, wurden ferner die technischen Spannungen bei Zugbelastung ermittelt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung durch die bei der Bruchspannung auftretende Bruchdehnung ( $\epsilon_{\max}$ ) ergänzt. Die Messung der Druck- und Zugfestigkeit wurde, in Analogie zu den elastischen Versuchen, an den gleichen Proben, unter Einhaltung der klimatischen Bedingungen, mit der gleichen Messtechnik durchgeführt.

#### **4.2.3 Zugversuch an Kompaktproben (CT)**

In Anlehnung an die ASTM E399-90 (1997) für die Prüfung von metallischen Werkstoffen wurden Versuche zur Bestimmung der Bruchzähigkeit an CT-Proben durchgeführt (Abb. 6). Die Umsetzung erfolgte an der Prüfmaschine SCHENCK. Ermittelt wurden die Bruchzähigkeiten in RL-, RT-, TL- und TR-Richtung. Analog zu den Ultraschallversuchen wurde die Holzfeuchte variiert. Die Untersuchungen wurden an Proben mit vier unterschiedlichen Holzfeuchten (7.8%, 11.2%, 14.4% und 16.9%) durchgeführt.



**Abbildung 6** Versuchsprobe zur Bestimmung der Bruchzähigkeit nach ASTM E 399

Die Rissaufweitung erfolgte mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,1 mm/min. Während des Versuchs wurden maschinenintern die Lastsignale und die Aufweitung der Kerbe, bezeichnet als sogenannte „Crack Opening Displacement (COD)“, mit einem Wegaufnehmer („clip on-gage“) gemessen.

Nach ASTM E399-90 (1997) wurde der Proportionalitätsbereich im Last-Kerbaufweitungs-Verlauf bei 5%...95% ermittelt. Die kritische Kraft  $P_Q$  (äquivalent der instabilen Rissausbreitung) wurde bei 95% der Last bestimmt. Die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) wurde anschließend über die Gleichung 12 ermittelt:

$$K_{IC} = \frac{P_Q}{d \cdot \sqrt{b}} \cdot f(a/W), \quad (12)$$

wobei

$d$  Probendicke

$a$  Risslänge

$b$  Probenweite (50 mm)

(s. Abb. 6),

und die Geometriefunktion  $f(a/W)$  wie folgt bestimmt:

$$f(a/W) = (2 + a/W) \cdot \frac{0.886 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4}{(1 - a/W)^{1.5}} \quad (13)$$

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Feuchteabhängige elastische Eigenschaften

#### 5.1.1 Schubmoduln mittels Ultraschall-Messmethode

Zur Ermittlung der Schubmoduln wurde das Material mit Transversalwellen durchschallt. Über die gemittelten Schallgeschwindigkeiten konnten anhand der Gleichung (9) die jeweiligen Schubmoduln berechnet werden. Über die verschiedenen Ausrichtungen der Probe zwischen den Schallköpfen wurden sechs Kombination der Durchschallung gemessen, sodass für die Auswertung (Tab.1) zwei Schallgeschwindigkeiten pro Symmetrieebene (z.B. LR und RL) verfügbar waren. Bei Durchschallung in LR-Richtung erfolgt die Schallausbreitungsrichtung in longitudinaler Richtung, die Richtung der Polarität.

Es wurde eine eindeutige Abhängigkeit des Schubmoduls von der Prüfrichtung ( $G_{LR} > G_{LT} > G_{RT}$ ) festgestellt (Abb.7). Generell stehen die einzelnen Richtungen LR:LT:RT in einem Verhältnis von ca. 3:2:1. Die Abweichungen der Schallgeschwindigkeiten der zueinander korrespondierenden Schallausbreitungsrichtungen, z.B. für Durchschallungen in LR- und RL-Richtung, bestimmt für verschiedene Holzfeuchte-Stufen, ist vergleichsweise gering. Dies entspricht den Angaben nach Bucur (2006) für zerstreutporige Laubhölzer. Die maximale Abweichung der Schallgeschwindigkeit über alle Klimastufen liegt in der LR/RL Richtung bei 12.6%, in der LT/TL Richtung bei 13.9% und in der RT/TR Richtung bei 5%. Ähnliches wurde auch von Bucur (2006) und Hering et al. (2011) berichtet.

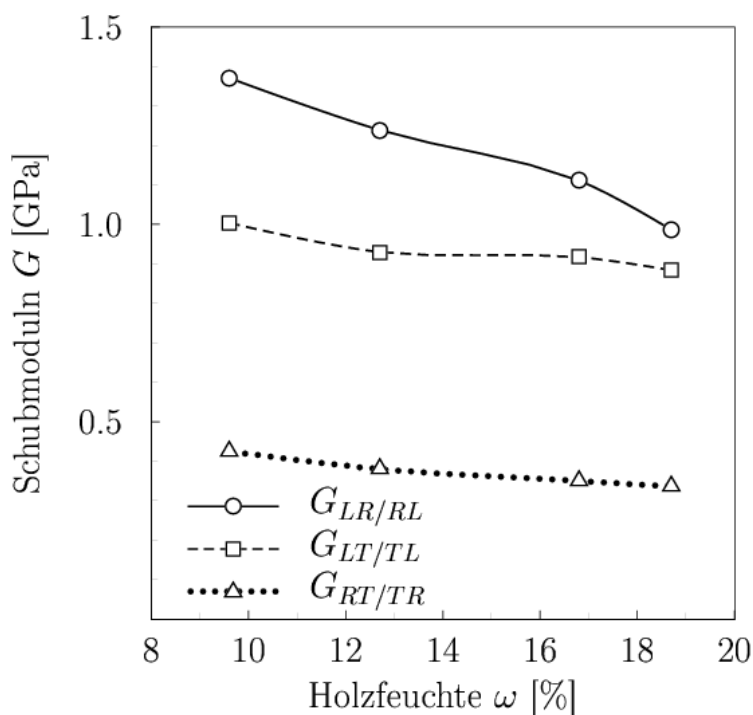
Die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchung zeigen einen deutlichen Einfluss der Holzfeuchte auf die G-Moduln von Buchenholz. Für alle sechs Durchschallungsrichtungen wurde mit zunehmender Holzfeuchte eine Abnahme der Schallgeschwindigkeiten, respektive der Schubmoduln, festgestellt (Tab.1).

**Tabelle 1** Ultraschallgeschwindigkeiten und G-Moduln für Buche in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

$\omega$ [%]	Schallgeschwindigkeit						G-Modul		
	$c_{LR}$	$c_{RL}$	$c_{LT}$	$c_{TL}$	$c_{RT}$	$c_{TR}$	$G_{LR/RL}$	$G_{LT/TL}$	$G_{RT/TR}$
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
9.6	1485	1335	1133	1281	786	785	1.37	1.01	0.43
12.7	1413	1269	1084	1239	754	731	1.24	0.93	0.38
16.8	1395	1130	1038	1256	727	689	1.11	0.91	0.35
18.7	1166	1219	1042	1216	733	659	0.98	0.85	0.33

$\omega$  = Holzfeuchte

Der Anstieg der Holzfeuchte von 9.6 % auf 18.7% beispielsweise resultiert in einer Verringerung der Moduln um 15.9 % für  $G_{LT}$  und 28 % für  $G_{LR}$ . Die Schubmoduln als Funktion der Holzfeuchte sind ebenfalls in Abb. 7 dargestellt.



**Abbildung 7** Feuchteabhängige Schubmoduln für Rotbuchenholz

### 5.1.2 Elastizitätsmodul und Poisson Zahlen

Die feuchteabhängigen Elastizitätsmoduln sind in Tab. 2 und Tab. 3 zusammengefasst. Ähnlich den Schubmoduln zeigen auch die E-Moduln, in allen drei anatomischen Richtungen, eine deutliche Abhängigkeit von der Holzfeuchte. Generell, sowohl unter Druck- wie auch unter Zugbelastung, nehmen die E-Moduln mit steigender Holzfeuchte (0% bis 16.3 %) kontinuierlich ab (s. Abb. 8, Abb. 9). Zwischen 0% und 16.3% Holzfeuchte beträgt die gemessene Verringerung der Moduln unter Zugbelastung 37 % für  $E_L$  und  $E_T$ , und 34% für  $E_R$ , unter Druckbelastung entsprechend 30% für  $E_L$ , 47% für  $E_R$  und 44% für  $E_T$ .

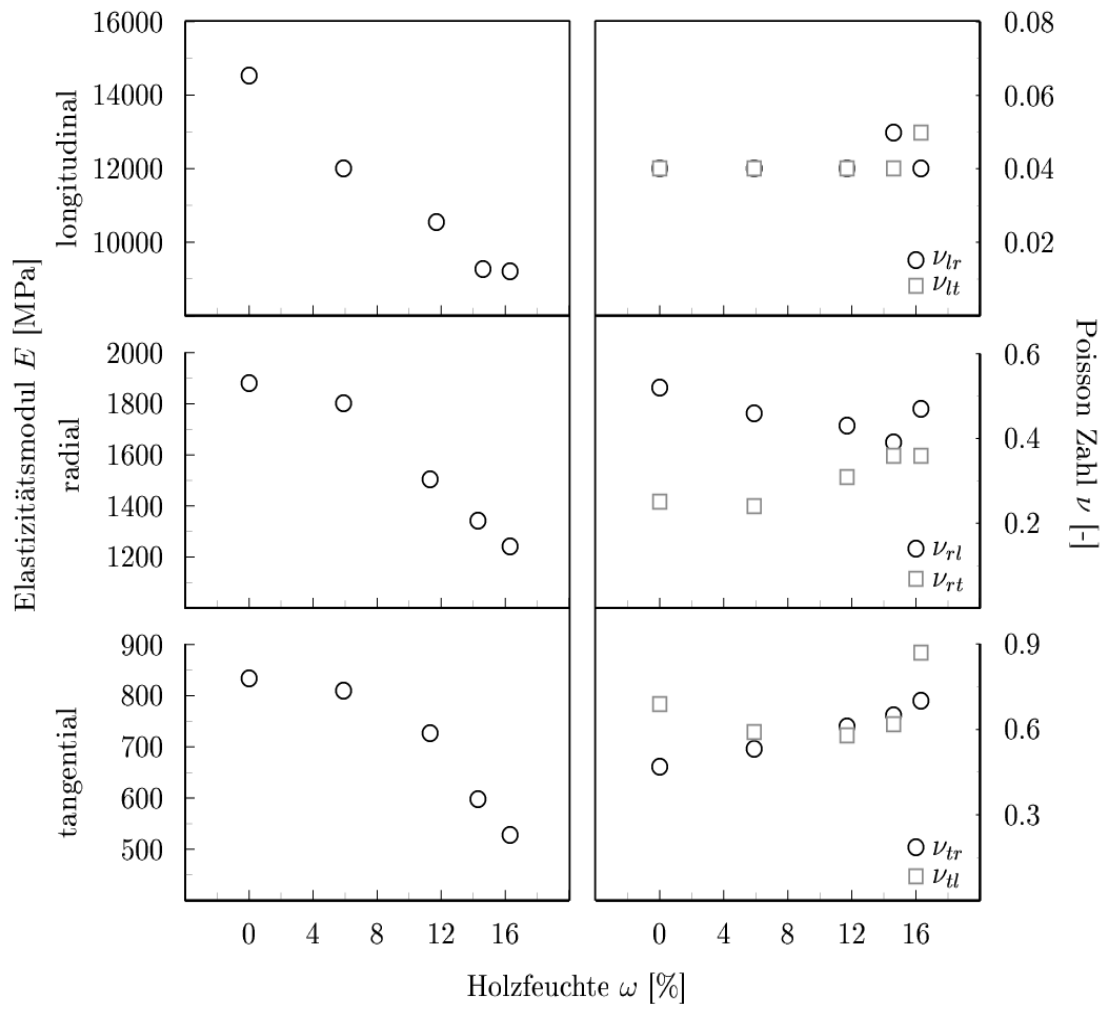
In radialer und tangentialer Richtung wird für beide Belastungsarten bei niedrigen Holzfeuchten eine Abschwächung dieser Tendenz beobachtet. Bei Zugbelastung parallel zum Faserverlauf wird hingegen auch zwischen 0% und 6% Holzfeuchte ein steiler Abfall des E-Moduls gemessen. Die Belastung der Probe auf Druck in Faserrichtung zeigt ein ganz anderes Verhalten auf. Hier wird der maximale E-Modul bei einer Holzfeuchte von 5.9% gemessen, für darrtrockene Prüflinge fällt der E-Modul ab.

Entgegen der allgemeinen Annahme, E-Moduln aus Zug- und Druckversuchen sind gleich, zeigt die Gegenüberstellung der Messergebnisse eine Abhängigkeit der E-Moduln von der Belastungsart. Diese Tendenz zeichnet sich besonders in den Ergebnissen zu niedrigen Holzfeuchten ab. Im Schnitt sind die E-Moduln aus den Druckversuchen 5-15 % höher als jene aus den Zugversuchen. Bei höheren Holzfeuchten sind die Unterschiede marginal und die Aussagekräftigkeit deshalb gering.

**Tabelle 2** Feuchteabhängige Elastizitätsmoduln und Poisson Zahlen für Rotbuchenholz bei Zugbelastung

$\omega$ [%]		$E_L$	$E_R$	$E_R$	$\nu_{LR}$	$\nu_{RL}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{RT}$	$\nu_{TR}$
		[GPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0	$\bar{x}$	14537	1881	834	0.04	0.52	0.04	0.69	0.25	0.47
	Var [%]	13	5	13	56	22	15		34	6
	n	10	10	9						
5.9	$\bar{x}$	12021	1800	810	0.04	0.43	0.04	0.59	0.24	0.53
	Var [%]	14	6	11	38	19	47		12	4
	n	11	10	10						
11.3	$\bar{x}$	10559	1505	727	0.04	0.43	0.04	0.58	0.31	0.61
	Var [%]	12	8	10	42	17	41		9	6
	n	23	30	32						
14.3	$\bar{x}$	9272	1344	598	0.05	0.39	0.04	0.62	0.36	0.65
	Var [%]	12	10	9	52	17	32		8	7
	n	10	17	15						
16.3	$\bar{x}$	9199	1242	527	0.04	0.47	0.05	0.87	0.36	0.70
	Var [%]	19	13	6	19	21	40		7	5
	n	8	17	16						

Var = Variationskoeffizient; n = Probenanzahl;  $\bar{x}$  = Mittelwert



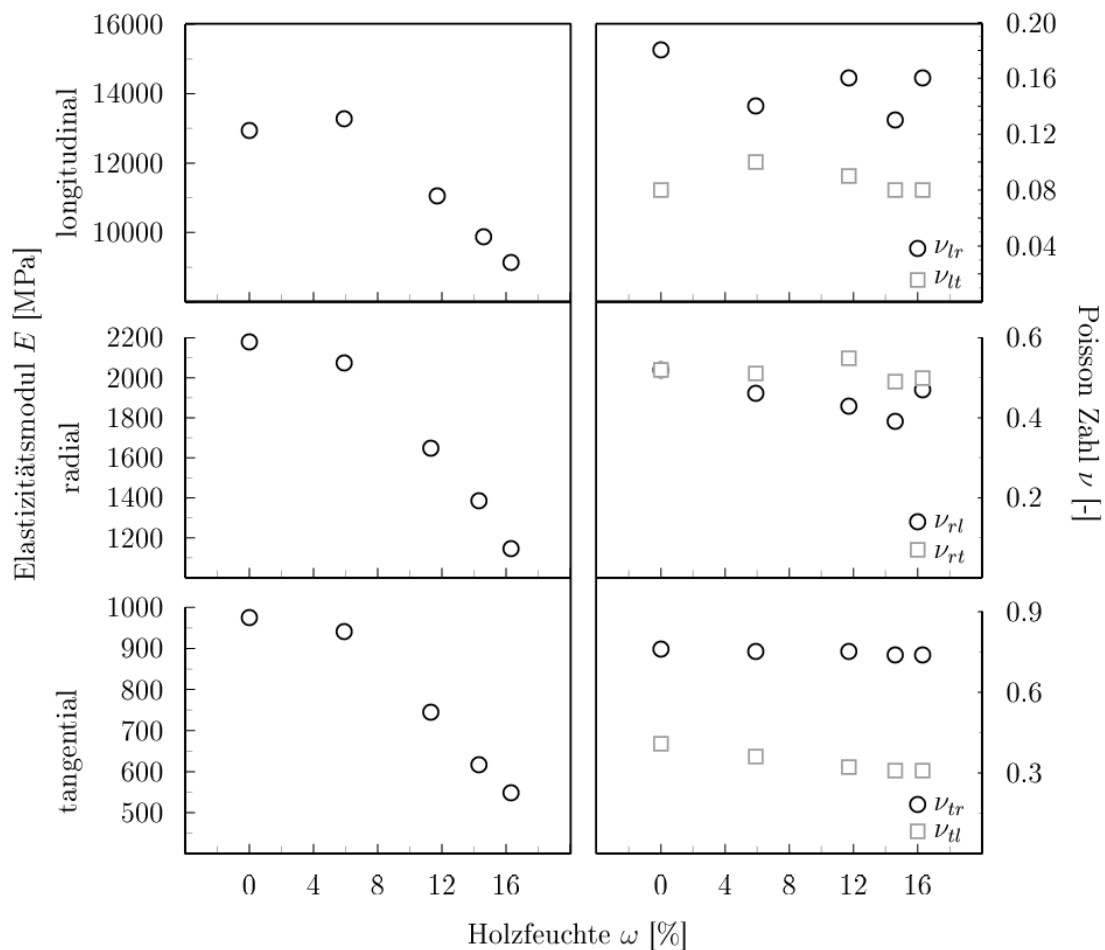
**Abbildung 8** Feuchteabhängige Elastizitätsmoduln und Poisson Zahlen für Rotbuchenholz bei Zugbelastung

**Tabelle 3** Feuchteabhängige Elastizitätsmoduln und Poisson Zahlen für Rotbuchenholz bei Druckbelastung

$\omega$ [%]		$E_L$ [GPa]	$E_R$ [GPa]	$E_R$ [GPa]	$\nu_{LR}$ [-]	$\nu_{RL}$ [-]	$\nu_{LT}$ [-]	$\nu_{TL}$ [-]	$\nu_{RT}$ [-]	$\nu_{TR}$ [-]
0	$\bar{x}$	12947	2177	979	0.18	0.52	0.08	0.57	0.41	0.76
	Var [%]	13	6	9	46	39	48	15	7	0.08
	n	10	9	8						
5.9	$\bar{x}$	13274	2073	942	0.14	0.51	0.10	0.61	0.36	0.75
	Var [%]	16	7	8	67	58	40	21	6	3
	n	12	9	9						
11.3	$\bar{x}$	11057	1649	745	0.16	0.55	0.09	0.51	0.32	0.75
	Var [%]	23	11	9	49	40	42	28	23	5
	n	24	30	22						
14.3	$\bar{x}$	9883	1387	618	0.13	0.49	0.08	0.59	0.31	0.74
	Var [%]	22	12	10	57	44	32	27	13	4
	n	17	14	14						
16.3	$\bar{x}$	9135	1143	549	0.16	0.50	0.08	0.50	0.31	0.74
	Var [%]	23	13	10	18	43	32	18	12	6
	n	16	14	13						

Var = Variationskoeffizient; n = Probenanzahl;  $\bar{x}$  = Mittelwert

Die feuchteabhängigen Poisson Zahlen sind in Tab. 2 (Zugbelastung) und Tab. 3 (Druckbelastung) zusammengefasst. Über den Einfluss der Holzfeuchte auf die Poisson Zahlen kann, anders als bei den Moduln keine eindeutige Aussage getroffen werden, da die Poisson Zahlen, sowohl aus den Zug- als auch aus den Druckversuchen, über den gemessenen Holzfeuchtebereich nahezu konstant bleiben. Mit zunehmender Holzfeuchte werden für die Poisson Zahlen nur teilweise zu- oder abnehmende Werte beobachtet (s. Abb. 8, Abb. 9). Die Poisson Zahlen  $\nu_{LR}$  und  $\nu_{LT}$  sind in geringem Mass sensitiv gegenüber dem Einfluss der Holzfeuchte.



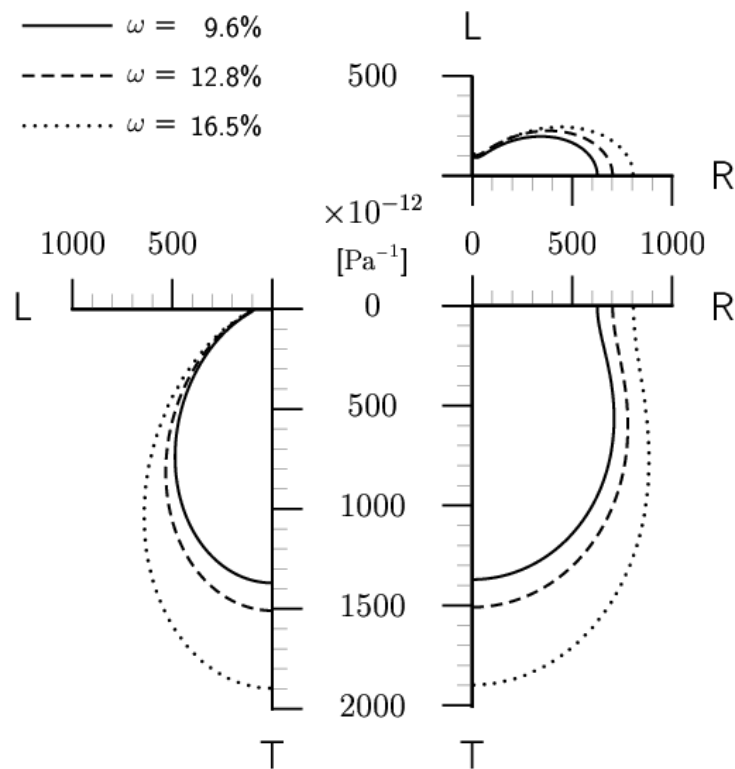
**Abbildung 9** Feuchteabhängige Elastizitätsmoduln und Poisson Zahlen für Rotbuchenholz bei Zugbelastung

Ähnlich den Beobachtungen der E-Modul-Auswertung wird für die Poisson Zahlen eine Abhängigkeit von der Belastungsart festgestellt. Aus den Druckversuchen wurden höhere Werte als bei Belastung auf Zug gemessen. Die unter Druckbelastung bestimmten Poisson Zahlen  $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{TR}$ ,  $\nu_{RT}$  und  $\nu_{RL}$  sind nur wenig von der Holzfeuchte beeinflusst. Im Gegensatz dazu werden unter Zugbelastung, mit steigender Holzfeuchte, für die Poisson Zahlen  $\nu_{TR}$  respektive  $\nu_{RT}$  steigende und für  $\nu_{RL}$  fallende Werte ermittelt.

### **5.1.3 Visualisierung des feuchteabhängigen, linear elastischen Verhaltens von Buchenholz**

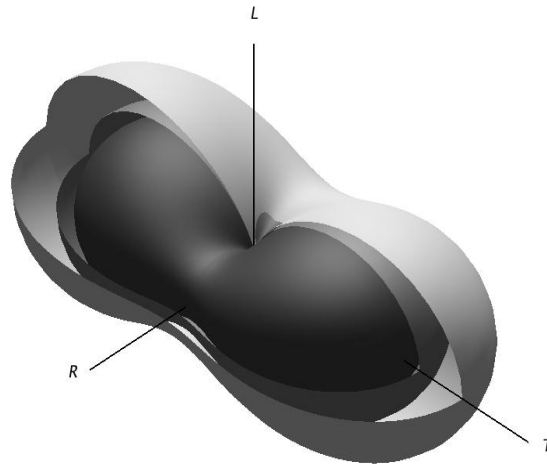
Für ein besseres Verständnis der Materialcharakteristik werden die richtungsabhängigen, elastischen Eigenschaften mit Hilfe von sogenannten "Deformationskörpern" visualisiert. Dazu werden die Messergebnisse einer Tensor-Transformation unterzogen. Die genaue Prozedur ist in Grimsel (1999) näher beschrieben. In Polardiagrammen (s. Abb. 10) werden die Resultate für die verschiedenen Hauptebenen dargestellt, wobei die einzelnen Funktionen das Maß für die Deformation bei einer normierten Belastung darstellen.

In dem vorliegenden Beispiel (Abb. 10) ist ein Polardiagramm für Buche unter Zugbelastung bei drei unterschiedlichen Holzfeuchten dargestellt. Die Ermittlung der Schubmoduln und E-Moduln erfolgte nicht für identische Holzfeuchtestufen. Daher wurden die einzelnen Messwerte für die Darstellung im Polardiagramm für Buchenholz interpoliert. Die im Polardiagramm angegebenen Holzfeuchtestufen stellen einen Mittelwert dar. Eine zunehmende Deformation ist in allen Ebenen mit ansteigender Holzfeuchte zu beobachten.



**Abbildung 10** Nachgiebigkeit von Rotbuchenholz unter Zugbelastung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung und der Holzfeuchte im Polardiagramm

Die dreidimensionale Visualisierung der feuchteabhängigen Nachgiebigkeit von Buchenholz in Abb. 11 veranschaulicht den Einfluss der Holzfeuchte auf das elastische Verhalten. Sie zeigt die unterschiedlichen Steifigkeiten in den Hauptrichtungen, deren Relationen zueinander sowie die Kennwerte mit beliebigem Richtungsvektor im orthotropen System. Die innerste (geschlossene) Funktion stellt die Messdaten bei 9.6% Holzfeuchte dar und entspricht der geringsten Nachgiebigkeit. Die aufgeschnittenen Funktionen entsprechen der Nachgiebigkeit bei 12.8 % und 16.5%.



**Abbildung 11** Nachgiebigkeit von Rotbuchenholz unter Druckbelastung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung und der Holzfeuchte in dreidimensionaler Darstellung.

## 5.2 Feuchteabhängige Festigkeitseigenschaften

### 5.2.1 Zug- und Druckfestigkeit

Einen Überblick über die ermittelten Festigkeitswerte für verschiedene Holzfeuchten geben die Tabelle 4 und die Tabelle 5. Deutlich erkennbar ist eine signifikante Abhängigkeit des Festigkeitsverhaltens von der Holzfeuchte. Sowohl die Zug- wie auch die Druckfestigkeit von Holz nimmt mit steigender Holzfeuchtigkeit in allen drei Holzrichtungen ab. Besonders gut ersichtlich ist diese Abhängigkeit der Festigkeiten von den klimatischen Bedingungen aus der Abbildung 12. Die Resultate zeigen einen nahezu linearen Anstieg der Zugfestigkeit mit abnehmender Holzfeuchte. Die maximale Zugfestigkeit wird bei 5.9% Holzfeuchte festgestellt. Im darrtrockenen Zustand liegen die ermittelten Festigkeiten unterhalb der bei 5.9% ermittelten Werte.

**Tabelle 4** Zug-Festigkeitswerte für Rotbuchenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

$\omega$ [%]		L		R			T		
		$\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{\max}$ [%]	$\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0,2\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{\max}$ [%]	$\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0,2\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{\max}$ [%]
0	$\bar{x}$	105.15	0.80	17.86	16.04	0.92	8.92	8.35	1.07
	CoV[%]	20.40	12.37	2.82	5.62	6.3	15.6	19.05	12.12
5.9	$\bar{x}$	115.31	0.98	21.39	18.15	1.38	11.39	8.76	1.76
	CoV[%]	24.45	10.33	4.40	6.94	5.10	16.77	7.54	10.6
11.3	$\bar{x}$	96.66	1.06	19.48	14.72	1.73	8.88	6.95	1.80
	CoV[%]	28.37	19.27	9.91	15.28	12.61	18.42	6.58	27.80
14.3	$\bar{x}$	83.56	1.13	17.05	12.54	1.99	7.75	6.09	1.89
	CoV[%]	16.89	14.20	9.48	11.51	25.43	10.29	7.66	24.56
16.3	$\bar{x}$	80.57	1.11	15.64	10.93	2.06	7.25	5.85	1.93
	CoV[%]	17.32	20.03	11.91	10.52	21.34	11.83	5.19	25.05

$\omega$  = Holzfeuchte;  $\bar{x}$  = Mittelwert; Var = Variationskoeffizient;  $\sigma_{\max}$  = Bruchspannung,  $\varepsilon_{\max}$  = Dehnung bei  $\sigma_{\max}$

$\sigma_{0,2\%}$  = Spannung bei 0,2% Dehnung ; L=Longitudinal, R=Radial, T=Tangential

**Tabelle 5** Druck-Festigkeitswerte für Rotbuchenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

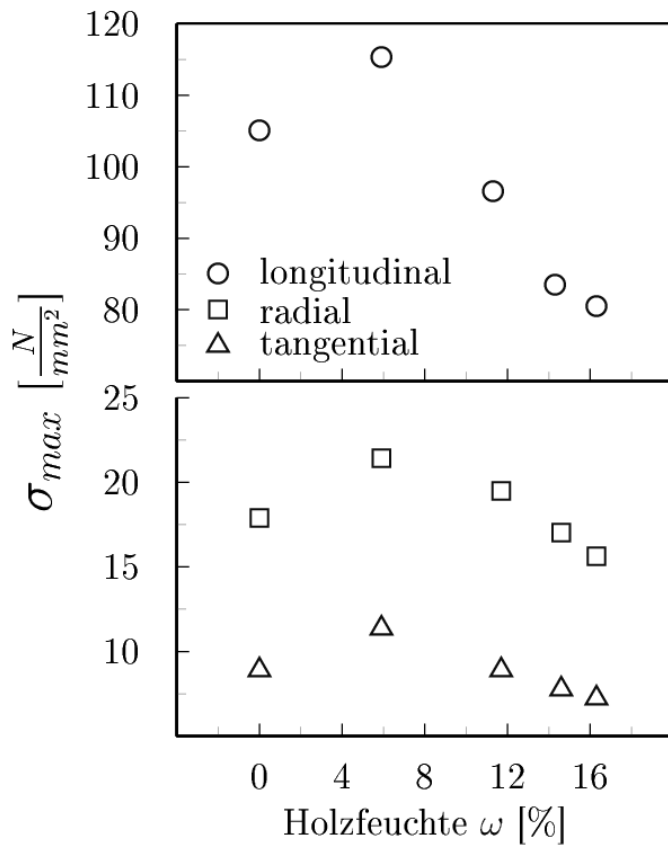
$\omega$ [%]		L		R	T
		$\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\max}$ [%]	$\sigma_{0,2\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{0,2\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	$\bar{x}$	86.4	1.35	16.62	8.50
	CoV[%]	13.52	27.05	7.98	6.54
5.9	$\bar{x}$	68.90	1.21	14.41	7.68
	CoV[%]	6.49	19.50	3.35	6.15
11.3	$\bar{x}$	45.00	1.00	10.98	6.09
	CoV[%]	7.91	24.75	7.96	4.89
14.3	$\bar{x}$	36.38	0.89	9.28	4.85
	CoV[%]	12.14	26.77	8.64	4.25
16.3	$\bar{x}$	31.66	0.75	8.07	4.45
	CoV[%]	10.78	26.51	8.89	5.68

$\omega$  = Holzfeuchte;  $\bar{x}$  = Mittelwert; Var = Variationskoeffizient;  $\sigma_{\max}$  = Bruchspannung;  $\epsilon_{\max}$  = Dehnung bei  $\sigma_{\max}$ ;  $\sigma_{0,2\%}$  = Spannung bei 0,2% Dehnung; L = longitudinal, R = radial, T = tangential

Zudem wird an den Ergebnissen aus den Zugversuchen mit steigender Holzfeuchte ein zunehmend duktiles Verhalten des Buchenholzes beobachtet, identifizierbar an den steigenden Bruchdehnungen. Im Vergleich zu den darrtrockenen Proben, auf Zug belastet in radialer und tangentialer Richtung, sind die Bruchdehnungen für die Proben mit einer Holzfeuchte von 16.3% annähernd doppelt so hoch.

Bei den Druckversuchen ist in radialer und tangentialer Richtung kein Bruchversagen zu beobachten, daher wird für diese Richtungen hier die Ingenieursfestigkeit angegeben. Anders als bei der Zugfestigkeit wird für die Druckprüfung die maximale Festigkeit im darrtrockenen Zustand festgestellt. Mit steigender Holzfeuchte wird, im Vergleich zur Zugfestigkeit, ein stärkerer Abfall in den Druckfestigkeiten beobachtet.

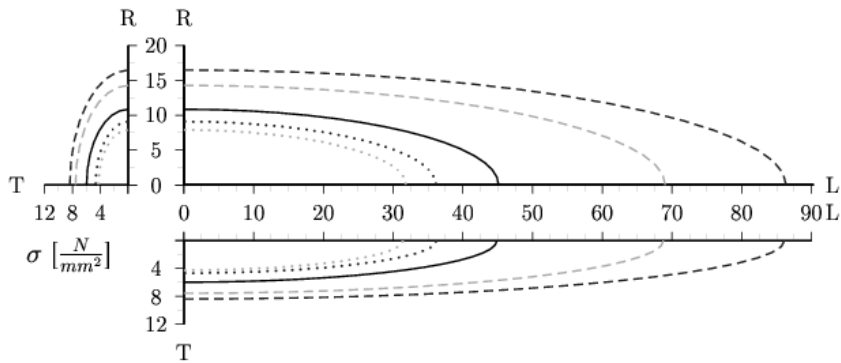
Während ein Rückgang der Holzfeuchte von 16.3% auf 0% zu einer Reduktion der Druckfestigkeit um 63% führt, ist die Zugfestigkeit (im Bereich von 16.3-5.9% Holzfeuchte) um 30% in longitudinaler, 26% in radialer und 36% in tangentialer Richtung reduziert.



**Abbildung 12** Zugfestigkeit  $\sigma_{max}$  für Rotbuchenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

Für einen direkten Vergleich der Zug- und Druckfestigkeiten in allen Anisotropierichtungen wurden auch aus den Zugversuchen die Zug-Ingenieursfestigkeiten in radialer und tangentialer Richtung ermittelt. Abb. 13 zeigt für Buchenholz die Abhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit von der Holzfeuchte in den drei Symmetrieebenen. Neben den Festigkeiten in den Haupttrichtungen sind auch die Werte zwischen den Anisotropieachsen angegeben.

## DRUCK



## ZUG

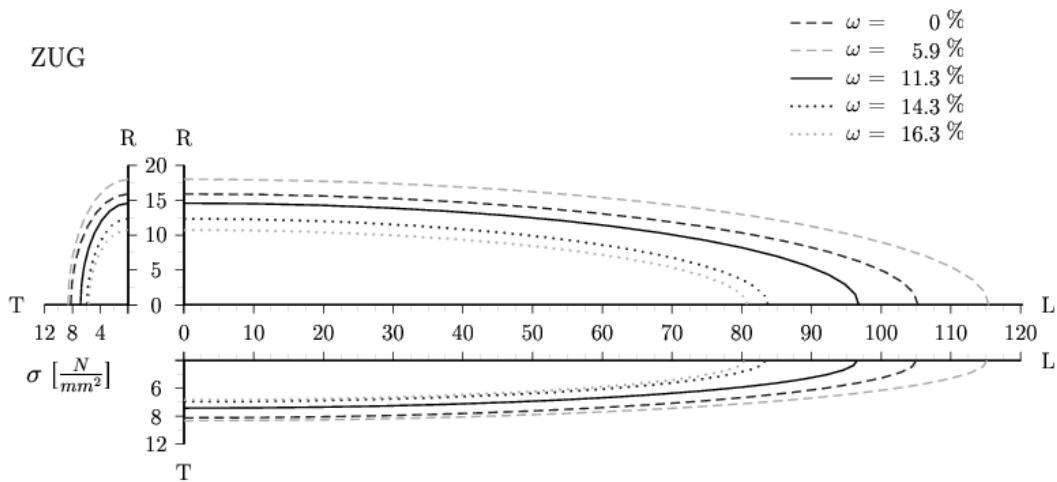


Abbildung 13 Vergleich der feuchteabhängigen Zug- und Druckfestigkeit  $\sigma_{0,2\%}$  für Rotbuchenholz

### 5.2.2 Bruchzähigkeit in Abhängigkeit der Holzfeuchte

Die Ergebnisse der feuchteabhängigen Bruchzähigkeitsversuche sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die kritische Kraft  $P_Q$ , welche die Rissinitierung definiert, nimmt mit ansteigender Holzfeuchte in allen Symmetrieebenen ab. Dabei liegen die in den RT- und RL-Ebenen gemessenen Bruchzähigkeiten über denen in der TL- bzw. TR-Richtung. Dieser Unterschied könnte auf den Einfluss der Holzstrahlen zurückgeführt werden, da die radial verlaufenden Holzstrahlen zu einer Erhöhung der Festigkeit bei radial einwirkender Kraft (RL- und RT-Ebene) beitragen. Generell treten in RL- und RT-Richtung etwa doppelt so hohe

Bruchzähigkeitswerte wie unter tangentialer Krafteinwirkung. Dieser Einfluss der Holzstrahlen auf die Festigkeit wurde unter anderem durch Burgert et al. (1999) gezeigt.

In Abbildung 14 wird der Einfluss der Holzfeuchte auf die Bruchzähigkeit dargestellt. Analog zu den Untersuchungen des linear-elastischen Verhaltens und des Festigkeitsverhaltens nimmt auch die Bruchzähigkeit mit steigender Holzfeuchte ab, wobei die Bruchzähigkeit, bedingt durch den oben erläuterten Zusammenhang von Struktur und Funktion, in TR- und TL-Richtung stärker als in RL- und RT-Richtung von der Holzfeuchte beeinflusst wird.

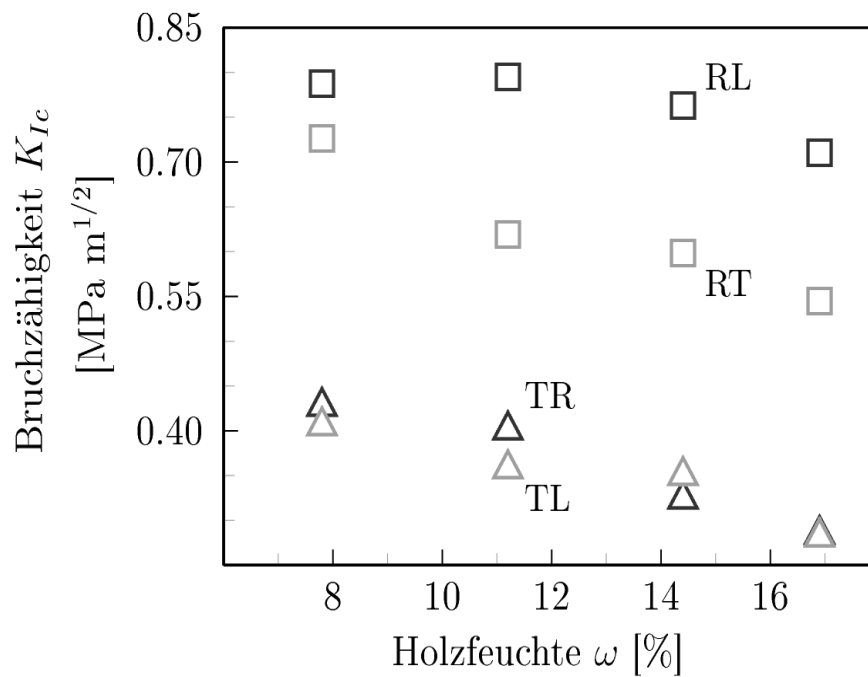


Abbildung 14 Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  für Rotbuchenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

**Tabelle 6** Bruchzähigkeit und kritische Kraft für Rotbuchenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

$\omega$ [%]	Riss- Ausbreitungs- richtung	n		( $P_Q$ ) [N]	( $K_{IC}$ ) [MPa m <sup>1/2</sup> ]
7.8	RL	9	$\bar{x}$	455.67	0.787
			Var [%]	(13.10)	(13.10)
11.2		8	$\bar{x}$	460.00	0.795
			Var [%]	(17.76)	(17.76)
14.4		10	$\bar{x}$	441.70	0.763
			Var [%]	(15.06)	(15.06)
16.9		11	$\bar{x}$	410.82	0.710
			Var [%]	(10.05)	(10.05)
7.8	TL	10	$\bar{x}$	234.90	0.406
			Var [%]	(16.94)	(16.94)
11.2		9	$\bar{x}$	207.00	0.358
			Var [%]	(14.27)	(14.27)
14.4		8	$\bar{x}$	202.50	0.350
			Var [%]	(7.81)	(7.81)
16.9		12	$\bar{x}$	162.58	0.281
			Var [%]	(14.88)	(14.88)
7.8	RT	10	$\bar{x}$	419.90	0.726
			Var [%]	(12.61)	(12.61)
11.2		7	$\bar{x}$	358.29	0.619
			Var [%]	(11.31)	(11.31)
14.4		8	$\bar{x}$	346.00	0.598
			Var [%]	(7.03)	(7.03)
16.9		8	$\bar{x}$	315.25	0.545
			Var [%]	(8.40)	(8.40)
7.8	TR	11	$\bar{x}$	247.27	0.427
			Var [%]	(13.54)	(13.54)
11.2		11	$\bar{x}$	232.09	0.401
			Var [%]	(14.39)	(14.39)
14.4		10	$\bar{x}$	187.30	0.324
			Var [%]	(10.73)	(10.73)
16.9		16	$\bar{x}$	164.13	0.284
			Var [%]	(10.95)	(10.95)

$\omega$  = Holzfeuchte; RL radial-longitudinal, TL tangential-longitudinal, RT radial-tangential, TR tangential-radial, Var = Variationskoeffizient;  $P_Q$  = kritische Kraft (Ende des linear-elastischen Bereiches),  $K_{IC}$  = Bruchzähigkeit

## 6 Zusammenfassung

Für eine Materialbeschreibung sind die elastischen Kennwerte sehr wichtige Kenngrößen. Sie werden zunehmend in mechanischen Materialmodellen berücksichtigt. Auch die Festigkeiten sind für eine Materialbeschreibung von großer Bedeutung. Bei Holzmaterialien werden sowohl die elastischen Kennwerte wie auch die Festigkeiten stark von der Holzfeuchte beeinflusst. Daher ist es notwendig diese Größen in Abhängigkeit der

Feuchte zu ermitteln. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im Speziellen mit der Charakterisierung des elastischen Verhaltens und der Festigkeitseigenschaften von Rotbuchenholz unter der Einwirkung verschiedener klimatischer Bedingungen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen den signifikanten Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf das mechanische Verhalten von Rotbuchenholz. Sie belegen, dass die elastischen wie auch die Festigkeitseigenschaften stark von der Holzfeuchte abhängig sind. Mit steigender Holzfeuchte nehmen im Allgemeinen die elastischen Eigenschaften und die Festigkeiten in allen anatomischen Richtungen ab. Dieses konnte sowohl bei Zug- wie auch bei Druckbelastung gezeigt werden.

Die Ergebnisse der Zug- und Druckversuche wie auch der Ultraschallmessung zeigen, dass sowohl der E-Modul als auch der G-Modul in allen drei anatomischen Richtungen des Holzes mit steigender Holzfeuchte kontinuierlich abnehmen. Hingegen kann zwischen den Poisson Zahlen und der Holzfeuchte kein eindeutiger Zusammenhang formuliert werden. Ähnlich den Moduln, nehmen auch die Festigkeiten mit zunehmender Holzfeuchte kontinuierlich ab. Während die Druckfestigkeit bis zu einer Holzfeuchte von 0% ansteigt wird die maximale Zugfestigkeit bei 5.9% Holzfeuchte erreicht.

Die durchgeführten Versuche zeigen eine Abhängigkeit der E-Moduln von der Belastungsart. Diese Tendenz zeichnet sich besonders in den Ergebnissen bei niedrigen Holzfeuchten ab. Im Schnitt sind die ermittelten E-Moduln aus den Druckversuchen 5-15 % höher als jene aus den Zugversuchen.

Die hier präsentierten Ergebnisse ermöglichen neben der Anwendung von Berechnungsmethoden wie Finite Elemente auch das Rechnen mit plastischen Verformungen. Für die Praxis eröffnet dies den Weg zur Aufstellung von Bemessungsgrundlagen zur Herstellung und Verwendung tragender Holzbauelemente.

Als Hartlaubholzart weist Buche im Vergleich zu den Nadelhölzern höhere mechanische Eigenschaften auf. Mit der Verwendung von Buchenholz in konstruktiven Elementen, bspw. Brettschichtholz, können, mit den heute für Nadelholz üblichen Dimensionierungen, höhere Festigkeiten sowie stabilere Verbindungen realisiert werden. Andererseits sind ebenso filigranere Bauten bei gleichen Festigkeiten wie Nadelholz möglich. Langfristig gesehen können Normen entsprechend angepasst bzw. ergänzt werden.

## 7 Literaturverzeichnis

ASTM E399-90 (1997) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.

Bucur V (2006) Acoustics of Wood. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Burgert I, Bernasconi A, Eckstein D (1999) Evidence for the strength function of rays in living trees. European Journal of Wood and Wood Products 57 (5):397-399

DIN52182 (1976-09) Prüfung von Holz: Bestimmung der Rohdichte.

DIN52185 (1976-09) Prüfung von Holz: Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser.

DIN52188 (1979-05) Prüfung von Holz: Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser.

DIN52192 (1979-05) Prüfung von Holz: Druckversuch quer zur Faser.

Grimsel M (1999) Mechanisches Verhalten von Holz. TU Dresden.

Hering S, Keunecke D, Niemz P (2011) Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. Wood Science and Technology. doi:10.1007/s00226-011-0449-4

ISO3130 (1975-11) Wood-Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

Krackler V, Keunecke D, Niemz P (2010) Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz. Teilbereich der Gesamtstudie: Entscheidungsgrundlagen zur Förderung von Laubholzverarbeitung und -absatz im Rahmen des „Aktionplan Holz“. Bundesamt für Umwelt (BAFU).