

Die Bestimmung der Poissonzahlen und anderer elastischer Konstanten von Holz und Holzwerkstoffen für die Erstellung eines FE-Modells für Massivholzprodukte

Masterarbeit

Eingereicht von
Philipp Matz, BSc

Betreuer: Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller

Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik
Universität für Bodenkultur
BOKU - Wien

Dezember 2017

Abstract

Currently a Computer-aided Engineering (CAE) approach in wood technology is applied for designing and engineering products with higher added value. CAE is based on numerical methods like Finite Element Modelling (FEM). In FEM a full material description, including Poisson's ratios and shear moduli, is needed. Only few studies have dealt with the investigation of the Poisson's ratio and shear moduli of different wood species and wood-based materials. Therefore, in the presented study all six main Poisson's ratios of spruce (*Picea abies L.*) and oak wood (*Quercus robur L.*) as well as different wood based materials (WPC, HDF) were determined in uniaxial tensile experiments, employing optical gauging techniques like Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry (ESPI) and a combination of laser and video extensometry. The shear modulus of WPC was measured, using the Arcan-Shear-Test in combination with ESPI measurements. The results of the Poisson's ratio of oak and spruce obtained from the two different gauging techniques show consistent values. The results of oak are in the range of the literature values, nevertheless the Poisson's ratios for spruce partly show significant differences to the references. The determined values for WPC and HDF show low variability. Experiments with the Arcan-Shear-Test pointed out that this test set-up is useable for measuring the shear modulus of WPC and other wood-based materials.

Keywords: Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry, Laser Extensometry, Oak, Poisson's ratio, Shear Modulus, Spruce, Video Extensometry

Zusammenfassung

Durch die Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen in immer mehr sehr komplexen Verbundwerkstoffen wird zunehmend versucht, neue numerische Methoden wie z.B. Finite-Element-Modells (FEM) in den Produktentwicklungsprozess und in das Materialengineering zu implementieren. Dafür ist jedoch eine sehr genaue und vollständige Materialbeschreibung, vor allem durch die elastischen Konstanten wie dem E-Modul, der Poissonzahl und dem Schubmodul, notwendig. Da dazu bis heute nur relativ wenige Arbeiten, besonders zu den Poissonzahlen, vorliegen, wurden in dieser Arbeit alle sechs Poissonzahlen von Fichte (*Picea abies L.*) und Eiche (*Quercus robur L.*) und von verschiedenen Holzwerkstoffen (WPC, HDF) in einaxialen Zugversuchen mit Hilfe von optischen berührungslosen Dehnungsmessungssystemen, wie Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry (ESPI) und einer Kombination aus Laser- und Videoextensometer, bestimmt. Ebenso wurde der Schubmodul von verschiedenen WPC-Sorten mit dem Arcan-Scher-Test mittels der Dehnungsmessung mit ESPI ermittelt. Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Dehnungsmesssysteme ergab keine signifikanten Unterschiede. Die Messresultate von Eiche liegen im Bereich der Referenzwerte aus der Literatur, hingegen zeigen die Ergebnisse der Poissonzahlen von Fichte teilweise signifikante Abweichungen von den Literaturwerten. Die bestimmten Poissonzahlen der Holzwerkstoffe zeigen gute Ergebnisse bezüglich der Streuung. Auch der Arcan-Scher-Test liefert zufriedenstellende Resultate für die Schubmoduli von WPC.

Schlüsselwörter: Eiche, Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry, Fichte, Laser Extensometrie, Poissonzahl, Schubmodul, Video Extensometrie

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	1
Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einleitung.....	5
1.1 Elastizitätstheorie in Bezug auf Holz.....	6
1.1.1 Hooke´sches Gesetz.....	7
1.2 Poissonzahlen.....	8
1.3 Schubmodul.....	10
1.4 Theoretische Grundlagen der Verformungsmessmethoden.....	11
1.4.1 Anforderungen an die Messmethoden.....	11
1.4.2 ESPI.....	11
1.4.3 Laserextensometer.....	16
1.4.4 Videoextensometer-Breitenänderungsaufnehmer.....	16
1.5 Forschungsfragen.....	17
2 Material und Methoden.....	18
2.1 Material.....	18
2.1.1 Massivholz.....	18
2.1.2 WPC.....	19
2.1.3 Eternit.....	20
2.1.4 HDF.....	20
2.2 Messmittel und Messaufbauten.....	21
2.3 Messdurchführung.....	24
2.3.1 ESPI.....	24
2.3.2 Laser/VideoXtens.....	26
2.4 Auswertung.....	26
2.4.1 Allgemeine Messauswertung.....	26
2.4.2 Statistische Auswertung der Messergebnisse.....	28

3	Ergebnisse.....	29
3.1	Eiche.....	29
3.2	Fichte.....	30
3.3	Eternit und HDF.....	31
3.4	WPC.....	32
4	Diskussion.....	34
5	Schlussfolgerung.....	39
6	Danksagung.....	40
7	Eidesstattliche Erklärung.....	41
8	Literaturverzeichnis.....	42
9	Tabellenverzeichnis.....	44
10	Abbildungsverzeichnis.....	45
11	Anhang.....	46

1 Einleitung

In den letzten Jahren haben sich die Anwendungsgebiete von Holz und Holzwerkstoffen immer weiter ausgeweitet. So soll zukünftig Holz für völlig neue Anwendungen wie z.B. im Fahrzeugbau eingesetzt werden. Die Grundvoraussetzung dafür ist, dass Holz für unterschiedliche Beanspruchungen exakt berechnet werden kann. Die exakte Berechnung von Holzstrukturen durch Methoden wie dem Finite Element Modelling (FEM) war neben Werkstoffentwicklungen eine wichtige Grundvoraussetzung für die Weiterentwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus. Neben der Erweiterung der Anwendungen und der Gestaltungsmöglichkeiten im Holzbau ermöglichen neue Berechnungsmethoden aber auch einen effizienten Einsatz der wertvollen Ressource Holz. Aufgrund der breiten Verwendung von Fichte im modernen Ingenieurbau sind die mechanischen Eigenschaften dieser Holzart gut untersucht. Hinsichtlich der Poissonzahlen wird jedoch bei diesen Berechnungen mehrheitlich auf historische Messwerte zurückgegriffen (z.B.: Kollmann und Côté 1968). Neue Einsatzgebiete erfordern aber exaktere Berechnungen, insbesondere für flächige und schalenförmige Elemente. Darüber hinaus sind Poissonzahlen von anderen Holzarten kaum bis gar nicht verfügbar. Des Weiteren sind Messwerte der Schubmoduli von Fichte in unterschiedlichen holzanatomischen Richtungen nur bedingt vorhanden. Für Fichte wurden von Müller et al. (2015) erstmalig der Schubmodul mit dem Arcan-Scher-Test für alle holzanatomischen Richtungen ermittelt. Von anderen Holzarten sind kaum oder keine Messergebnisse verfügbar. Neben neuen Anwendungsgebieten bietet der Einsatz von numerischen Berechnungsmethoden auch computerbasierte Entwicklung von Verbundwerkstoffen. Numerische Simulation stellt heute einen inhärenten Bestandteil des Product Designs und Product Engineerings dar und trägt damit signifikant zur Kosten- und Zeitersparnis in Entwicklungsprozessen bei (Klein 2012). In verschiedenen Stadien der Entwicklung von neuen Produkten können mit diesen Methoden Produkteigenschaften abgeschätzt werden. Damit können aufwendige Labortests teilweise durch Rechenleistung ersetzt werden. Der computergestützte Entwicklungsprozess geht heute so weit, dass Verhalten und die Beanspruchung der Materialien in Produktionsprozessen zusätzlich berücksichtigt werden können. Im Automobilbau konnte mit der Einführung von FEM in Kombination mit CAD/CAM eine Reduktion der Entwicklungskosten von bis zu 80% erzielt werden. Darüber hinaus liefern numerische Methoden neue, wissensbasierte Möglichkeiten im Produktentwicklungsprozess. Insbesondere im Bereich der Automobilindustrie gehört auch die Simulation von Crashsituationen heute zum Stand der Technik. Simulationen von Verformungs- und Zerstörungsvorgängen sind aber auch bei vielen anderen Produkten gefordert (Leitgeb et al. 2006; Teibinger und Müller 2016).

Es ist daher zu erwarten, dass die Schaffung von Grundlagendaten zu den mechanischen Eigenschaften von Holz die möglichen Einsatzgebiete von Holz positiv beeinflusst.

Zielsetzung des Projekts WoodC.A.R. (www.woodcar.at) ist es unter anderem, numerische Methoden und Erkenntnisse aus der Fahrzeugindustrie in den Produktentwicklungsprozess hineinzutragen. Bei der hier vorliegenden Arbeit besteht die Zielsetzung, grundlegende Daten für mehrschichtige Holzverbundwerkstoffe für verzugsfreie Fußbodenpaneele zu generieren.

Die Simulation von Holz und Holzverbundwerkstoffen erfordert einerseits ein geeignetes Materialmodell, mit dem die unterschiedlichen Versagensverhalten des Werkstoffs beschrieben werden. Andererseits bedingt die Simulation dann die Erstellung sogenannter Materialkarten. In diesen Materialkarten werden die elastischen Kennwerte in alle Raumrichtungen festgelegt (Teibinger und Müller 2016). Dazu zählen vor allem der E-Modul und der Schubmodul sowie die Poissonzahlen (Niemz und Caduff 2008). Wie eingangs erwähnt, liegen zu den elastischen Kennwerten in den drei Hauptschnitttrichtungen von Holz zurzeit relativ wenige und größtenteils über 50 Jahre alte Arbeiten vor.

Moderne Messmethoden wie die Speckle-Interferometrie, Videoextensometer, Laser-Speckle Tracking, Digital Image Correlation, etc. liefern dabei neue Möglichkeiten, die geforderten Kenndaten mit gewünschter Genauigkeit zu ermitteln. Durch die sehr stark richtungsabhängigen Eigenschaften von Holz stellt die Messung der elastischen Konstanten in allen holzanatomischen Richtungen dennoch eine Herausforderung dar. Daher wurden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Messmethoden eingesetzt, um die ermittelten Ergebnisse zu validieren.

1.1 Elastizitätstheorie in Bezug auf Holz

Um für die weiteren Ausführungen und gewählten Messanordnungen die notwendigen Grundlagen zu liefern, wird in diesem Kapitel kurz auf die elastischen Eigenschaften des Werkstoffes Holz eingegangen.

Durch seinen anisotropen und inhomogenen Aufbau wird Holz im Rahmen einer kontinuumsmechanischen Materialbetrachtung als orthotropher Werkstoff betrachtet. Das heißt, dass seine elastischen Eigenschaften in die drei Hauptrichtungen (längs, radial, tangential) stark differenzieren (Niemz und Sonderegger 2017).

In Abbildung 1 sind die drei Hauptrichtungen in idealisierter Form dargestellt. Die Zuordnung des Koordinatensystems wird in dieser Arbeit nach Niemz und Sonderegger (2017) nach der Größe der Eigenschaften vorgenommen (1 = längs (L); 2= radial (R), 3 = tangential (T)). In älterer Fachliteratur wird die Festlegung des Koordinatensystems oft anders vorgenommen.

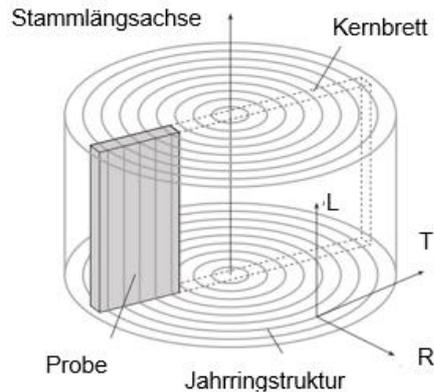


Abbildung 1: Orthotropes Koordinatensystem für Vollholz (nach Gingerl 1998)

1.1.1 Hooke'sches Gesetz

Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Holz erfolgt am besten durch das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz (Niemz und Sonderegger 2017). Dabei gibt der erste Index die Richtung der Kraft und der zweite Index die Richtung der Querdehnung an.

Für den dreidimensionalen orthotropen Zustand gilt Formel (1 bzw. 2):

$$[\varepsilon] = [S] * [\sigma] \quad (1)$$

$$S = \frac{\Delta l}{l * \sigma} \quad (2)$$

Unter Verwendung der Nachgiebigkeitsmatrix gilt in der Voigt'schen Notation (Formel 3):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$	Dehnungen [-]
$\gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$	Gleitungen [Grad]
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$	Normalspannungen [N/mm ²]
$\tau_{23}, \tau_{13}, \tau_{12}$	Schubspannungen [N/mm ²]
S_{11}, S_{22}, S_{33}	Dehnungszahlen [mm ² /N]
S_{44}, S_{55}, S_{66}	Gleitzahlen [mm ² /N]
$S_{12}, S_{13}, S_{21}, S_{23}, S_{31}, S_{32}$	Querdehnungszahlen [mm ² /N]

Ersetzt man die Dehnungszahlen durch die in der Ingenieurwissenschaft geläufigen Konstanten E (E-Modul), G (Schubmodul) und μ (Poissonzahl) und die Indizes mit den in der Holzphysik geläufigen Bezeichnungen (L, R, T, vgl. Kapitel 1.1) kann die Nachgiebigkeitsmatrix wie in Formel 4 angeschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\mu_{RL}}{E_R} & -\frac{\mu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\mu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{LR}}{E_L} & -\frac{\mu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Weiters gilt für die Poissonzahlen nach Formel 5 die Symetriebedingung:

$$\frac{\mu_{RL}}{E_R} = \frac{\mu_{LR}}{E_L}; \quad \frac{\mu_{TL}}{E_T} = \frac{\mu_{LT}}{E_L}; \quad \frac{\mu_{TR}}{E_T} = \frac{\mu_{RT}}{E_R} \quad (5)$$

Da es jedoch laut Niemz und Sonderegger (2017) bei praktischen Messungen oft zu Abweichungen von dieser Symetriebedingung (Formel 5) kommt, werden im Zuge dieser Arbeit alle sechs Poissonzahlen der Vollholzproben bestimmt.

Wie in Formel 4 ersichtlich, braucht man zur vollständigen Beschreibung eines orthotropen Systems neun, beziehungsweise zwölf Parameter (drei E-Moduli, drei Schubmoduli, sechs Poissonzahlen). Da es zu den E-Modulen für die verschiedenen Holzarten ausreichend Literatur sowie zahlreiche Messungen gibt, werden in dieser Arbeit hauptsächlich die Poissonzahlen und der Schubmodul behandelt.

1.2 Poissonzahlen

Wie in Kapitel 1 sowie 1.1 ausführlich erläutert, zählen die Poissonzahlen (auch Poissonsche Konstante, Querdehnungszahl, Querkontraktionszahl) zu den elastischen Kennwerten, die zur genauen Beschreibung des Werkstoffes Holz unabdingbar sind. Bei der Belastung eines Körpers durch Druck oder Zug kommt es zu einer Formänderung in die Belastungsrichtung und quer dazu. Bei Zug wird die Probe länger und schmaler, bei Druck kürzer und breiter. Die Poissonzahl gibt dabei dieses Verhältnis zwischen Querkontraktion (ε_j) und Längsdehnung (ε_i) an (Niemz und Sonderegger 2017).

Für die Berechnung der Poissonzahl (μ) gilt Formel 6:

$$\mu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad i, j \in R, L, T \text{ und } i \neq j \quad (6)$$

Erste wissenschaftliche Arbeiten zu den Poissonzahlen wurden von Carrington (1921, 1922) durchgeführt. Später wurden von Stamer (1935) die Poissonzahlen von mehreren Holzarten anhand von Druckversuchen bestimmt. Er hat die Stauchung der Probe mit dem sogenannten Martensschen Spiegelapparat gemessen. Dieser besteht aus einem Stahlstab, der am oberen Ende der Prüflänge an der Probe fixiert ist und am unteren Ende mittels einer Feder die Probe berührt. Auf dieser Feder ist ein Spiegel befestigt, welcher sich durch eine Längenänderung der Probe um einen gewissen Winkel verdreht und mit Hilfe eines reflektierten Lichtstrahls den Messwert auf einer Skala anzeigt (Schulze und Vollhardt 2013). Die Querdehnung bestimmte Stamer mit dem Apparat von H. Sieglerschmidt, dessen Funktionsprinzip auf einem mechanischen Kippmechanismus und einem Spiegel, der bei Querschnittsänderung der Probe den Winkel ändert und durch Lichtreflexion die Werte auf einer Skala anzeigt, beruht (Siebel 2013).

Hörig (1935) versuchte die Ergebnisse von Carrington und Stamer mit der Kristallelastizitätstheorie von Voigt (1928) zu überprüfen und zu evaluieren. Er erkannte, dass sich nur geringe Abweichungen von der Orientierung sehr stark auf die Ergebnisse auswirken und versuchte diese Tatsache mit Hilfe von Transformationsformeln in den Auswertungen zu berücksichtigen. Dies führte teilweise zu beträchtlichen Veränderungen der Werte.

Einen weiteren Versuch, diese elastische Konstante experimentell zu bestimmen, stellte Neuhaus (1981) an. Er hat die Dehnungen im Zugversuch mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Ebenso überprüfte er die Abhängigkeit der Elastizitätszahlen von der Holzfeuchtigkeit. Eine neuere Arbeit stellt die Untersuchung von Niemz und Caduff (2008) dar. Sie haben die Poissonzahlen von Fichtenholz in Zugversuchen gemessen. All die vorher genannten Arbeiten haben in Bezug auf die Dehnungsmessung gemeinsam, dass die Messungen mit berührenden Messverfahren durchgeführt wurden. Keunecke et al. (2008) haben versucht, die Poissonzahlen von Fichte mittels Digital-Image-Correlation zu bestimmen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der vorher genannten Arbeiten teilweise voneinander stark abweichen (z.B.: $\mu_{TL}(\text{Neuhaus})=0,035/ \mu_{TL}(\text{Keunecke})=0,014$; $\mu_{RT}(\text{Hörig})=0,42/ \mu_{RT}(\text{Niemz})=0,64$; vgl: Tabelle 8) und die Poissonzahlen nur von wenigen Holzarten existieren (vgl. Kapitel 1), soll in dieser Arbeit mit berührungslosen Dehnungsmessungen versucht werden, die Ergebnisse zu verifizieren und Grundlagen für weitere Arbeiten, im Hinblick auf die Anwendbarkeit verschiedener Messsysteme, zu schaffen.

1.3 Schubmodul

Wie bereits weiter oben angeführt, müssen für eine exakte Beschreibung der Nachgiebigkeitsmatrix (Formel 4) von Vollholz neben den sechs Poissonzahlen, auch drei Schubmoduli für die drei Hauptschnittrichtungen angegeben werden. Schubspannungen treten auf, wenn ein Körper durch zwei Kräfte, welche parallel zueinander verlaufen und die in entgegengesetzte Richtung wirken, belastet wird. Es kommt zur Verschiebung von Strukturelementen des Werkstoffes, wenn die Belastung innerhalb des elastischen Bereichs bleibt (Niemz und Sonderegger 2017).

Grundsätzlich ist bei der Bestimmung von Schubmodulen die größte Herausforderung während der Messung Normalkräfte, Biegung und andere störende Einflüsse im Scherfeld auszuschließen. Zur Entwicklung einer Testkonfiguration zur Messung des Schubmoduls von Holz, bei der innerhalb des Messfeldes möglichst reine Scherkräfte wirken, gibt es zahlreiche Arbeiten (Müller et al. 2015). Laut Müller (2003) ist es mit den verschiedenen Prüfaufbauten jedoch nicht möglich, dass störende Normalkräfte gänzlich ausgeschlossen werden, und somit ausschließlich Schubbelastung auf die Probe wirkt. Zur Übersicht werden nachfolgend einige Systeme zur Schubmodulmessung angeführt.

Da es durch Torsionsbeanspruchung annähernd zu den gleichen Verformungen wie bei Schubverformung kommt, kann der Schubmodul annäherungsweise durch Torsionsversuchen an Stäben bestimmt werden (Niemz und Sonderegger 2017). Der so bestimmte Torsionsmodul fällt jedoch teilweise unterschiedlich zum Schubmodul aus (Grimsel 1999). Selbst bei Testmethoden, bei denen lediglich die Schubfestigkeit ermittelt wird, wie z.B. beim Blockschertest nach ASTM D-143 (1981) kommt es zu starken Beeinflussungen induzierter Normalkräfte und durch die Krafteinleitung zu einer sehr inhomogenen Verteilung der Schubverformung (Sretenovic et al. 2002). Müller et al. (2015) beschreiben in ihrer Arbeit, dass der Iosipescu-Scher-Test, der Off-Axis-Tensile-Test und der Arcan-Scher-Test im Hinblick auf die Einwirkung anderer Krafteinflüsse als der Schubkraft zur Bestimmung des Schubmoduls gut geeignet sind und dass die Werte sehr nahe an den tatsächlichen Eigenschaften liegen. Jedoch stellt die Notwendigkeit der Verwendung von Dehnmessstreifen beim Off-Axis-Tensile-Test laut Müller (2003) ein Problem dar. Eine Schwachstelle des Iosipescu-Scher-Tests ist, dass eine genaue Analyse der Verteilung des Scherfeldes nicht möglich ist.

Einerseits aufgrund der Vorgabe, die Dehnungen mit Hilfe der ESPI Technik zu erfassen, und andererseits Müller et al. (2015) folgend, die beschreiben, dass sich der Arcan-Scher-Test gut zur simultanen Messung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls von Holz eignet, wird in dieser Arbeit diese Testmethode zur Durchführung der Messungen herangezogen.

Bei Anwendung von optischen Dehnungsmesssystem ist es zwingend erforderlich, dass die Probenoberfläche sichtbar ist, was mit diesem Testaufbau ebenfalls gegeben ist. Weitere Vorteile, Nachteile und Eigenschaften sind in Müller (2003), sowie in Müller et al. (2015) ausführlich diskutiert und dargelegt.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Messung des Schubmoduls nur an WPC Proben durchgeführt. Die wesentliche Aufgabe dabei war es, den von Müller et al. (2015) vorgestellten Versuchsaufbau weiter zu entwickeln und mit einem weitgehend homogenen Probenmaterial zu validieren. Die Arbeiten dienen als Grundlage für weitere Messungen an Massivholz am Institut. Bei den Messungen wurden zwei Speckle-Interferometer eingesetzt, um ungleiche Verformungen auf der Vorderseite und Rückseite der Proben zu berücksichtigen. Die Probengeometrie wurde im Vergleich zu Müller et al. (2015) etwas verkleinert, um die Probenherstellung in den unterschiedlichen holzanatomischen Richtungen zu vereinfachen. Zusätzlich wurde der Klemmmechanismus für die Probenhalterung in der Prüfkfiguration verbessert.

1.4 Theoretische Grundlagen der Verformungsmessmethoden

1.4.1 Anforderungen an die Messmethoden

Um die Werkstoffeigenschaften, welche in den vorigen Kapiteln beschrieben wurden, zu bestimmen, ist es notwendig, die Deformation der Oberfläche in zwei Dimensionen gleichzeitig zu messen. Für Serienmessungen sind zusätzlich rasche und einfache Auswertemethoden gefordert. Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, die Wechselwirkungen zwischen Messgerät und Probe möglichst gering zu halten, wodurch es naheliegend ist, ein berührungsloses Messverfahren heranzuziehen. Um die Homogenität der Deformationen im beobachteten Bereich sicherzustellen und zu bewerten, ist es notwendig, ein Feldmessverfahren zu verwenden. Da die Verformungen im Bereich weniger μm liegen, muss das Messsystem auch eine dementsprechende Messauflösung besitzen (Eberhardsteiner 2002).

Bei folgenden Messsystemen werden diese Anforderungen erfüllt und wurden daher im Zuge dieser Arbeit eingesetzt:

1.4.2 ESPI

Die Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry (ESPI) ist ein optisches Messverfahren, welches durch Interferenz von Laserlicht zur berührungslosen und flächenhaften Verformungsmessung geeignet ist (Eberhardsteiner 2002).

Das Grundprinzip interferometrischer Verfahren lässt sich gut anhand des Michelson-Interferometers (Abbildung 2) erläutern, wobei das Phänomen der Interferenz von kohärenten Lichtstrahlen ausgenutzt wird.

Ein durch eine Laserquelle erzeugter linear polarisierter Lichtstrahl wird mittels eines Strahlteilers in zwei Lichtstrahlen mit gleicher Intensität aufgeteilt. Der Objektstrahl tritt mit dem Messobjekt (in diesem Fall ein beweglicher Spiegel) in Wechselwirkung und wird daran reflektiert. Der zweite Strahl (Referenzstrahl) wird durch den Strahlteiler um 90° in Richtung eines festen Spiegels abgelenkt und es kommt ebenfalls zur Reflexion. An einem Intensitätssensor kommen beide Strahlen zur Interferenz. Durch Verschiebung des beweglichen Spiegels ändert sich der Weg des Objektstrahls, dies führt am Intensitätssensor abwechselnd zu destruktiver beziehungsweise konstruktiver Interferenz. Jedes Mal, wenn der Spiegel um eine halbe Lichtwellenlänge (λ) verschoben wird, kommt es zu gleichartigen Interferenzzuständen am Intensitätssensor. Durch dieses einfache Experiment lassen sich zwei Eigenschaften interferometrischer Messmethoden aufzeigen. Zum einem ist es die hohe Messempfindlichkeit und zum anderem ist es die Moduliertheit der Messinformationen, was bedeutet, dass Verschiebungen nur bis auf ein ganzzahliges Vielfaches der halben Lichtwellenlänge bestimmt werden können (Gingerl 1998).

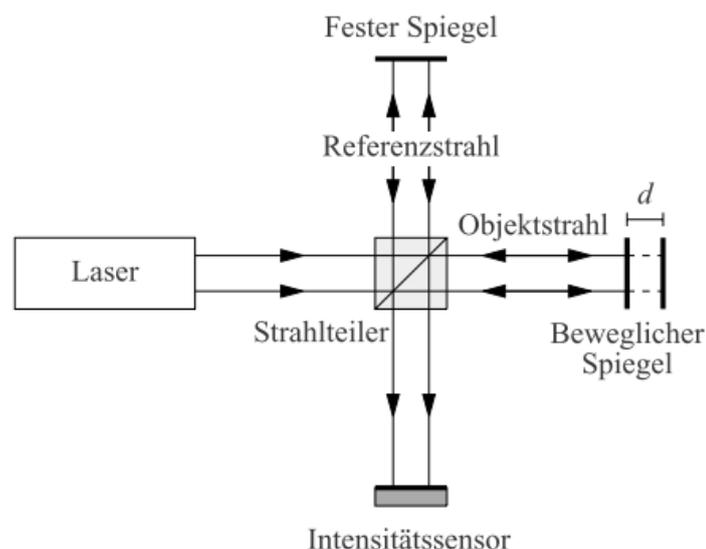


Abbildung 2: Michelson-Interferometer – Grundprinzip (Gingerl 1998)

Im Falle des Michelson-Interferometers handelt es sich um ein Out-of-plane Messverfahren, bei dem die Form des Messobjektes nicht die Messung eingetht, da der Spiegel das einfallende Licht nur in eine Richtung reflektiert. Um die Verschiebungsmessung eines flächenhaften Objekts zu ermöglichen, muss die Oberfläche punktwweise fokussiert werden, was zum sogenannten Speckle-Effekt führt, welcher im nächsten Kapitel beschrieben wird (Gingerl 1998).

1.4.2.1 Speckle-Effekt

Bei der Beleuchtung einer optisch rauen Oberfläche mit Laserlicht entsteht der sogenannte Speckle-Effekt. Durch die diffuse Reflexion des Laserlichts an der Oberfläche entsteht eine räumliche Verteilung von Interferenzmaxima und Interferenzminima. Das so entstehende Muster wird als objektives Speckle-Muster bezeichnet (Eberhardsteiner 2002).

Für messtechnische Verfahren wird jedoch der sogenannte subjektive Speckle-Effekt (Abbildung 3) ausgenutzt. Hierfür wird der Objektstrahl mit Hilfe einer Linse auf einen Messpunkt fokussiert und somit liefern nur die in unmittelbarer Nähe liegende Streuzentren einen Beitrag zur Interferenz (Gingerl 1998).

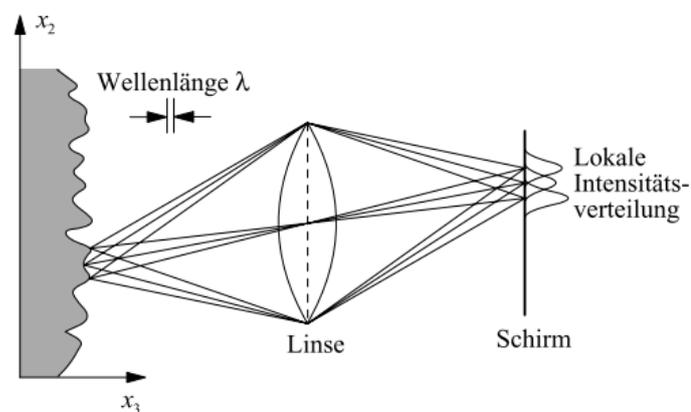


Abbildung 3: Entstehungsprinzip des subjektiven Speckle-Effekts (Gingerl 1998)

1.4.2.2 Verschiebungsmessung mittels Speckle-Interferometrie

Mit der Messmethode der Speckle-Interferometrie kann die Verschiebung mittels Out-of-plane- und In-plane-Verfahren gemessen werden. Da bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen nur das In-plane-Verfahren angewendet wird, wird in den folgenden Erläuterungen vorwiegend auf dieses eingegangen.

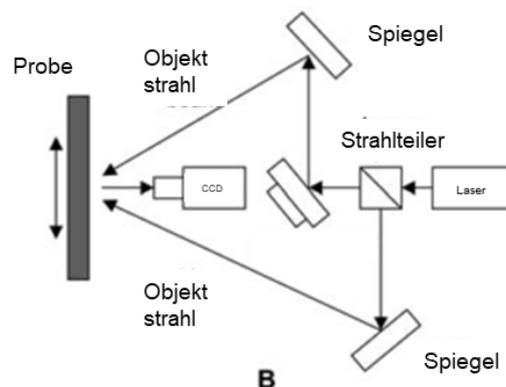


Abbildung 4: Schematischer ESPI Aufbau für In-plane Messungen (nach Müller et al. 2005)

Wie in Abbildung 4 zu sehen, interferieren beim In-plane-Verfahren zwei Objektstrahlen, die vom Messobjekt reflektiert werden. Dadurch wird von der Videokamera ein Speckle-Interferogramm aufgenommen. Dieses verändert sich, wenn es eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Objektstrahlen gibt, was in diesem Fall durch eine Deformation der Oberfläche hervorgerufen wird. Durch Bildung der Differenz der beiden Interferogramme, was in Echtzeit während der Verformungsmessung von der Software erledigt wird, erhält man ein typisches Streifenbild. Diese Streifen werden als Fringes bezeichnet und können während der Messung zur qualitativen Beurteilung der Messung herangezogen werden. Objektpunkte, die auf demselben Streifen liegen, haben die gleiche Verschiebung in Richtung des Sensitivitätsvektors erfahren. Die dabei entstehende Intensitätsverteilung wird durch folgende Gleichung (Formel 7) ausgedrückt (Müller et al. 2005).

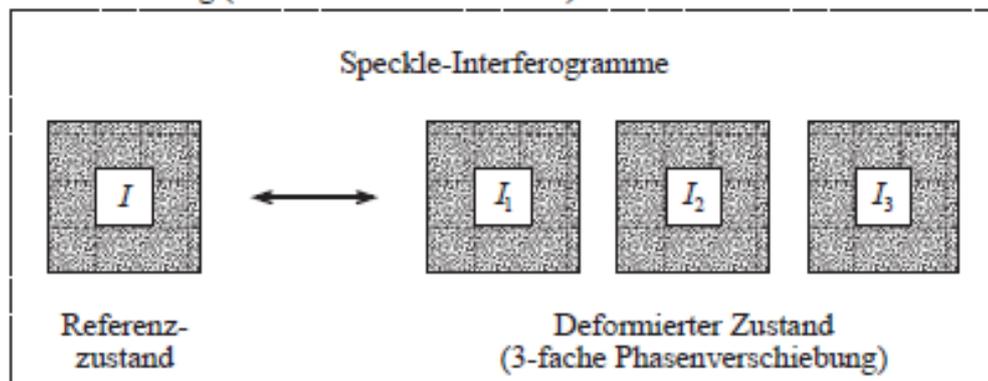
$$I(r) = I_R(r) - I_D(r) = 2 * \sqrt{I_1(r) * I_2(r) * \cos \Delta\delta(r)} \quad (7)$$

$I(r)$	resultierende Intensität
$I_R(r)$	Intensitätsverteilung des Referenzzustandes
$I_D(r)$	Intensitätsverteilung des deformierten Zustandes
$I_1(r), I_2(r)$	Intensitäten der beiden Objektstrahlen
$\cos \Delta\delta(r)$	Phasenänderung beider Objektstrahlen zueinander

Zur quantitativen Auswertung der Verschiebungen wird das sogenannte Phasenschiebverfahren angewendet. Dabei werden die Interferenzphasen um einen Bruchteil der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts verschoben, was mit einem Piezokristall realisiert wird. Dadurch erhält man für jeden Messpunkt ein nichtlineares Gleichungssystem, aus dem eine modulierte Verteilung der Änderung der Interferenzphasen errechnet werden kann und so aus den Speckle-Interferogrammen das Modulo- 2π -Streifenbild bestimmt wird. Dies lässt eine genauere Bestimmung der Verschiebungen und die Verminderung von Störeinflüssen zu (Eberhardsteiner 2002; Gingerl 1998).

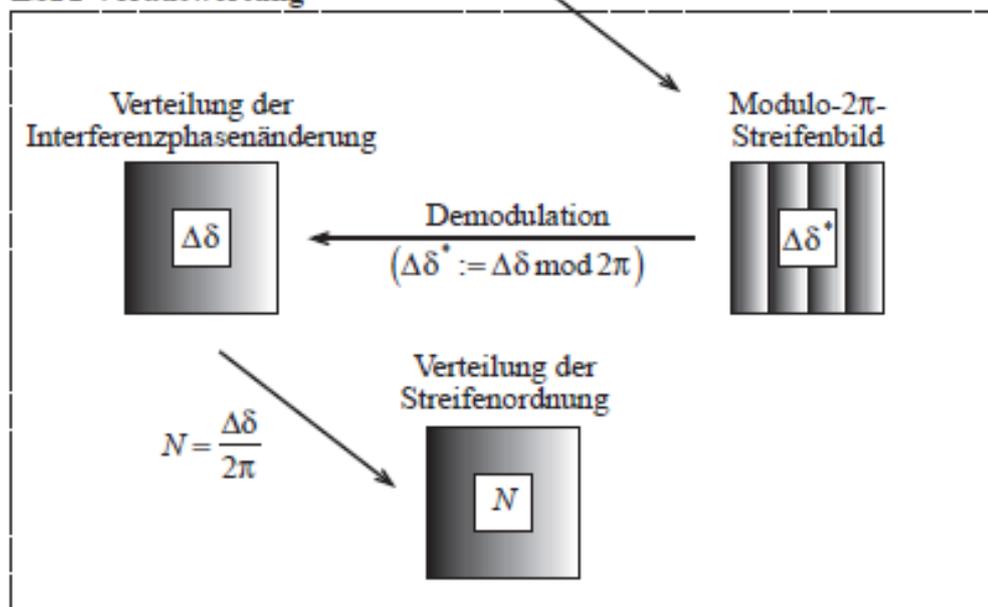
Für die nachfolgenden Versuche wird die zweidimensionale Verzerrungsverteilung einer ebenen Oberfläche benötigt. Abbildung 5 zeigt schematisch die Auswertung einer ESPI Messung für eine Messrichtung.

ESPI-Messung (Phasenschiebungsverfahren)



$$\Delta\delta^* = \arctan[\dots, \dots]$$

ESPI-Vorauswertung



$$N\lambda = \bar{s}d$$

ESPI-Auswertung

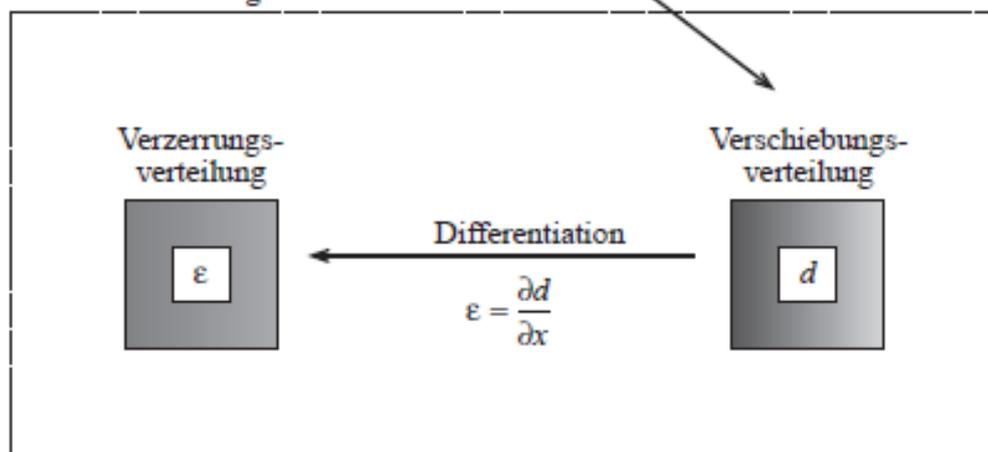


Abbildung 5: ESPI Auswerteschema für eine einzelne Messrichtung (Gingerl 1998)

Als Erstes wird, wie zuvor erwähnt, aus den durch die verschiedenen Belastungsschritte entstandenen Interferogrammen das Modulo- 2π -Streifenbild bestimmt. Durch Glättung werden die Intensitätsverteilungen im Phasenbild verdeutlicht und durch spezielle Algorithmen demoduliert. Aus der demodulierten Verteilung der Interferenzphasen wird, unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen (Berandung und Abmessung des Messfelds, Beobachtungsgeometrie), die quantifizierte Verteilung der Verschiebung ermittelt. Abschließend werden durch numerische Differentiation (vgl. Formel 8-10) die Verzerrungskomponenten bestimmt (Eberhardsteiner 2002).

1.4.3 Laserextensometer

Der Laserextensometer ist ein kontaktloses Dehnmessverfahren, dessen Funktionsweise ebenso auf dem Prinzip von Laserlicht und dem Speckle-Effekt beruht. Zwei Messköpfe, die mit Digitalkameras und Laserlichtquellen ausgestattet sind, erzeugen auf der Probenoberfläche, wie im Kapitel 1.4.2.1 beschrieben, jeweils ein Speckle-Muster. Innerhalb des Gesichtsfeldes jeder Kamera wird ein Teil dieses Musters als Auswertefenster gewählt. Wenn die Probe belastet wird, resultieren daraus Verschiebungen der Oberfläche und genauso Verschiebungen der Speckle-Muster. Durch die Software werden in jedem neuen Bild, welches durch eine Digitalkamera aufgenommen wird, mittels eines komplexen Algorithmus die speziellen Muster in den beiden Auswertefenstern identifiziert. Dadurch kann die Abstandsänderung zwischen den beiden Speckle-Mustern, welche als virtuelle Messmarken funktionieren, aufgezeichnet werden (Zwick/Roell 2017a).

1.4.4 Videoextensometer-Breitenänderungsaufnehmer

Mit dem Videoextensometer-Breitenänderungsaufnehmer der Firma Zwick/Roell (Ulm/Deutschland) lässt sich berührungslos die Breitenänderung von Materialien messen, wofür mit einer Videokamera die Probe betrachtet wird. Grundsätzlich müssen wenigstens zwei Messmarken angebracht werden, um die Abstandsänderung zwischen diesen zu bestimmen. Im Falle der Aufnahme der Breitenänderung einer Probe können automatisch mit Hilfe der Software an den Rändern der Probe virtuelle Messmarken angebracht werden. Um den Kontrast von Hintergrund und Probe zu verstärken, wird die Probe von hinten beleuchtet. Während der Prüfung wird von der Software die Abstandsänderung zwischen den Messmarken automatisch verfolgt und ausgewertet. Ebenso kann die Breite an einer oder mehreren Stellen gemessen werden (Zwick/Roell 2017b).

1.5 Forschungsfragen

Aufbauend auf die vorhergegangene Einleitung und den Erläuterungen lassen sich drei Forschungsfragen ableiten, die es gilt in dieser Arbeit zu beantworten.

1. Ergeben die Dehnungsmessungen mittels ESPI und Laser/VideoXtens Messung konsistente Werte und welche dieser beiden Messmethoden soll in Zukunft zur Messung der Poissonzahlen in Bezug auf Streuung der Werte und Zeitaufwand der Messung angewandt werden?
2. Literaturwerte zu den Poissonzahlen von Holz, insbesondere von Fichte und Eiche zeigen relativ starke Schwankungen zwischen den verschiedenen Arbeiten. Lassen sich diese Werte mit modernen Dehnungsmessmethoden nachvollziehen beziehungsweise welche dieser Werte sind richtig?
3. Lässt sich die Schubfestigkeit beziehungsweise der Schubmodul von Holzwerkstoffen mit Hilfe des Arcan-Scher-Tests in Kombination mit ESPI Dehnungsmessung bestimmen?

2 Material und Methoden

2.1 Material

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Poissonzahlen von Eiche und Fichte in allen sechs holzanatomischen Richtungen bestimmt. Ebenso wurde diese von WPC, Eternit und HDF gemessen. Von WPC wurden zusätzlich Messungen bezüglich des Schubmoduls durchgeführt. Die Dehnungen aller Proben wurden mit ESPI gemessen. Wegen der Komplexität des Materials und der größeren Schwankung bei den Dehnungswerten wurden die Vollholzproben zusätzlich mit einem Laserextensometer in Kombination mit einem Videoextensometer (im Folgenden Laser/VideoXtens genannt) zur Validierung der Ergebnisse untersucht.

2.1.1 Massivholz

Die Messungen an Massivholz wurden an Fichte (*Picea abies L.*) und Eiche (*Quercus robur L.*) durchgeführt. Um die Proben für die jeweiligen Richtungen möglichst präzise herstellen zu können, wurde fehlerfreies Ausgangsmaterial mit möglichst parallelem Faserverlauf ausgewählt. Die Proben hatten nach der Bearbeitung eine Länge von 120 mm, eine Breite von 20 mm und eine Dicke von 5 mm. Für die Dehnungsmessungen mit Laser/VideoXtens von Fichte wurden für die Längsrichtungen Normzugproben in Anlehnung an DIN EN 52 188 verwendet. Die Proben wurden laut EN 408 bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit mindestens zwei Wochen auf eine durchschnittliche Holzfeuchtigkeit von 12% konditioniert. Für jede der sechs anatomischen Richtungen wurden von Fichte und Eiche mindestens zehn Proben hergestellt. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Prüfparameter für die Dehnungsmessungen mit ESPI ersichtlich. Die Prüfgeschwindigkeit betrug bei allen Messungen 1 mm/min. Für die Dehnungsmessungen von Eiche mit Laser/VideoXtens wurden für die Längsdehnung eine Einspannlänge von 70 mm und eine Messlänge von 40 mm gewählt. Die Vorkraft liegt wie bei den ESPI Messungen bei 10 N. Die Maximalkraft betrug für Eiche 400 N bei den Querrichtungen und 4000 N bei den Längsrichtungen. Bei den Maximalbelastungen wurde darauf geachtet, dass das Probenmaterial nicht über den linear-elastischen Bereich hinaus (d.h. über 40% von F_{max}) belastet wurde. Damit konnten einige Proben mehrfach einer Messung unterworfen werden. Bei Fichte lagen die Maximalkräfte bei 200 N und 4000 N. Da für die Längsrichtungen von Fichte Normzugproben verwendet wurden, betrug die Einspannlänge 350 mm und die Messlänge 80mm. Für die Querrichtungen sind Einspannlänge und Messlänge gleich wie bei Eiche.

Tabelle 1: Prüfparameter für ESPI Messungen (Eiche)

Eiche (ESPI)						
Zugrichtung	Vorkraft [N]	Lastschritte	Kraft pro Lastschritt [N]	Maximalkraft [N]	Einspannlänge [mm]	FOV [mm ²]
Längs	200	10	100	1200	70	13*26
Tangential	150	5	20	150	70	13*26
Radial	150	5	20	150	70	13*26

Tabelle 2: Prüfparameter für ESPI Messungen (Fichte)

Fichte (ESPI)						
Zugrichtung	Vorkraft [N]	Lastschritte	Kraft pro Lastschritt [N]	Maximalkraft [N]	Einspannlänge [mm]	FOV [mm ²]
Längs	-	-	-	-	-	-
Tangential	10	6	5	40	70	13*26
Radial	20	6	10	80	70	13*26

2.1.2 WPC

Zur Prüfung der Poissonzahlen von verschiedenen WPC Rezepturen wurden diese mittels Spritzgussverfahren in eine „Knochenform“ mit einer Länge von 200 mm, einer Breite von 15 mm und einer Dicke von 1,5 mm gebracht. Die verwendeten Prüfparameter und ein Beispiel einer WPC Probe sind in Tabelle 3 und Abbildung 6 zu sehen.

Tabelle 3: Prüfparameter für ESPI Messungen (WPC)

WPC (ESPI)						
Rezeptur	Vorkraft [N]	Lastschritte	Kraft pro Lastschritt [N]	Maximalkraft [N]	Einspannlänge [mm]	FOV [mm ²]
W19	150	10	50	650	70	10*26
W20	130	21	20	550	70	10*26
W21	100	17	20	440	70	10*26
W22	170	25	20	670	70	10*26
W23	110	28	20	470	70	10*26
W24	135	20	20	535	70	10*26

**Abbildung 6: WPC Probe zur Bestimmung der Poissonzahl**

Die Proben für die Schubmodulmessung wurden aus durch Spritzguss hergestellten Platten mit der Stärke von 10 mm mit einer CNC-Fräße herausgefräst. Die Maße der Proben sind in Abbildung 7 dargestellt.

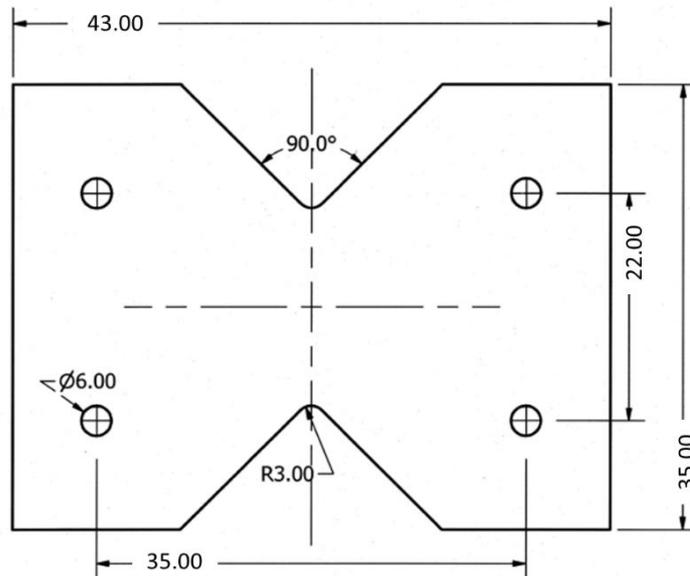


Abbildung 7: Skizze einer WPC Probe zur Messung des Schubmoduls [mm]

2.1.3 Eternit

Aus Eternitplatten wurden Proben mit einer Länge von 200 mm, einer Breite von 15 mm und einer Dicke von 2 mm mit einer Kreissäge herausgeschnitten. Um die Längs- und Querdehnung mittels ESPI zu bestimmen, wurde eine Einspannlänge von 70 mm, eine Vorkraft von 60 N und fünf Kraftstufen zu je 40 N gewählt. Die Größe des Field of Views (FOV) bei den Messungen betrug 10*15 mm².

2.1.4 HDF

Von drei verschiedenen zusammengesetzten HDF Arten wurden ebenfalls die Poissonzahlen mit ESPI bestimmt. Die Proben wurden aus größeren Platten herausgeschnitten. Die Proben hatten eine Länge von 200 mm, eine Breite von 15 mm und eine Dicke von 1,5 mm. Die Prüfparameter sind in nachfolgender Tabelle angegeben.

Tabelle 4: Prüfparameter für ESPI Messungen (HDF)

HDF (ESPI)						
Rezeptur	Vorkraft [N]	Lastschritte	Kraft pro Lastschritt [N]	Maximalkraft [N]	Einspannlänge [mm]	FOV [mm ²]
ABB	50	10	10	150	70	10*15
HOM	50	10	10	150	70	10*15
BRA	30	11	10	140	70	10*15

2.2 Messmittel und Messaufbauten

Grundsätzlich kamen in der vorliegenden Arbeit drei verschiedene Messaufbauten und die dazugehörigen Messmittel zum Einsatz:

1. Zur Bestimmung der Poissonzahlen
 - a. Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z100 mit einer 5 kN Kraftmessdose und zwei Schraub-Spannbacken für einaxiale Zugversuche (Zwick/Roell-Ulm/Deutschland) und zur Dehnungsmessung zwei ESPI Messköpfen Q300 der Firma Dantec-Ettemeyer (Ulm/Deutschland) mit Tokina Objektiven 1:1,4/6-15 mm und einer Auflösung von 0,03 μm .
 - b. Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z020 mit einer 5 kN Kraftmessdose und zwei Schraub-Spannbacken für einaxiale Zugversuche (Zwick/Roell-Ulm/Deutschland) und zur Dehnungsmessung ein Laserextensometer mit integriertem Videoextensometer-Breitenänderungsaufnehmer (Zwick/Roell-Ulm/Deutschland).
2. Zur Bestimmung des Schubmoduls
 - a. Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z100 mit einer 5 kN Kraftmessdose und Arcan-Scher-Test Aufnahme (Eigenanfertigung) und zur Dehnungsmessung zwei ESPI Messköpfen Q300 der Firma Dantec-Ettemeyer (Ulm/Deutschland) mit Tokina Objektiven 1:1,4/6-15mm.

Die Aufnahme der Probe für den Arcan-Scher-Test erfolgt in einem aus Aluminium gefertigten Werkzeug (Abbildung 8). An der Probe werden an jeder Seite jeweils zwei Klemmen mit Hilfe von Schrauben befestigt. Mit diesen wird sie in die Aufnahme eingesetzt und mit Hilfe von zwei Klemmschrauben fixiert.

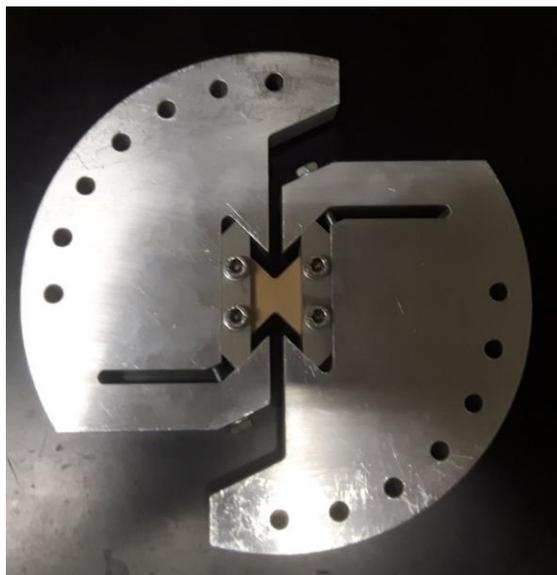


Abbildung 8: Aufnahme für den Arcan-Scher-Test mit eingespannter Probe

An der Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z100 wurden zwei ESPI Messköpfe mittels zwei spezieller Halterungen aus mit Sand gefüllten Aluminiumprofilen, die zusätzlich mit Streben ausgesteift wurden, befestigt. ESPI Messungen sind besonders durch Schwingungen beeinflusst. Bereits geringste Vibrationen der Gebäudestruktur erzeugen mehr oder weniger starke Messartefakte. Die Sandfüllung in den Alu-Profilen dient der Absorption von Vibrationen, die vom Gebäude auf die Messeinrichtung einwirken. Für zusätzliche Minimierung der Vibrationen wurde die gesamte Prüfmaschine auf eine Trittschallmatte gestellt. Beide Maßnahmen lieferten im Zuge der Messdurchführung Verbesserungen, jedoch konnte eine vollständige Bereinigung der Messartefakte aufgrund von außen einwirkenden Vibrationen im Zuge dieser Arbeit nicht erzielt werden. So wurden vielfach die Messzeiten in den frühen Morgen oder späten Abendstunden bzw. in die Nacht verlegt, um Artefakte aufgrund von Gebäudeschwindungen möglichst gering zu halten.

Die Messköpfe selbst wurden dabei an zwei Halteplatten aus Aluminium angebracht, welche mit den Aluminiumprofilen verschraubt wurden. Einer der Messköpfe wurde so aufgebaut, dass er genau normal auf die Vorderseite der Probe ausgerichtet war, der andere genau normal auf die Hinterseite der zu messenden Probe.

An der Universalprüfmaschine Z020 wird der Laserextensometer mit integriertem Videoextensometer-Breitenänderungsaufnehmer normal auf die Breitseite der Probe ausgerichtet. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die verschiedenen Prüfaufbauten.

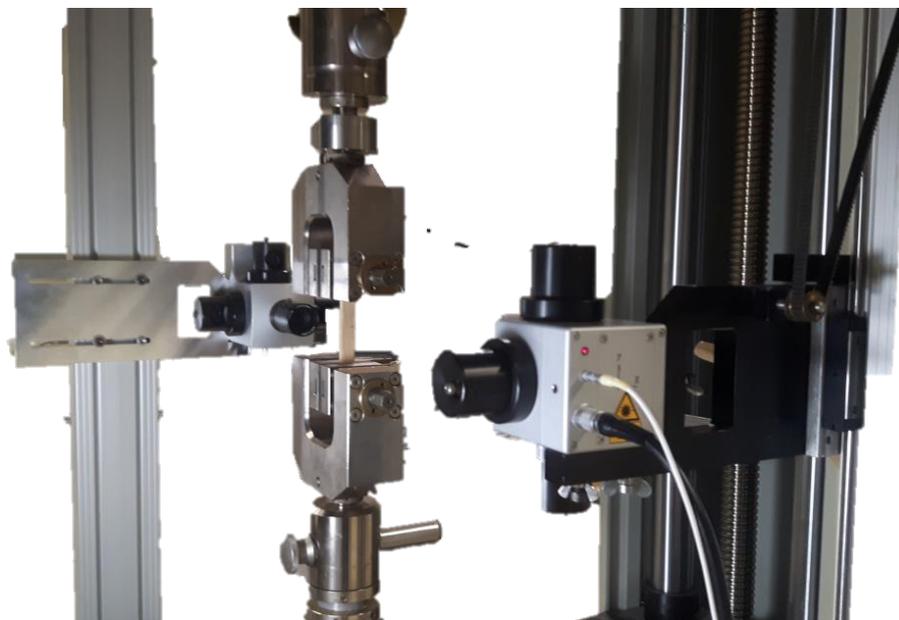


Abbildung 9: Prüfaufbau zur Messung der Poissonzahlen mit ESPI

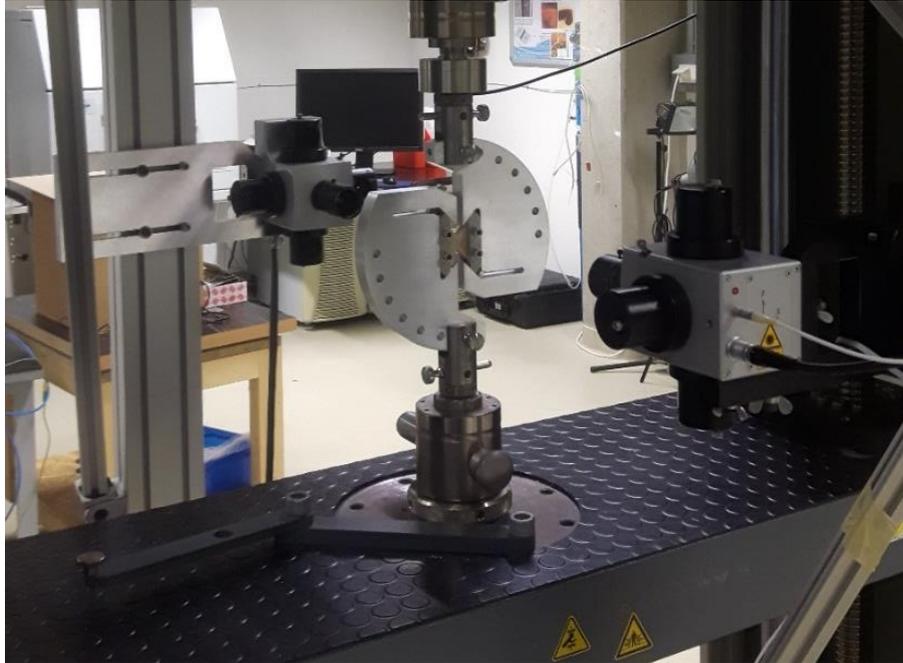


Abbildung 10: Prüfaufbau zur Bestimmung des Schubmoduls mit ESPI



Abbildung 11: Prüfaufbau zur Bestimmung der Poissonzahlen mit Laser/VideoXtens

2.3 Messdurchführung

Da die Durchführungen der Messungen einerseits wegen der verschiedenen Dehnungsmessmethoden und andererseits wegen der verschiedenen zu messenden Eigenschaften voneinander abweichen, wird in den folgenden Kapiteln zu Beginn auf die Durchführung der Messungen mit ESPI eingegangen. Nachfolgend werden die Ausführungen in die Messungen der Poissonzahlen und in die Messung des Schubmoduls aufgeteilt. Im Anschluss wird auf die Messung der Poissonzahlen mittels Laser/VideoXtens eingegangen. Abbildung 13 zeigt schematisch den Messaufbau beziehungsweise die Messdurchführung von ESPI und Laser/VideoXtens.

2.3.1 ESPI

Zu Beginn der Messungen mit den ESPI Messköpfen müssen mehrere Einstellungen durchgeführt werden. Die Messköpfe müssen genau senkrecht auf die Oberfläche ausgerichtet werden und sie müssen ebenfalls exakt waagrecht positioniert werden. Ebenso muss eine gleichmäßige Beleuchtung der zu betrachtenden Probenoberfläche erreicht werden. Auf die Probenoberfläche wird im gewünschten Bildausschnitt Millimeterpapier aufgebracht, um den Bereich einerseits mithilfe der Einstellungen am Objektiv scharf darzustellen und andererseits, um einen Maßstab und die Größe des zu messenden Bereichs festzulegen. Die Blende des Messkopfes muss so eingestellt werden, dass das Speckle-Muster einen optimalen Kontrast aufweist. Außerdem muss überprüft werden, ob es keine Vibrationen und äußere Störeinflüsse auf das System gibt. Um größere Verschiebungen mit der ESPI Methode aufzunehmen beziehungsweise zu messen, muss die Gesamtbelastung in mehrere kleinere Belastungsschritte aufgeteilt werden und die Verschiebungen später zu einer Gesamtverschiebung aufsummiert werden. Dabei ist die Größe der Belastungsschritte abhängig von der Steifigkeit des Materials. Mit der Software der Universalprüfmaschine (testXpert) werden Belastungsstufen mit lagegesteuerter Haltung zwischen den Stufen definiert. Die Haltezeit zwischen den Stufen hat 3-5 Sekunden betragen und bei jeder Messung wurden 5-15 Stufen aufgezeichnet. Grundsätzlich wird bei jeder Messung eine gewisse Vorkraft angebracht, um Vibrationen im System zu minimieren. Dieser Zustand wird als Referenzwert angenommen und das Speckle-Muster zeitgleich mit beiden Messköpfen mit der Software ISTRA 2001 Dantec-Ettemeyer (Ulm, Deutschland) aufgezeichnet. Bei jeder Haltestufe wird ein Bild der Speckle-Muster gemacht und abgespeichert. Generell sollen die Belastungsstufen so gewählt werden, dass 3-5 Fringes erkennbar sind (Valla 2007).

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel einer Kraft-Dehnungskurve mit mehreren Belastungsschritten und einem geringen Kraftabfall bei jeder Haltestufe aufgrund von Spannungsrelaxationen.

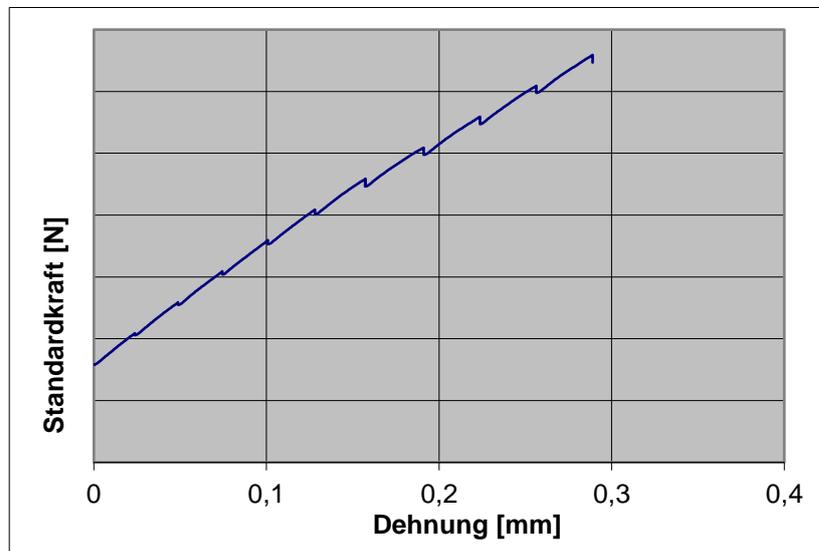


Abbildung 12: Kraft-Dehnungskurve mit mehreren Haltestufen (Beispiel)

2.3.1.1 Poissonzahlen

Die verschiedenen Probekörper wurden mit der Universalprüfmaschine Zwick100 mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min unter Zug belastet. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wurden zwischen Vorkraft und Maximalkraft mehrere Haltestufen gewählt. Die Dehnungen in x- und y-Richtung (Querdehnungs- und Zugrichtung) wurde innerhalb des „Field of View“ (FOV) auf beiden Seiten der Probe aufgezeichnet und, wie im Kapitel 2.4.1 dargestellt, ausgewertet. Das FOV ist der eingestellte Bereich, welcher für die Messungen der Dehnungen herangezogen wird. Es sollte so gewählt werden, dass ein möglichst großer Teil der Probe gemessen wird, um punktuelle Störeinflüsse zu minimieren.

2.3.1.2 Schubmodul

Die WPC Probekörper wurden in den Prüfaufbau für den Arcan-Scher-Test eingespannt. Dabei ist es wichtig, die Probe exakt gerade einzuspannen, um Verdrehungen während der Prüfung zu minimieren. Der Prüfaufbau wurde auf Zug belastet, wodurch es in der Mitte der Probe zwischen den beiden Einkerbungen zur Bildung eines Schubfelds kommt. Da das Schubfeld nur sehr schmal ist, beschränkt sich das FOV ebenso nur auf einen schmalen Streifen (2-3 mm) zwischen den Einkerbungen. Wie bei der Messung der Poissonzahlen wurde ebenfalls die x- und y-Komponente der Dehnung aufgezeichnet und wie im Kapitel 2.4.1 gezeigt ausgewertet.

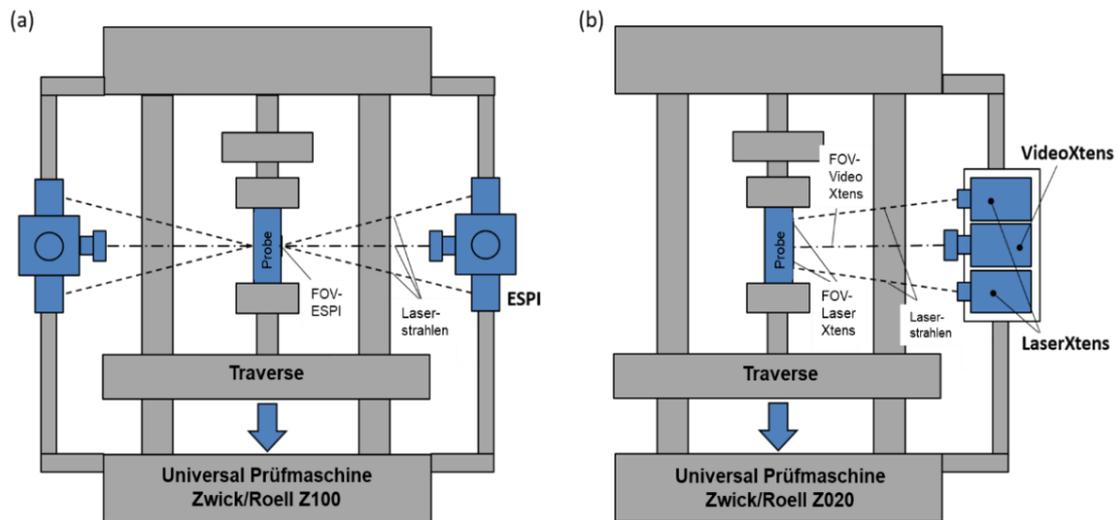


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messaufbaus bzw. der Messdurchführung von ESPI (a) und Laser/VideoXtens (b) zur Messung der Poissonzahlen.

2.3.2 Laser/VideoXtens

Die Messungen der Poissonzahlen an Fichte und Eiche mittels Laser/VideoXtens wurden auf der Universalprüfmaschine Zwick020, auf der ein optisches Dehnungsmesssystem aufgebaut war, welches einen Laser- und einen Videoextensometer beinhaltet, durchgeführt. Mit diesem Laser/VideoXtens System ist es möglich, zeitgleich Längs- und Querdehnungen aufzunehmen. Bei der verwendeten Messanordnung beträgt die Auflösung des Laserextensometers maximal $0,11\mu\text{m}$ und die des Videoextensometers $0,2\mu\text{m}$. Die Auswertefenster des Laserextensometers für die Längenänderungsaufnahme wurden im oberen und unteren Bereich der Probe positioniert, wobei die Messlänge 40 mm betrug. Die Breitenänderung wurde exakt in der Mitte der Proben gemessen.

2.4 Auswertung

2.4.1 Allgemeine Messauswertung

Zur Auswertung der ESPI Messungen wurde die Software ISTR (Dantec-Ettemeyer) herangezogen. Dazu ist es wichtig, der Software den richtigen Abstand zwischen Probe und Messkopf vorzugeben und mit Hilfe eines Berandungseditors den Bereich auszuwählen, der ausgewertet werden soll. Danach wurde die Verschiebung bei jeder Kraftstufe von der Software ausgewertet und zu einer Gesamtverschiebung addiert. Um geringe Rauscheinflüsse zu eliminieren, wurden die Daten noch geglättet und mit einem Medianfilter gefiltert.

Die dadurch gewonnen Verschiebungsverteilungen der x- und y- Richtung ($\partial_{u_x}, \partial_{u_y}$) wurden nach den Formeln 8-10 numerisch differenziert, um die entsprechenden Dehnungskomponenten zu erhalten.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (8)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (9)$$

$$\epsilon_{xy} = \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] \quad (10)$$

ϵ_{xx}	Querdehnung
ϵ_{yy}	Längsdehnung
ϵ_{xy}	Schubdehnung

Die numerische Differenzierung wurde ebenfalls mit der Software ISTRA bewerkstelligt. Aus den differenzierten Dehnungsverteilungen wurden mit Hilfe eines Messtools Mittelwerte bestimmt und somit die gewünschten Dehnungen abgelesen. Zusätzlich können die Verschiebungs- und Dehnungsverteilungen auch in Falschfarben angezeigt werden, um die Verteilungen optisch beurteilen zu können.

Die somit ermittelten Dehnungswerte der entsprechenden Proben wurden verwendet, um mit den Formeln 11 und 12 die Poissonzahlen beziehungsweise die Schubmoduli zu berechnen.

$$\mu_{yx} = \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} \quad (11)$$

$$G = \frac{\sigma}{\epsilon_{xy}} \quad (12)$$

σ	Spannung [N/mm ²]
G	Schubmodul [N/mm ²]

Bei den Messungen der Poissonzahlen mit Hilfe von Laser/VideoXtens werden die Dehnungen von der dazugehörigen Software vollautomatisch ausgewertet und der dazugehörige Wert ausgegeben.

2.4.2 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Im Zuge der Messung der Poissonzahlen der verschiedenen Materialien wurden von jedem Material sowie von jeder Richtung von Vollholz mindestens zehn Proben geprüft. Bei der Dehnungsmessung mit ESPI wurde von den Ergebnissen der beiden Probenoberflächen der Mittelwert gebildet.

In diesem Abschnitt werden kurz die statistischen Kennwerte, die zur Beschreibung und Beurteilung der Messergebnisse herangezogen wurden, beschrieben (Formel 13-15):

- Mittelwert (\bar{x}):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

- Standardabweichung (s):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

- Variationskoeffizient (COV):

$$COV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (15)$$

x_i Wert einer einzelnen Messung

n Anzahl der Messungen

Des Weiteren wurde, um die beiden Messreihen von ESPI und der Laser/VideoXtens Technik von Fichte und Eiche miteinander zu vergleichen, ein zweiseitig gepaarter Wilcoxon-Test durchgeführt. Im Vorfeld wurde der Shapiro-Wilk-Test zur Prüfung auf Normalverteilung angewandt.

3 Ergebnisse

3.1 Eiche

Die Poissonzahlen von Eiche wurden bei einer durchschnittlichen Holzfeuchtigkeit von 12% gemessen. Nach dem Sortieren der Ergebnisse und dem Ausschließen von Ausreißern wurden von den verschiedenen Messreihen der Mittelwert und der Korrelationskoeffizient gebildet (vgl. Formel 13-15). In Tabelle 5 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Mittelwerte der Messungen mit ESPI und Laser/VideoXtens zeigen annähernd dieselben Werte. Auffällig ist jedoch, dass die Korrelationskoeffizienten der Laser/VideoXtens Messungen größtenteils höher sind als jene der ESPI Messungen.

Zum Vergleich der beiden Messreihen wurde ein zweiseitiger gepaarter Wilcoxon-Test mit Hilfe der Statistiksoftware „R“ durchgeführt. Im Vorfeld wurde ein Shapiro-Wilk Test zum Test auf die Normalverteilung der Daten angewandt. Bei den meisten getesteten Datenreihen wurde die Hypothese, dass eine Normalverteilung vorliegt, abgelehnt. Beim durchgeführten zweiseitigen gepaarten Wilcoxon Test wurde die Nullhypothese: „Die wahre Differenz zwischen den Mittelwerten ist 0“ bis auf die Poissonzahlen μ_{LT} und μ_{RT} bestätigt. Die detaillierten Ergebnisse der beiden Tests befinden sich im Anhang.

Tabelle 5: Poissonzahlen von Eiche gemessen mit ESPI und Laser/VideoXtens

		ESPI	Laser/ (ε_i) VideoXtens (ε_q)
Holzfeuchtigkeit ω	[%]	12	12
\bar{x} [μ_{LR}]	[-]	0,46	0,43
CoV [μ_{LR}]	[%]	15	32
\bar{x} [μ_{LT}]	[-]	0,56	0,5
CoV [μ_{LT}]	[%]	11	16
\bar{x} [μ_{RL}]	[-]	0,06	0,05
CoV [μ_{RL}]	[%]	14	37
\bar{x} [μ_{RT}]	[-]	0,80	0,69
CoV [μ_{RT}]	[%]	3	22
\bar{x} [μ_{TL}]	[-]	0,04	0,03
CoV [μ_{TL}]	[%]	24	58
\bar{x} [μ_{TR}]	[-]	0,44	0,46
CoV [μ_{TR}]	[%]	7	38

3.2 Fichte

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für die Poissonzahlen von Fichte zu sehen. Nach dem Sortieren der Ergebnisse und dem Ausschließen von Ausreißern wurden von mindestens acht Proben pro Richtung der Mittelwert und der Korrelationskoeffizient gebildet. Es ist ersichtlich, dass es für μ_{LR} und μ_{LT} bei den Messungen mit der ESPI Technik keine Werte gibt. Es war im Zuge dieser Arbeit nicht möglich, sinnvolle Dehnungswerte für diese Richtungen zu erhalten, worauf in Kapitel 4 näher eingegangen wird. Bei den übrigen Richtungen zeigen die beiden Messmethoden größtenteils übereinstimmende Ergebnisse.

Zum Vergleich der beiden Messmethoden wurden wie bei Eiche der Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung und ein gepaarter zweiseitiger Wilcoxon-Test durchgeführt. Da bei einigen Richtungen keine Normalverteilung nachgewiesen werden konnte, wurde der zweiseitig gepaarte Wilcoxon-Test angewandt. Der Test zeigt, dass die Nullhypothese: „Die wahre Differenz zwischen den Mittelwerten ist 0“ für keine der Messreihen abgelehnt werden kann. Im Gegensatz zu Eiche fallen hier die Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Messmethoden nicht so unterschiedlich aus.

Tabelle 6: Poissonzahlen von Fichte gemessen mit ESPI und Laser/VideoXtens

		ESPI	Laser (ε_l)/ VideoXtens (ε_q)
Holzfeuchtigkeit ω	[%]	12	12
\bar{x} [μ_{LR}]	[-]	-	0,71
CoV [μ_{LR}]	[%]	-	37
\bar{x} [μ_{LT}]	[-]	-	0,64
CoV [μ_{LT}]	[%]	-	35
\bar{x} [μ_{RL}]	[-]	0,11	0,12
CoV [μ_{RL}]	[%]	60	59
\bar{x} [μ_{RT}]	[-]	0,66	0,68
CoV [μ_{RT}]	[%]	8	12
\bar{x} [μ_{TL}]	[-]	0,04	0,03
CoV [μ_{TL}]	[%]	78	88
\bar{x} [μ_{TR}]	[-]	0,74	0,69
CoV [μ_{TR}]	[%]	8	18

3.3 Eternit und HDF

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse der Messung der Poissonzahlen von Eternit. Da ebenfalls untersucht wurde, ob bei den Werten eine Richtungsabhängigkeit zu sehen ist, wurden insgesamt 38 verschiedene Proben gemessen. Dabei konnte keine Abhängigkeit der Produktionsrichtung festgestellt werden. Der Mittelwert der Werte liegt bei $\mu = 0,18$ und der Variationskoeffizient beträgt $\text{CoV} = 23\%$.

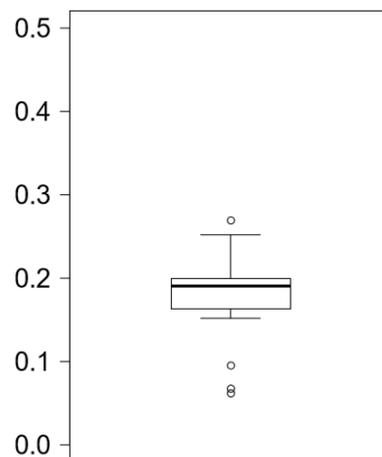


Abbildung 14: Poissonzahl von Eternit gemessen mit ESPI

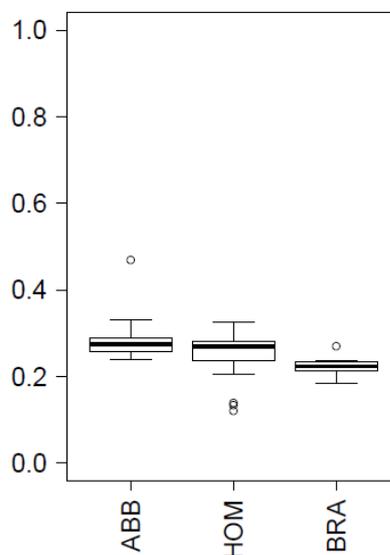


Abbildung 15: Poissonzahl von HDF gemessen mit ESPI

Die Ergebnisse der Messungen an den drei verschiedenen HDF-Sorten sind in Abbildung 15 zu sehen. Von den unterschiedlichen Herstellern ABB und HOM wurden jeweils 20 Proben und von dem Hersteller BRA wurden 10 Proben ausgewertet. Die Mittelwerte der verschiedenen Produkte liegen zwischen $\mu = 0,23$ und $0,28$ mit Variationskoeffizienten zwischen $\text{CoV} = 13\%$ und 23% .

3.4 WPC

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Messungen der Poissonzahl der sechs verschiedenen WPC-Rezepturen zu sehen. Die Werte der verschiedenen Rezepturen liegen alle im selben Bereich und die Abweichungen der einzelnen Messwerte vom Mittelwert sind relativ gering. Die Variationskoeffizienten der verschiedenen Messreihen liegen mit COV = 5% und 12% in einem sehr niedrigen Bereich.

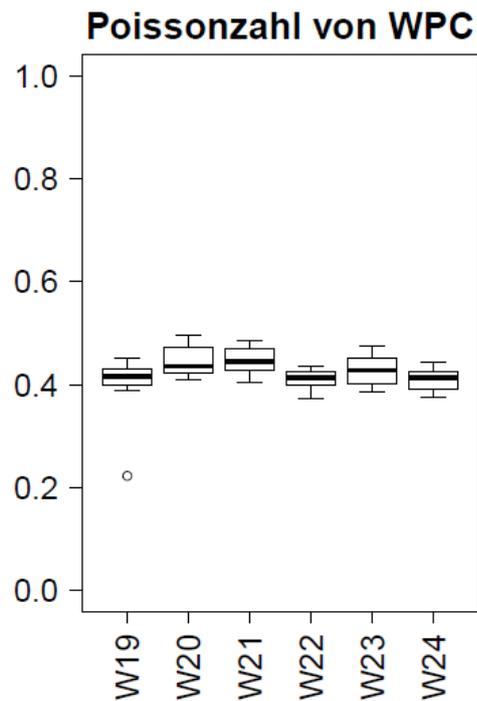


Abbildung 16: Poissonzahlen verschiedener WPC Proben gemessen mit ESPI

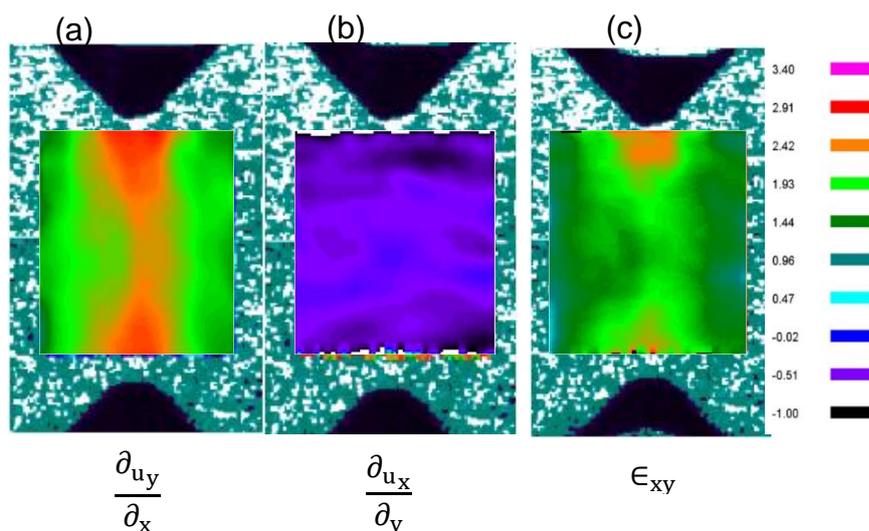


Abbildung 17: Falschfarbendarstellung der Dehnungskomponenten (W20_1.2) (a) Horizontale Dehnungskomponente; (b) Vertikale Dehnungskomponente; (c) Scherdehnung

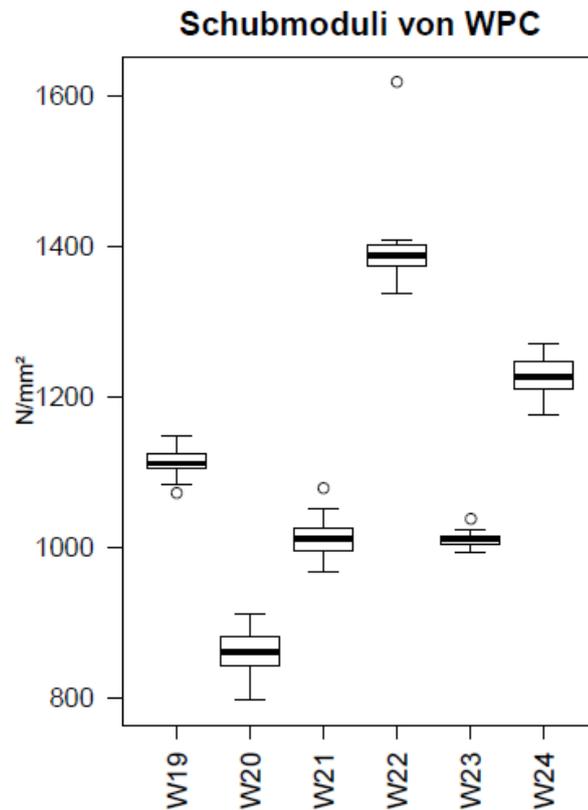


Abbildung 18: Schubmoduli von WPC gemessen mit ESPI

In Abbildung 17 sind die verschiedenen Dehnungskomponenten innerhalb einer Arcan-Scher-Probe dargestellt. Die vertikale Komponente (a) ist eindeutig zwischen den beiden v-förmigen Einkerbungen ausgebildet. Die horizontale Dehnungskomponente (b) ist relativ gleichmäßig über den betrachteten Bereich ausgebildet und liegt mit $-0,59$ relativ nahe bei 0. Da die horizontale Komponente nur ungefähr 20% der vertikalen Dehnungskomponente beträgt, bildet sich bei der Addition der beiden Komponenten (vgl. Formel 10) ein eindeutig erkennbares Schubfeld (c) aus.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Schubmodulmessungen der WPC Proben zu sehen. Die Mittelwerte liegen zwischen $G = 861 \text{ N/mm}^2$ (W20) und 1403 N/mm^2 (W22) und die Variationskoeffizienten betragen im Schnitt $\text{COV} = 3\%$.

4 Diskussion

Aufbauend auf der zu Beginn gestellten Frage, ob die in der Literatur genannten Werte bezüglich der Poissonzahlen von Fichte und Eiche mit modernen Messmitteln nachvollziehbar sind, werden in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 19 und 20) die in dieser Arbeit ermittelten Werte mit Literaturwerten (siehe auch Kapitel 1.2) verglichen.

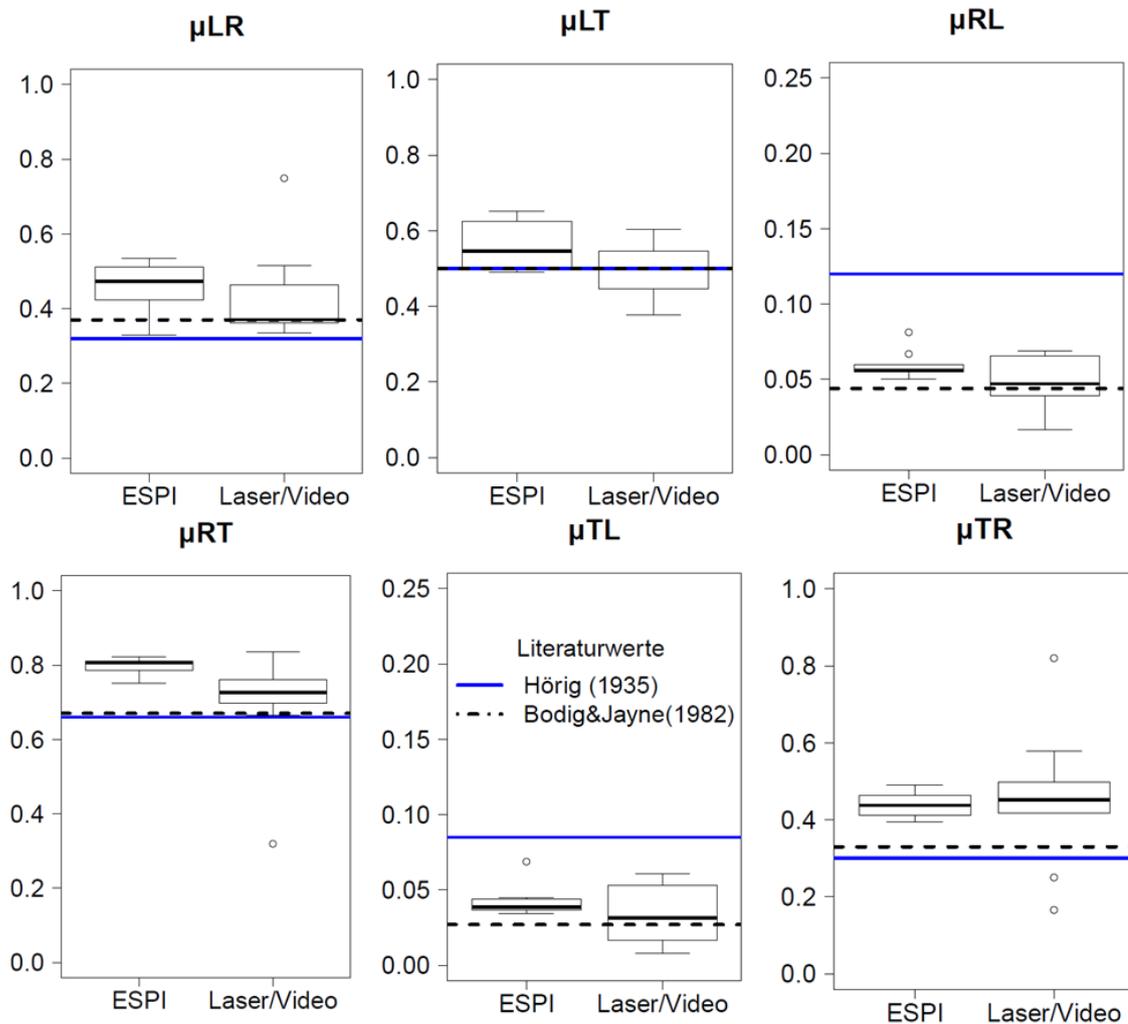


Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse der Poissonzahlen für Eiche der ESPI und der Laser/VideoXtens Messungen (Box plots) mit den Daten aus der Literatur (Hörig (1935) durchgezogene und punktierte Linie (Bodig und Jayne (1982))

Für Eiche zeigen sich für die unterschiedlichen Richtungen teilweise starke Differenzen zwischen den einzelnen Literaturquellen, wohingegen bei eigenen Messungen keine oder nur geringfügige Differenzen der Mittelwerte der zwei Messmethoden beobachtet wurden. Dennoch zeigt sich für die Poissonzahlen μ_{LT} und μ_{RT} ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Messmethoden. Im Falle der Richtung μ_{LT} sind die Unterschiede gerade signifikant. Hingegen ist bei der Richtung μ_{RT} ein hoch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Messungen zu sehen.

Bei allen Messergebnissen von Eiche wurden tendenziell für die Laser/VideoXtens Messungen (ausgenommen für Richtung μ_{TR}) geringere Werte ermittelt als für die ESPI Methode und die Streuung der ESPI Messungen sind tendenziell niedriger, wobei zu bedenken ist, dass es sich bei den ESPI Ergebnissen um Mittelwerte zwischen den beiden Probenoberflächen handelt. Es wird daher vermutet, dass bei beiden Messmethoden ein geringer systematischer Einfluss vorhanden ist.

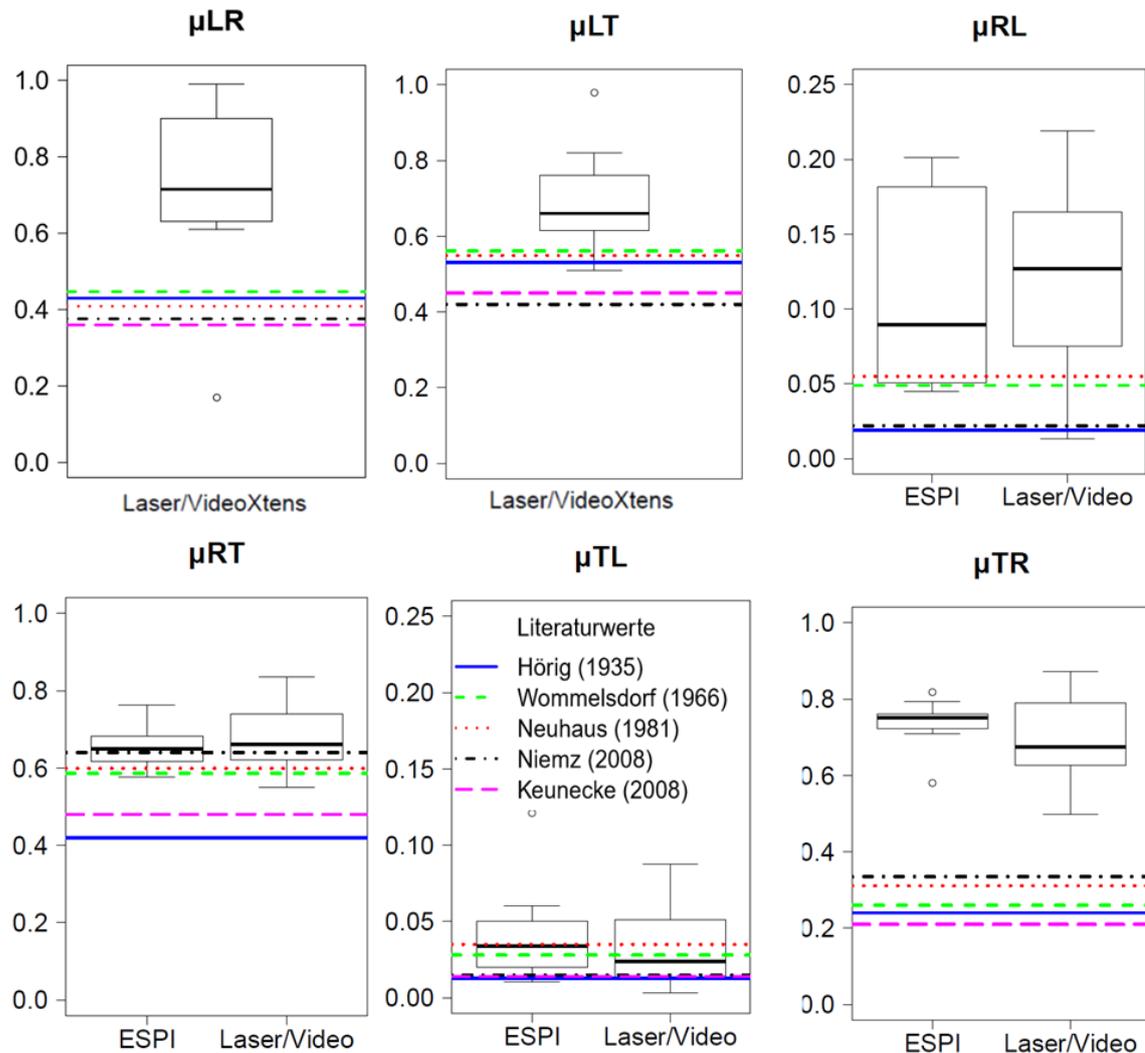


Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse der Poissonzahlen für Fichte der ESPI und der Laser/VideoXtens Messungen (Box plots) mit den Daten aus der Literatur (blaue durchgezogene Linie (Hörig 1935), grün strichlierte Linie (Wommelsdorf 1966), rot-punktierte Linie (Neuhaus 1981), schwarz-strichpunktierte Linie (Niemz 2008), rosa-strichlierte Linie (Keunecke 2008))

Obwohl mehrere Versuchsdurchläufe mit der ESPI Methode durchgeführt wurden, konnten keine Vergleichswerte für die Richtung LR und LT erhoben werden. Aufgrund der höheren Zugbelastungen in Längsrichtung ist zu vermuten, dass es während der Haltestufen zu geringfügigen Relaxationen bzw. zu Schlupf im Bereich der Einspannvorrichtungen kommt, wodurch die Messung empfindlich gestört wird.

Diese Messstörung kann bereits an der Bewegung der Fringes während des Messvorganges erkannt werden. Stehen die Fringes während der Haltestufen nicht still, können keine reproduzierbaren Werte ermittelt werden. Eine exakte Analyse der Beeinflussung konnte im Zuge dieser Arbeit nicht mehr abgeschlossen werden. Bei Eiche kann die Probe quer zur Faser für die Belastung in Faserrichtung mit deutlich höheren Kräften gespannt werden. Damit können Gleitungen im Bereich der Einspannvorrichtung verhindert werden. Daher konnten für Eiche, im Gegensatz zu Fichte, auch in LR und LT Richtung Werte ermittelt werden. Abbildung 19 zeigt, dass insbesondere zu den von Bodig und Jayne (1982) publizierten Werten für Eiche eine grobe Übereinstimmung besteht. Die Werte von Hörig (1935) weichen insbesondere in der RL und TL Richtung deutlich von den eigenen Messwerten ab. Aufgrund der Tatsache, dass die eigenen Messwerte von Eiche mit zwei Systemen unabhängig voneinander erhoben wurden und sich mehrheitlich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messserien haben nachweisen lassen, wird angenommen, dass die erhobenen Ergebnisse nahe an die tatsächlichen Poissonzahlen heranreichen.

Für Fichte zeigen sich jedoch generell starke Abweichungen zu den Referenzwerten aus der Literatur, zwischen den beiden Messmethoden konnten hingegen keine Unterschiede festgestellt werden. Die Werte liegen generell über den Referenzwerten. Weiter zeigt auch Abbildung 20, dass die Referenzwerte untereinander mehr oder weniger starke Abweichungen zueinander aufweisen. Im Folgenden wird mit theoretischen Darlegungen versucht, eine Erklärung dafür zu finden.

Zur Kontrolle der Messungen wurde neben den Poissonzahlen auch der Elastizitätsmodul der jeweiligen Proben ausgewertet. Diese liegen für die jeweiligen Richtungen außer bei E_T Fichte (287 N/mm^2), welcher relativ niedrig ist, im zu erwartenden Bereich (Tabelle 8). Zur weiteren Analyse der Werte wird die aus der Elastizitätstheorie (Kapitel 1.1.1) gewonnene Symmetriebedingung herangezogen (siehe Formel 5), in der die jeweiligen Verhältnisse der Poissonzahl und des E-Moduls für die unterschiedlichen Richtungen (z.B. $\mu_{RL}/E_R = \mu_{LR}/E_L$) übereinstimmen müssten.

Für eine nähere Betrachtung der erfüllten oder nicht-erfüllten Symmetrieverhältnisse für Eiche und Fichte wurden diese Verhältnisse für alle Richtungen errechnet (siehe Tabelle 7). Für die Berechnung wurden jeweils die gemittelten Messwerte zwischen ESPI und Laser/VideoXtens in Formel 5 eingesetzt. Für eine leichtere Lesbarkeit der Verhältniszahlen wurde der E-Modul in GPa in Formel 5 eingesetzt.

Tabelle 7: Vergleich der Symmetriebedingung von Fichte und Eiche

Holzart	μ_{LR}/E_L	μ_{RL}/E_R	μ_{LT}/E_L	μ_{TL}/E_T	μ_{RT}/E_R	μ_{TR}/E_T
Fichte	0,05	0,11	0,05	0,13	0,67	2,49
Eiche	0,04	0,03	0,04	0,04	0,46	0,55

Wie in Tabelle 7 ersichtlich, wird für Eiche die Bedingung relativ gut erfüllt, d.h. die jeweiligen Verhältniszahlen in den unterschiedlichen Richtungen zeigen nur geringfügige Abweichungen zueinander. Bei Fichte hingegen stimmen die Gleichungen so gut wie gar nicht überein. Was auch in Bodig und Jayne (1982); Garab et al. (2010) und Neuhaus (1981) beschrieben wird. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Holz zwar theoretisch als linear elastisches orthotropes Material angesehen wird, was bei vielen Naturstoffen nur als Annäherung gesehen werden kann, jedoch könnte Nadelholz durch seinen mikroskopischen Aufbau relativ stark von dieser Annahme abweichen (Garab et al. 2010). Da jedoch in manchen Arbeiten (z.B.: Keunecke et al. 2008) diese Bedingung herangezogen wurde, um einige Poissonzahlen von Fichte zu berechnen, könnte es sein, dass dies eine Ursache für den Unterschied zwischen den eigenen und den Referenzwerten darstellt. Auch schon eine geringe Abweichung der Lage der Jahrringe, was in einigen Richtungen durchwegs ein Problem darstellt, kann ebenfalls schon zu erheblichen Abweichungen führen (Hörig 1935; Keunecke et al. 2008).

Die Abweichungen von den Symmetriebedingungen wurden in einer weiteren Arbeit am Institut ausgiebig untersucht (Kumpenza et al. 2017). Dabei wurden insgesamt vier verschiedene Messsysteme kreuzvalidiert und für die Ermittlung der E-Moduli und der Poissonzahlen herangezogen. Die hier dargestellten Werte wurden dabei bestätigt. Es wird daher davon ausgegangen, dass die von einigen Autoren verwendeten Symmetriebedingungen für Fichtenholz nicht gültig sind.

Zur weiteren Überprüfung des Messaufbaus werden die gemessenen WPC Proben, bei denen die Ergebnisse von E-Modul, Schubmodul und Poissonzahlen vorliegen, herangezogen. Ihnen wird ein isotropes Materialverhalten, was in mehreren Vorversuchen bestätigt wurde, zugeschrieben. Daher gilt Formel 16 (Scheffler und Callister 2012):

$$G = \frac{E}{2*(1+\mu)} \quad (16)$$

In Abbildung 21 sind die Mittelwerte der gemessenen Schubmoduli der verschiedenen WPC Sorten (orange) und die mit dem gemessenen E-Modulen und Poissonzahlen berechneten Schubmoduli (blau) aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die beiden Datenreihen überwiegend die gleichen Werte liefern. Da die WPC Sorten im Vorhinein nach der Höhe des E-Moduls sortiert wurden, ist auch ein linearer Anstieg des Schubmoduls mit steigendem E-Modul erkennbar.

Aufgrund der Tatsache, dass die im Zuge dieser Arbeit bestimmten elastischen Kennwerte von WPC dem in der Literatur angegebenen Zusammenhängen folgen und dass die gewonnenen Werte aus den ESPI und den Laser/VideoXtens Messungen für Fichte und Eiche dieselben Werte liefern, kann vermutet werden, dass die beiden Messaufbauten zur Bestimmung der Poissonzahlen geeignet sind und dass, zumindest für die verwendeten Proben, die Ergebnisse für die Poissonzahlen richtige Werte liefern.

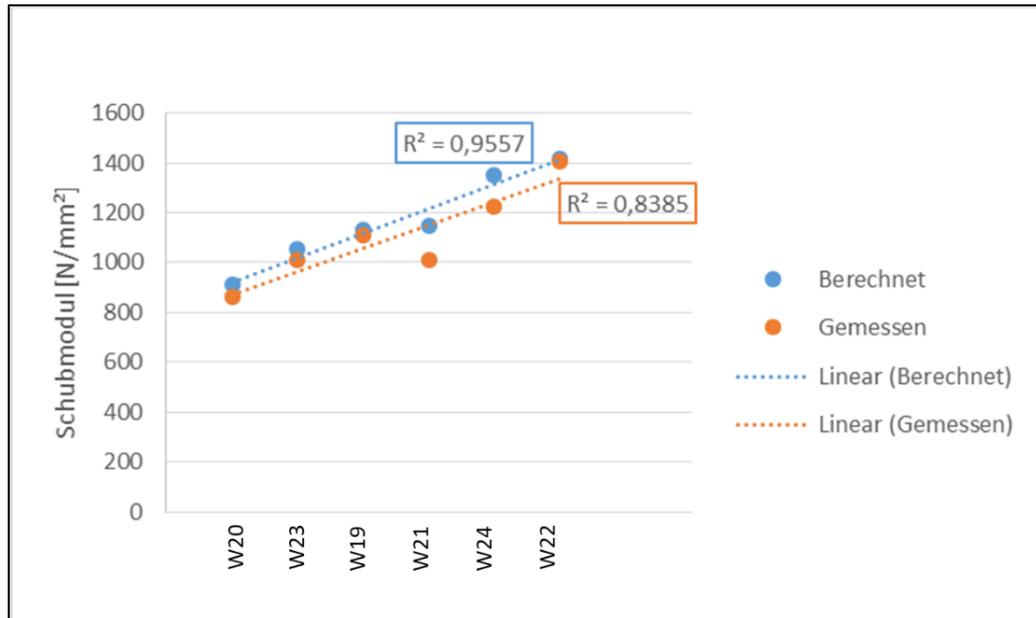


Abbildung 21: Vergleich zwischen dem berechneten (vgl. Formel 16) und gemessenen Schubmodul für die verschiedenen WPC Proben.

Aufgrund der Empfehlung durch Müller et al. (2015) wurden die gesamten ESPI Messungen mit zwei Messköpfen durchgeführt, da es schon bei geringen Verdrehungen der Probe zu stark abweichenden Ergebnissen kommen kann (Müller et al. 2015). Dies war auch bei vielen Messungen dieser Arbeit der Fall und die zweiseitige Messung hat zu einer starken Abnahme des Variationskoeffizienten geführt.

Der Versuch den Schubmodul von WPC mit Hilfe des Arcan-Scher-Tests zu bestimmen, brachte sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Das Problem, dass Normaldehnungen die Ergebnisse beeinflussen, wurde durch das gewählte Test Setup weitestgehend minimiert, sodass ein eindeutiges Schubfeld (Abbildung 17) im reduzierten Bereich der Proben entstand.

5 Schlussfolgerung

Folgende Schlussfolgerungen können aus der gesichteten Literatur und den durchgeführten Messungen gezogen werden:

- Die kontaktlosen optischen Dehnungsmessmethoden ESPI und Laser/VideoXtens können zur Bestimmung der Poissonzahlen von Holz und Holzwerkstoffen verwendet werden. Bei ESPI ist die Messung der Dehnungen an beiden Probenoberflächen durch die Verbesserung des Variationskoeffizienten zu empfehlen. Die Verwendung von Laser/VideoXtens ist den ESPI Messungen in Hinblick auf den Zeitaufwand und die Komplexität des Versuchsaufbaus vorzuziehen, jedoch zeigen diesbezügliche Messungen höhere Streuungen innerhalb der Messreihen.
- Die bestimmten Poissonzahlen von Eiche können die Referenzwerte weitestgehend bestätigen. Bei Fichte liegen die gemessenen Werte teilweise signifikant über den Literaturwerten. Es wurde versucht, mit verschiedenen Ansätzen, die eigenen Werte zu bestätigen.
- Der Arcan-Scher-Test in Kombination mit ESPI liefert sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Die anfangs beschriebene Forderung, dass ein einheitliches Scherfeld innerhalb der Probe entsteht, wird dadurch bestätigt, dass die Normaldehnungen sehr nahe bei Null liegen.

6 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Umsetzung der Masterarbeit unterstützt haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller für die kompetente und engagierte Betreuung. Auch allen anderen beteiligten Personen des Instituts für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe möchte ich für die Unterstützung bei meiner Arbeit danken. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Frau Ingrid Felber von Weitzer Parkett für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit und für die Bereitstellung einer Praktikumsstelle. Des Weiteren gilt mein Dank meinen Studienkollegen und Freunden, mit denen ich im Laufe meines gesamten Studiums viel erleben durfte. Besonderen Dank darf ich auch meiner Familie, besonders meinen Eltern und meiner Freundin aussprechen, die mich während der gesamten Zeit meines Studiums unterstützt haben.

Ebenso möchte ich mich für die finanzielle Unterstützung durch das Projekt "WoodC.A.R." (Projekt Nr.: 861.421), gefördert durch die Österreichische Förderungsgesellschaft (FFG), Steirische Wirtschaftsförderung (SFG) sowie Standortagentur Tirol unter der Teilnahme der Firmenpartner DOKA GmbH, DYNAMORE GmbH, EJOT Austria GmbH, Forst-Holz-Papier, Holzcluster Steiermark GmbH, IB-Steiner, Lean Management Consulting GmbH, Magna Steyr Engineering GmbH & Co KG, MAN Truck & Bus AG, Mattro Mobility Revolutions GmbH und Weitzer Parkett GmbH & CO KG bedanken.

7 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, am _____

Philipp Matz

8 Literaturverzeichnis

- American Society for Testing Materials (1981) Standard methods of testing small clear specimens of timber. ASTM D-143-52. Philadelphia, PA.
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982): *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Carrington, H. (1921): "XVII. The Determination of Values of Young's Modulus and Poisson's Ratio by the Method of Flexures." *The London, Edingurh, and Philosophical Magazine and Journal of Science* 41(242): 206–210.
- Carrington, H. (1922): The elastic constants of spruce as affected by moisture content. *Aeronautical Journal* 26: 462–471.
- Eberhardsteiner, J. (2002): *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz: Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Springer.
- Garab, J., Keunecke, D., Hering, S., Szalai, J., & Niemz, P. (2010): Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson's ratios of spruce and yew wood in the transverse plane. *Wood Science and Technology* 44(3): 451–464.
- Gingerl, M. (1998): Realisierung eines optischen Deformationsmeßsystems zur experimentellen Untersuchung des orthotropen Materialverhaltens von Holz bei biaxialer Beanspruchung. Fakultät Für Bauingenieurwesen.
- Grimsel, M. (1999): *Mechanisches Verhalten von Holz - Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes*. Doctoral Thesis.
- Hörig, H. (1935): Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz. *Ingenieur-Archiv* 6: 8–14.
- Keunecke, D., Hering, S., & Niemz, P. (2008): Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Science and Technology* 42(8): 633–647.
- Klein, B. (2012): *FEM*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kollmann, F. F. P., & Cote, W. A. J. (1968): *Principles of Wood Science and Technology - Solid Wood*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kumpenza, C., Matz, P., Halbauer, P., Grabner, M., Feist, F., & Müller, U. (2017): Measuring Poisson's ratio: Mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques. Under Review.
- Leitgeb, Kirschbichle, & Al., E. (2006): Holz im strukturellen Fahrzeugbau. . Retrieved November 28, 2017, from http://www.woodcar.eu/wa_files/leitgeb_kirschbichler_etal_holz_im_strukturellen_fahrzeugbau_2internationales_fahrzeugkolloquium_s35-46_ihd_dresden_2016.pdf
- Müller, U. (2003): Effects of wood macro-and micro-structure on selected mechanical properties. Doctoral Thesis.
- Müller, U., Ringhofer, A., Brandner, R., & Schickhofer, G. (2015): Homogeneous shear stress field of wood in an Arcan shear test configuration measured by means of electronic speckle pattern interferometry: description of the test setup. *Wood Science and Technology* 49(6): 1123–1136.

- Müller, U., Sretenovic, A., Vincenti, A., & Gindl, W. (2005): Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 1: Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of electronic speckle pattern interferometry. *Holzforschung* 59(3): 300–306.
- Neuhaus, F. H. (1981): *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit* (Bochum. Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen). Inst. für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Univ.
- Niemz, P., & Caduff, D. (2008): Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 66(1): 1–4.
- Niemz, P., & Sonderegger, W. (2017): *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag München.
- Scheffler, M., & Callister, W. D. (2012): *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. Weinheim, Deutschland: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Schulze, G., & Vollhardt, E. (2013): *Werkstoffprüfung für Maschinen- und Eisenbau*. Springer-Verlag.
- Siebel, E. (2013): *Prüf- und Meßeinrichtungen*. Springer-Verlag.
- Sretenovic, A., Müller, U., Gindl-Altmatter, W., & Teischinger, A. (2002): New modified shear assay – experimental results and finite element analysis. *Wood Fiber Science*.
- Stamer, J. (1935): Elastizitätsuntersuchungen an Hölzern. *Ingenieur-Archiv* 6(1): 1–8.
- Teibinger, A., & Müller, U. (2016): WoodCAR. . Retrieved November 28, 2017, from http://www.woodcar.eu/wa_files/ulrich_mueller_zukunftstag_25082016.pdf
- Valla, A. (2007): Ein Methodenvergleich zwischen zwei optischen, flächenhaften, berührungslosen Messverfahren zur Bestimmung von Verschiebungen an einer Holzprobe. Master Thesis 1–104.
- Voigt, W. (1928): *Kristallphysik*. Leipzig.
- Zwick/Roell (2017a): Produktinformation LaserXtens. . Retrieved November 18, 2017, from <https://www.zwick.de/extensometer/laserxtens-hp>
- Zwick/Roell (2017b): Produktinformation VideoXtens-Breitenänderungsaufnehmer. . Retrieved November 18, 2017, from <https://www.zwick.de/extensometer/videoxtens>

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfparameter für ESPI Messungen (Eiche)	19
Tabelle 2: Prüfparameter für ESPI Messungen (Fichte)	19
Tabelle 3: Prüfparameter für ESPI Messungen (WPC)	19
Tabelle 4: Prüfparameter für ESPI Messungen (HDF)	20
Tabelle 5: Poissonzahlen von Eiche gemessen mit ESPI und Laser/VideoXtens	29
Tabelle 6: Poissonzahlen von Fichte gemessen mit ESPI und Laser/VideoXtens	30
Tabelle 7: Vergleich der Symetriebedingung von Fichte und Eiche	36
Tabelle 8: Vergleich der eigenen Messergebnisse von E-Modul und Poissonzahlen mit den Literaturwerten für Fichte	46
Tabelle 9: Vergleich der eigenen Messergebnisse von E-Modul und Poissonzahlen mit den Literaturwerten für Eiche	47
Tabelle 10: Messergebnisse von E-Modul, Schubmodul und Poissonzahl von WPC, HDF, Eternit	48
Tabelle 11: Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung (Shapiro Wilk Test) der Poissonzahlen von Fichte und Eiche	49
Tabelle 12: Ergebnisse des zweiseitigen gepaarten Wilcoxon Tests zum Vergleich der ESPI und Laser/VideoXtens Messungen	50

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Orthotropes Koordinatensystem für Vollholz (nach Gingerl 1998).....	7
Abbildung 2: Michelson-Interferometer – Grundprinzip (Gingerl 1998)	12
Abbildung 3: Entstehungsprinzip des subjektiven Speckle-Effekts (Gingerl 1998).....	13
Abbildung 4: Schematischer ESPI Aufbau für In-plane Messungen (nach Müller et al. 2005).....	13
Abbildung 5: ESPI Auswerteschema für eine einzelne Messrichtung (Gingerl 1998).....	15
Abbildung 6: WPC Probe zur Bestimmung der Poissonzahl	19
Abbildung 7: Skizze einer WPC Probe zur Messung des Schubmoduls [mm]	20
Abbildung 8: Aufnahme für den Arcan-Scher-Test mit eingespannter Probe	21
Abbildung 9: Prüfaufbau zur Messung der Poissonzahlen mit ESPI	22
Abbildung 10: Prüfaufbau zur Bestimmung des Schubmoduls mit ESPI.....	23
Abbildung 11: Prüfaufbau zur Bestimmung der Poissonzahlen mit Laser/VideoXtens ...	23
Abbildung 12: Kraft-Dehnungskurve mit mehreren Haltestufen (Beispiel).....	25
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messaufbaus bzw. der Messdurchführung von ESPI (a) und Laser/VideoXtens (b) zur Messung der Poissonzahlen.....	26
Abbildung 14: Poissonzahl von Eternit gemessen mit ESPI	31
Abbildung 15: Poissonzahl von HDF gemessen mit ESPI	31
Abbildung 16: Poissonzahlen verschiedener WPC Proben gemessen mit ESPI.....	32
Abbildung 17: Falschfarbendarstellung der Dehnungskomponenten (W20_1.2) (a) Horizontale Dehnungskomponente; (b) Vertikale Dehnungskomponente; (c) Scherdehnung.....	32
Abbildung 18: Schubmoduli von WPC gemessen mit ESPI	33
Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse der Poissonzahlen für Eiche der ESPI und der Laser/VideoXtens Messungen (Box plots) mit den Daten aus der Literatur (Hörig (1935) durchgezogene und punktierte Linie (Bodig und Jayne (1982)	34
Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse der Poissonzahlen für Fichte der ESPI und der Laser/VideoXtens Messungen (Box plots) mit den Daten aus der Literatur (blaue durchgezogene Linie (Hörig 1935), grün strichlierte Linie (Wommelsdorf 1966), rot-punktierte Linie (Neuhaus 1981), schwarz-strichpunktierte Linie (Niemz 2008), rosa-strichlierte Linie (Keunecke 2008)	35
Abbildung 21: Vergleich zwischen dem berechneten (vgl. Formel 16) und gemessenen Schubmodul für die verschiedenen WPC Proben.....	38

11 Anhang

Tabelle 8: Vergleich der eigenen Messergebnisse von E-Modul und Poissonzahlen mit den Literaturwerten für Fichte

		Eigene Messungen			Referenzwerte			
		ESPI	Laser/VideoXtens	Hörig (1935)	Wommelsdorf (1966)*	Neuhaus (1981)	Niemz Caduff (2008)	Keunecke et al. (2008)
Holzfeuchtigkeit ω	[%]	12	12	9.8	13.7	12	12.1	12
\bar{x} [E _L]	[N/mm ²]	-	14635	16324	11287	11877	11496	12800
CoV [E _L]	[%]	-	18.2	-	-	-	20	9.2
\bar{x} [μ_{LR}]	[-]	-	0.706	0.43	0.447	0.409	0.376	0.36
CoV [μ_{LR}]	[%]	-	36.6	-	-	-	26	13.2
\bar{x} [μ_{LT}]	[-]	-	0.64	0.53	0.561	0.549	0.420	0.45
CoV [μ_{LT}]	[%]	-	35	-	-	-	18	8.2
\bar{x} [E _R]	[N/mm ²]	970	1038	699	980	817	1099	625
CoV [E _R]	[%]	16.7	17.1	-	-	-	12	20.4
\bar{x} [μ_{RL}]	[-]	0.110	0.120	0.019	0.049	0.055	0.022	0.018
CoV [μ_{RL}]	[%]	60.1	58.7	-	-	-	62	-
\bar{x} [μ_{RT}]	[-]	0.656	0.681	0.42	0.586	0.599	0.640	0.48
CoV [μ_{RT}]	[%]	8.2	12.2	-	-	-	17	19.2
\bar{x} [E _T]	[N/mm ²]	293	281	400	429	420	452	397
CoV [E _T]	[%]	27.5	23.6	-	-	-	13	10.3
\bar{x} [μ_{TL}]	[-]	0.041	0.033	0.013	0.028	0.035	0.015	0.014
CoV [μ_{TL}]	[%]	78.1	87.9	-	-	-	42	-
\bar{x} [μ_{TR}]	[-]	0.739	0.690	0.24	0.26	0.311	0.335	0.21
CoV [μ_{TR}]	[%]	7.6	18.1	-	-	-	33	16.8

Tabelle 9: Vergleich der eigenen Messergebnisse von E-Modul und Poissonzahlen mit den Literaturwerten für Eiche

		Eigene Messungen		Referenzwerte		
		ESPI	Laser/VideoXtens	Hörig (1935)	Bodig & Jayne (1982)	Ozyhar (2016)
Holzfeuchtigkeit ω	[%]	12	12	9.8	-	12
\bar{x} [E_L]	[N/mm ²]	12231	11708	-	-	7590
CoV [E_L]	[%]	23	18,5	-	-	20
\bar{x} [μ_{LR}]	[-]	0,46	0,43	0,32	0,37	0,40
CoV [μ_{LR}]	[%]	15	32	-	-	7
\bar{x} [μ_{LT}]	[-]	0,56	0,5	0,5	0,50	0,49
CoV [μ_{LT}]	[%]	11	16	-	-	13
\bar{x} [E_R]	[N/mm ²]	1670	1602	-	-	1420
CoV [E_R]	[%]	10	10,3	-	-	17
\bar{x} [μ_{RL}]	[-]	0,06	0,05	0,12	0,044	0,11
CoV [μ_{RL}]	[%]	15	37	-	-	16
\bar{x} [μ_{RT}]	[-]	0,80	0,69	0,66	0,67	0,71
CoV [μ_{RT}]	[%]	3	22	-	-	3
\bar{x} [E_T]	[N/mm ²]	840	796	-	-	730
CoV [E_T]	[%]	9	11	-	-	8
\bar{x} [μ_{TL}]	[-]	0,04	0,03	0,085	0,027	0,06
CoV [μ_{TL}]	[%]	23	58	-	-	14
\bar{x} [μ_{TR}]	[-]	0,44	0,46	0,3	0,33	0,29
CoV [μ_{TR}]	[%]	7	38	-	-	3

Tabelle 10: Messergebnisse von E-Modul, Schubmodul und Poissonzahl von WPC, HDF, Eternit

WPC	E-Modul [N/mm ²]	Variations- koeffizient [%]	Schubmodul [N/mm ²]	Variations- koeffizient [%]	Poissonzahl	Variations- koeffizient [%]
W19	3213,81	3,00	1111,61	2,00	0,41	12,00
W20	2627,84	4,00	861,50	4,00	0,45	6,00
W21	3316,89	2,00	1011,98	3,00	0,45	6,00
W22	3997,06	1,00	1403,16	6,00	0,41	4,00
W23	3002,06	2,00	1011,34	1,00	0,43	7,00
W24	3808,66	2,00	1226,61	3,00	0,41	5,00
HDF						
ABB	3587,79	9,00	-	-	0,28	17,00
HOM	3748,14	8,00	-	-	0,25	23,00
BRA	3054,03	13,00	-	-	0,23	10,00
Eternit	15410,49	5,00	-	-	0,18	23,00

Tabelle 11: Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung (Shapiro Wilk Test) der Poissonzahlen von Fichte und Eiche

Shapiro Wilk Test				
Holzart	Messmethode	Parameter	Statistik	P-Wert
Fichte				
	ESPI			
		μ_{RT}	0,96	0,76
		μ_{RL}	0,81	0,01
		μ_{TR}	0,83	0,01
		μ_{TL}	0,81	0,02
	Laser/VideoXtens			
		μ_{RT}	0,97	0,89
		μ_{RL}	0,95	0,63
		μ_{TR}	0,95	0,65
		μ_{TL}	0,90	0,02
Eiche				
	ESPI			
		μ_{LR}	0,93	0,43
		μ_{LT}	0,9	0,21
		μ_{RT}	0,84	0,05
		μ_{RL}	0,78	0,01
		μ_{TR}	0,98	0,93
		μ_{TL}	0,68	0,0003
	Laser/VideoXtens			
		μ_{LR}	0,71	0,003
		μ_{LT}	0,99	0,99
		μ_{RT}	0,72	0,003
		μ_{RL}	0,94	0,55
		μ_{TR}	0,92	0,36
		μ_{TL}	0,68	0,0003

Tabelle 12: Ergebnisse des zweiseitigen gepaarten Wilcoxon Tests zum Vergleich der ESPI und Laser/VideoXtens Messungen

	Zweiseitiger Wilcoxon Test		
Holzart	Parameter	Ränge	P-Wert
Fichte			
	μ_{RT}	22	0,58
	μ_{RL}	27	0,59
	μ_{TR}	42	0,42
	μ_{TL}	21	0,96
Eiche			
	μ_{LR}	22	0,58
	μ_{LT}	26	0,043
	μ_{RT}	44	0,01
	μ_{RL}	37	0,09
	μ_{TR}	23	0,65
	μ_{TL}	36	0,39

Im Zuge der Masterarbeit wurde auch an der Erstellung einer Publikation in einem referierten Journal mitgewirkt. Die Publikation befindet sich derzeit im Status der Einreichung und ist hier in Form des eingereichten Manuskripts dargestellt:

Measuring Poisson's ratio: Mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques

Cedou Kumpenza, Research fellow, corresponding author¹

Philipp Matz¹

Peter Halbauer¹

Maximilian Grabner¹

Florian Feist²

Ulrich Müller¹

¹Institute of Wood Technology and Renewable Materials,
Department of Material Science and Process Engineering,
University of Natural Resources and Live Sciences Vienna, Austria (BOKU)
Konrad Lorenz Strasse 24
A-3430 Tulln a.d. Donau, Austria
Email: cedou.kumpenza@boku.ac.at
Phone: +43 1 47654-89163
Fax: +43 1 47654-89109

²Vehicle Safety Institute,
Graz University of Technology
Inffeldgasse 23/I
A-8010 Graz, Austria

Abstract

In contemporary wood science, computer-aided engineering (CAE) systems are commonly used for the designing and engineering of high value products. In diverse CAE systems high fidelity models with a full material description, including elastic constants such as for instance Poisson's ratios, are needed. Only few studies have dealt in particular with the investigation of the Poisson's ratio of spruce wood (*Picea abies* (L.) Karst.) or wood in general. Therefore, in the presented study all six main Poisson's ratios of spruce wood were determined in uniaxial tensile experiments, employing optical gauging techniques like Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) and a combination of laser and video extensometry. Consistent results for the Poisson's ratios were found by applying these different optical gauging techniques. However, own measurements showed significant differences to values found elsewhere in literature. For that reason, the optical gauging techniques were evaluated with a conventional mechanical extensometer, which proved that there are no significant differences between the gauging techniques. Last but not least, this is the first study which employed, compared and evaluated the feasibility of different non-contact optical gauging techniques through direct comparison of the Poisson's ratios of spruce wood.

Keywords: Electronic Speckle Pattern Interferometry, Laser Extensometry, Norway Spruce, Optical Gauging techniques, Poisson's ratio, Video Extensometry

Introduction

Nowadays, computer-aided engineering (CAE) methods such as finite-element modeling (FEM) are used for the designing and engineering of high value products. Reliable FEM is based on a sound data basis of material properties, such as elastic constants, including the Poisson's ratio (μ). For anisotropic materials like wood the Poisson's ratio for one orthogonal direction is the ratio of the transversal contraction (transversal strain (ε_q)), to the axial extension (axial strain (ε_l)) (Bodig and Jayne 1982; Kohlhauser and Hellmich 2012). These parameters have mainly been investigated four to five decades ago by mechanical or electrical measurement systems (e.g. strain gauges, mechanical extensometer systems, inductive strain measurement devices), because of the lack of availability and the high price of optical measurement systems (Davis 2004).

The first examinations of the Poisson's ratio of spruce wood were conducted by Carrington (1921, 1922a, 1922b). He deduced the Poisson's ratio from flexure experiments by measuring the curvature in lateral direction (transversal strain (ε_q)) and longitudinal direction (axial strain (ε_l)) with a telescope. Hörig (1931) re-evaluated the data and adopted the ideas of Voigt (1882, 1887, 1928), about the orthotropic behavior of materials on wood. The model by Hörig (1935) is the basis for the orthotropic description of wood that is used nowadays. Further substantial studies on spruce wood were carried out by Wommelsdorff (1966) and Neuhaus (1981). They determined the six orthotropic Poisson's ratios using inductive strain measurement devices and also strain gauges by means of tensile and flexure experiments. Furthermore, also Niemz and Caduff (2008) and Keunecke et al. (2008) investigated the Poisson's ratio of spruce wood. Keunecke et al. (2008) have chosen Digital Image Correlation (DIC) to measure the strain distribution. DIC is a non-contact optical surface deformation gauging technique with many pros and cons (Chu et al. 1985; Zink et al. 1995; Pan et al. 2009; Valla et al. 2011). In regard to the inhomogeneity of wood, optical measurement methods that provide full-field results are essential to detect the mechanical material properties in a micro- or even nanoscale (Valla et al. 2011). Furthermore, these methods have the advantage to be contactless, which means avoiding any mechanical influences on the specimen. For the moment, however, studies on the characterization of the Poisson's ratio of spruce wood are scarce. So far, no study included a direct comparison of the Poisson's ratio measured with different non-contact gauging techniques like Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), laser extensometry and video extensometry. Former studies prove that these methods are suitable for the mechanical characterization of the elastic properties of wood (Gingerl 1998; Eberhardsteiner 2002; Samarasinghe and Kulasiri 2004; Gindl et al. 2005; Gindl and Müller 2006, Konnerth et al. 2006; Müller et al. 2005, Dahl and Malo 2009; Valla et al. 2011; Bader et al. 2015; Milch et al. 2017; Crespo and Guaita 2017). The principles of strain measurement of these techniques are different to the techniques used in previous studies.

Still, all methods used in this study are non-contact optical gauging techniques. Applying different measuring principles allows cross-checking and validation of the data.

ESPI is a non-contact gauging technique based on the Michelson Interferometer (Meschede 2015), which is used for planar strain measurement in the present study. The technique uses laser light (coherent light wave) together with a CCD camera to record displacements of the specimen surface. The surface is illuminated with a laser beam from two different planar directions, and the reflected light is registered by a CCD sensor. The ESPI system converts the light information into a speckled image, which describes the surface of the object. Deformation of the test specimen results in a new speckle pattern. By subtracting the new speckle pattern from the reference pattern an illustration with typical fringe pattern is obtained (Jones and Wykes 1989). In the next step, a phase-shift method is used to transform the fringe picture into a so called 2π -Modulo image, which is used to create a map of displacement (Eberhardsteiner 1995; An and Carlsson 2003; Müller et al. 2015). Additional material data (for example strain distribution) can be gained from the deformation map through post processing. More comprehensive information about the ESPI technique are available in other studies (Gingerl 1998, Eberhardsteiner 2002, Rastogi et al. 2001 and Müller et al. 2005).

The basic principles of the laser extensometry method are similar to the ESPI technique. A laser source radiates a beam, which is projected on the surface of the specimen. The reflected light beams are recorded on a camera sensor, which generates a speckle pattern on basis of the intensity distribution (Messphysik - Materials Testing 2017). The mechanical load induces movements on the object surface. Those movements indicate displacements of the speckle pattern as well. The core of the technique is to identify pattern areas of the initial picture in the upcoming images (Zwick/Roell 2017a). Due to the unique grey value distribution of any defined pattern area, it is possible to find these speckle zones in any upcoming deformation images. After that, a complex algorithm runs to find the motion of the defined speckle zone between the initial picture and the following images. For the estimation of the strain in one direction, it is necessary to perform this procedure on two self-contained pattern zones at least. More comprehensive information about the laser extensometry technique can be found elsewhere (Choi et al. 1991; Kamegawa 1999; Anwander et al. 2000; Jin et al. 2013; Zwick/Roell 2017a; Messphysik - Materials Testing 2017).

The video extensometry method is based on capturing ongoing images of the test specimen, for example during a tensile test by using a digital video camera. To capture the lateral movements, the test specimens need to be marked somehow (e.g. sticker, pen marker etc.) at least on two different positions. By using this method, it is important to have high contrast between the object surface and the measurements points (markers) to ensure unbiased results. While the specimen is stressed, the pixel distance between these markers are tracked continuously. Image processing algorithms are used to track these motions in real time. Automatically, a direct strain measurement value can be obtained by mapping these motion measurements against the initial specimen image.

For recording the transversal deformations of the test specimens no extra marking is required. In this case special edge detection algorithms are applied (Zwick/Roell 2017c). The video extensometry technique provides non-contact real time strain measurement in lateral and transversal direction independently from each direction. More specific information about the fundamentals of the technique can be found in Vial (2004), Wolverton et al. (2009), Bovik (2010), and (Zwick/Roell 2017c).

The present study focuses on determining the Poisson's ratio of spruce wood in all main orthogonal directions by means of the non-contact optical gauging techniques ESPI, laser extensometry and video extensometry, respectively. Therefore, a uniaxial tensile experiment was designed under real measuring conditions to generate comparable and truthful values. The main hypotheses of this study are:

- ESPI, laser extensometry and video extensometry are suitable for the detection of the Poisson's ratio of wood.
- Poisson's ratio gained by means of ESPI, laser extensometry and video extensometry will show no statistical significant differences.

Materials and methods

Material

Solid wood made of Norway spruce (*Picea abies (L.) Karst.*) specimens were used in the experiments. Sawn timber without noticeable defects like knots or cracks was meticulously selected. Semi-finished elements in the different anatomical directions were cut out of the boards by means of a circular saw. For producing the samples out of these elements, a CNC, a conventional planing and a milling machine were used. After manufacturing the raw material to the desired shape, samples were conditioned at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative humidity of 65 ± 5 % (after ISO 554) to an average moisture content of $\omega = 12$ %.

Bone shaped test specimens corresponding to DIN EN 52 188 (1979) were used when the wood was tested in longitudinal (L) direction. Due to the high stiffness of wood in longitudinal direction high forces and thus also high clamping forces had to be applied. To ensure no material failure and no slipping in the clamping area, those boned shaped test specimens were required. For samples, where the load was applied in tangential (T) or radial (R) direction, simplified strip-shaped test specimens with uniform cross section were manufactured ($20 \times 6 \times 120$ mm³ = width x height x length).

Because of the low stiffness in the transversal direction of wood, only low clamping forces and therefore no slippage was guaranteed. In accordance with the theory of Hörig (1935) six different samples (see Fig. 1) were necessary for the mechanical analysis of all main orthogonal Poisson's ratio: μ_{LR} , μ_{LT} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TL} and μ_{TR} . In this case the first character of the subscript stands for the direction of the longitudinal extension (longitudinal strain (ϵ_l)) and the second character of the subscript describes the direction

of the transversal contraction (transversal strain (ε_q)). In total, 60 specimens were tested, i.e. 10 in every direction.

Poisson's ratio calculation

In general, the phenomenon that axial extension (ε_l) of a rod results in transversal contraction (ε_q) was discovered 1760 by Poisson. The ratio of the passive deformation (normal to the direction of the applied force) to the active deformation (in direction of the applied force) is defined as Poisson's ratio (Bodig and Jayne 1982):

$$\mu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \quad (1)$$

Thus, for specimen RT as an example see Fig. 1 (b) left, the Poisson's ratio is defined as:

$$\mu_{RT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_R} \quad (\mu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad i, j \in R, L, T \text{ and } i \neq j) \quad (2)$$

More fundamentals about the Poisson's ratio can be found in Kollmann and Côté (1968), and Niemz and Sonderegger (2017).

Experiments

The material characterization with ESPI, laser extensometry, video extensometry and mechanical extensometer were performed by applying uniaxial tensile tests. All experiments were performed on a Zwick/Roell universal testing machine (Ulm, Germany), equipped with the control software Zwick/Roell TestXpert 2 V3.5. (Ulm, Germany).

ESPI measurement

In the first step, uniaxial tests were performed and elongation and contraction of the specimens were measured by means of the ESPI technique. For this two ESPI Q300 Dantec-Ettemeyer (Ulm, Germany) devices, with a maximal measurement resolution of 0.03 μm (Dantec Dynamics A/S 2017), were mounted on the machine to allow to measure deformation on the surface of the test specimens from both sides at the same time (Fig. 2 (a)). Müller et al. (2015) showed that in shear experiments, deformation on the front and back side of a test specimen can vary significantly. ESPI is highly sensitive, which can be affected by different factors, such as vibrations. Comparing test results from the front and the back side indicated immediately biased data. Additionally, higher precision of the ESPI results could be achieved by using the means value of the deformation measured on the front and back of the test specimens.

The ESPI Q300 Dantec-Ettemeyer devices were mounted to the testing machine in such way that the optical axis of both devices coincided and the specimen was clamped exactly in the center point in between both devices (Fig. 2 (a)). Any vibration of the devices was minimized by additional supporting frames. A free clamping length of 350 mm (for the bone shaped specimen Fig. 1 (a)) and 70 mm (for the strip-shaped specimen Fig. 1 (b and c)) was chosen. In both cases a field of view (FoV) of 26 x 13 mm² was used, to observe deformation on the test specimen.

To prevent biasing of the data due to vibration artefacts, a pre-force was applied before starting the test procedure to stabilize specimens. For longitudinal bone, shaped samples (Fig. 1 (a)) a pre-force of 100 N and for strip-shaped samples a pre-force of 20 N (Fig. 1(b)) and 10 N (Fig. 1(c)) was applied. The total deformation had to be established by accumulating the deformation determined in several load-steps, because of the high sensitivity of ESPI technique. It was assumed that two to three fringes in the y-axis picture would give reliable results per load step. The load-step had to be adjusted to the stiffness of the material. Stiff material would lead to large load steps, which could be selected. A load step of 100 N and 10 N was found to be appropriate for testing wood in longitudinal (Fig. 1(a)) and transversal (Fig. 1(b and c)) direction, respectively. At every load step the cross head of the testing machine was stopped for 5 sec. to capture the generated speckle images in x and y-direction. For all samples, total deformation was divided into six load steps, which resulted to a maximum load of 700 N tested in longitudinal, 80 N (Fig. 1(b)) and 70 N (Fig. 1(c)) in transversal direction. Therefore, samples were stressed to a $\sigma = 5.83 \text{ N/mm}^2$, $\sigma = 0.67 \text{ N/mm}^2$, and $\sigma = 0.58 \text{ N/mm}^2$ in longitudinal, radial and tangential direction, which corresponded to less than 20% of the breaking strength in the different directions. All ESPI images were recorded and analyzed with the post processing software ISTR A 2001 Dantec-Emmeyer (Ulm, Germany) to determine the Poisson's ratio, afterwards. For this, the mean values of axial and transversal strains were measured within the FoV and Poisson's ratio was calculated corresponding Eq. 1.

Laser- and videoXtens measurement

The laser- and video- extensometry measurements were carried out on a universal testing machine Zwick/Roell Z020, equipped with an optical extensometer system including both gauging techniques laserXtens and videoXtens (Ulm, Germany). Therefore, the extensometer system contains a gauging sensor, a digital camera and a laser light source. An absolute measurement accuracy of $0.11 \mu\text{m}$ of the laserXtens system is specified by the manufacturer. With the laserXtens system, axial and transversal strain measurements can be performed simultaneously (Zwick/Roell 2017a). The videoXtens device is a camera which is enclosed in a metal housing, with a measurement accuracy dependent of the Field of View (FoV) (Zwick/Roell 2017c). For FoV's smaller than 200 mm a measurement accuracy meeting the requirements specified in DIN EN ISO 9513 (2012). In this study, the FoV was selected such to ensure an accuracy of $0.2 \mu\text{m}$. As illustrated in Fig. 2 (b) the videoXtens device was positioned in the center of the extensometer system, which was flanked with two laser sources of the laserXtens device. The measuring points of the laserXtens were positioned on the upper and lower side of the specimen. For the bone-shaped samples the distance of the measuring points was 70 mm, whereas for the strip-shaped samples a distance of 40 mm was chosen, respectively. Contraction of the samples was measured in the center of the specimens.

For this, the videoXtens used the contrast of the edges of the specimen. Increased contrast of the edges was achieved by illuminating the specimen from the back. This set up was chosen because it is not possible to measure the axial strain (ε_l) and the transversal strain (ε_q) with videoXtens simultaneously.

First, laserXtens was applied for measuring strain in axial and transversal direction. In transversal direction, though, results showed a high variability.

Hence, a hybrid approach was selected, using laserXtens for measuring axial extension (ε_l) and videoXtens for transversal contraction (ε_q). Thereafter, the Poisson's ratio was calculated by means of the software TestXpert 2 V3.5 (Ulm, Germany) automatically. The clamping- and measurement-length for the bone-shaped samples (LR and LT) amounted 350 and 80 mm, respectively. For the strip-shaped samples (RL, RT, TL and TR) the distances amounted 70 and 40 mm, respectively. The specimens LR and LT (Fig. 1 (a)) were stressed at maximum with a Force of 4000 N and a pre-force of 100 N and the specimens RL, RT, TL and TR (Fig. 1 (b) and (c)) with a pre-force of 10 N and a maximum load of 200 N. Accordingly, the maximum tensile stress σ amounted 34.17 N/mm² (specimens LR and LT) and 1.75 N/mm² (specimens RL, RT, TL and TR), which is far lower than the yield stress of spruce wood.

MakroXtens measurement

For evaluating optical gauging techniques additional, measurements were performed by using the same set of strip-shaped specimens with a mechanical extensometer, makroXtens (Zwick/Roell, Ulm, Germany). The axial elongation (ε_l) of the specimens for a loadstep of $\Delta F = 200$ N were calculated corresponding to Eq (3) (Bodig and Jayne 1982)

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta F}{A * MOE} \quad (3)$$

where A is the cross section of the specimens and MOE represents the Modulus of elasticity (i.e. slope of the stress-strain curve).

The makroXtens device is a conventional clip-on mechanical extensometer with a measurement resolution of 0.5 μm , which meets the requirements specified in DIN EN ISO 9513 (2012) class 0.5 (Zwick/Roell 2017b).

More comprehensive information about mechanical extensometers can be found elsewhere in literature (Beasley 2001; Davis 2004; Zwick/Roell 2001; Zwick/Roell 2017b; Pan and Wang 2016).

Statistical evaluation

All statistical tests were carried out using the software package IBM SPSS Statistics 21. Initially, the Shapiro-Wilk test was applied to verify whether the measured data follows a normal distribution. Because the null hypothesis was rejected, which meant that the data did not follow a normal distribution, the Wilcoxon matched pair test was used to determine the statistical equivalence of two data sets. To perform a statistical comparison with more than two data sets, the Friedman's test was employed.

Results and Discussion

Table 1 gives an overview of the sample's moisture content (ω) and the summarized test results of the non-contact optical gauging techniques in comparison to literature references: Hörig (1931); Wommelsdorff (1966); Neuhaus (1981); Niemz and Caduff (2008); Keunecke et al.(2008). The optical gauging techniques, ESPI and a combination of laserXtens (for ε_l) and videoXtens (for ε_q) returned consistent results in terms of the Poisson's ratio: μ_{LR} , μ_{LT} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TL} , μ_{TR} , and as well as in terms of the Modulus of elasticity (MOE) for all three orthogonal directions: E_L (mean of E_{LR} and E_{LT}), E_R (mean of E_{RL} and E_{RT}), and E_T (mean of E_{TR} and E_{TL}). The results are presented in the form of the mean values (e.g. $\bar{x}[\mu_{LR}]$) and the coefficient of variation (e.g. $CoV[E_R]$) of the Poisson's ratio and the Moduli of elasticity. The quantified Moduli of elasticity are in the expected magnitude range of spruce wood. The influence of the trees growing place and also the variability of used trees have to be considered. Furthermore, the shape and size of the test specimens could have an impact on the material properties. When using small-sized samples, the annual-ring width may bias the measurement result (Niemz and Caduff 2008). However, these effects cannot explain the significant differences between the data presented.

In general, the Poisson's ratios determined in this study have a higher mean value compared to the literature references. Especially the mean value $\bar{x}[\mu_{RL}]$ is about 6,7 times higher than the lowest value found in the literature (see Table 1). Also, among the values found in literature a considerable variability is found. The differences to the literature references are open to speculation, because on the one hand, the scattering of the literature data could suggest similar median values, compared to the own measurements. On the other hand, diverse gauging techniques and apparatuses with different measurement resolutions were used by each researcher.

Nevertheless, in no other study different gauging techniques were directly compared to each other with the same sample set.

To ensure the statistical reliability of the own measurements a validation of the used gauging techniques was pursued. Related to the described approach the summarized results of the statistical evaluation are presented in Table 2 and Table 3.

The test on normality distribution (Table 2) does not show a normal distribution for all investigated data (for example $p = .013$ for μ_{RL}), which is why the Wilcoxon - Test was applied (Table 3). This test confirmed the statistical equality between the measurements gained due to ESPI compared to laserXtens (for ε_i) in combination with videoXtens (for ε_q). For example, the highest differences of means could be found for the MOE of E_R , which shows a statistical value of Z ($N = 22$) = - 1.607, $p = .108$. Compared to that does the Poisson's ratio of μ_{RL} illustrates a good accordance of the means with values of Z ($N = 11$) = - .533 and $p = .594$.

In order to guarantee the accuracy of the own measurements by means of the chosen non-contact optical gauging techniques, a statistical validation with a mechanical extensometer were done additionally. For this validation, the axial extension (ε_i) of the specimens RL and RT has been investigated with the same sample set, because the means of the Poisson's ratio $\bar{x}[\mu_{RL}]$ had the biggest discrepancies to the lowest literature reference (see Table 1). The axial extension (ε_i) of the tested specimens at a load level of $\Delta F = 200$ N are illustrated as Boxplots in Fig. 3. Even the qualitative comparison of the gauging techniques does not show any discrepancies at all (e.g. $\bar{x}[\varepsilon_i^{ESPI}] = 0.153$ %, $\bar{x}[\varepsilon_i^{laserXtens}] = 0.151$ %, $\bar{x}[\varepsilon_i^{videoXtens}] = 0.147$ % and $\bar{x}[\varepsilon_i^{makroXtens}] = 0.155$ %). To confirm that there are no significant differences, the results of Friedman's-Test and Wilcoxon-Test are presented in table 4. The non-parametric Friedman-Test for repeated measurements shows a Chi-square of $\chi^2 = 1.421$ which was not significant ($p = .701$). As expected, the Wilcoxon-Test indicates for all comparison no statistical significant differences also (all $p \geq .05$). Based on this investigation, it is certain that the transversal strain (ε_q) would show a similar accuracy among the gauging techniques, because the physical principle for the measurements are exactly the same. Unfortunately, the makroXtens system does not allow measurements normal to the direction of the applied force, which would be needed for this kind of validation.

However, as the specimens and the testing conditions were identical for the own measurements, it is possible to say that there are no statistical differences between the measurement techniques ESPI, laser extensometry and video extensometry. Moreover, the results obtained, confirm the first hypothesis of this study, i.e. that the non-contact optical gauging techniques ESPI, laser extensometry and video extensometry are suitable for the detection of the Poisson's ratio of wood.

Nonetheless, in dependence of the chosen measurement set-up, it was not possible to gain reproducible Poisson's ratio for all specimens. In Fig. 4 the failed measurements in dependence of the gauging technique and specimen type are illustrated. The ESPI measurements with the specimens LR and LT failed, because at a certain load level the specimens started to creep, while capturing the image.

This instability led to noises, which caused that the post processing process was not executable. Moreover, it was impossible to measure the transversal strain (ϵ_q) of any specimens via laser extensometry. This could be explained with the very small transversal contractions of the specimens that led to very small displacements of the speckle zones, which were not exceeding the measurement resolution of 0.11 μm (measurement resolution of laserXtens). But to confirm this hypothesis further studies are needed.

Conclusion

With regard to the results of the presented study, it can be concluded that:

- The non-contact optical gauging techniques ESPI, laser extensometry and video extensometry are suitable for the determination of the Poisson's ratio of wood, but there are limitations in dependence of the set-up, which correlates with the usable specimen type.
- The determined Poisson's ratios of spruce wood by means of ESPI and a combination of laser and video extensometry shows discrepancies to the Poisson's ratios known so far.
- Due to the need to introduce wood in CAE systems, it is necessary to investigate further wood materials with non-contact optical gauging techniques.

Acknowledgments

The results presented in this study are part of the research project "WoodC.A.R." (Project No.: 861.421). Financial support by the Austrian Research Promotion Agency (FFG), Styrian Business Promotion Agency (SFG), Standortagentur Tirol and the companies DOKA GmbH, DYNAmore GmbH, EJOT Austria GmbH, Forst-Holz-Papier, Holzcluster Steiermark GmbH, IB-Steiner, Lean Management Consulting GmbH, Magna Steyr Engineering GmbH & Co KG, MAN Truck & Bus AG, Mattro Mobility Revolutions GmbH and Weitzer Parkett GmbH & CO KG is gratefully acknowledged.

References

- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982): *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Carrington, H. (1921): "XVII. The Determination of Values of Young's Modulus and Poisson's Ratio by the Method of Flexures." *The London, Edingurh, and Philosophical Magazine and Journal of Science* 41(242): 206–210.
- Carrington, H. (1922): The elastic constants of spruce as affected by moisture content. *Aeronautical Journal* 26: 462–471.
- Eberhardsteiner, J. (2002): *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz: Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Springer.
- EN 408. (n.d.).
- Garab, J., Keunecke, D., Hering, S., Szalai, J., & Niemz, P. (2010): Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson's ratios of spruce and yew wood in the transverse plane. *Wood Science and Technology* 44(3): 451–464.
- Gingerl, M. (1998): Realisierung eines optischen Deformationsmeßsystems zur experimentellen Untersuchung des orthotropen Materialverhaltens von Holz bei biaxialer Beanspruchung. Fakultät Für Bauingenieurwesen.
- Grimsel, M. (1999): *Mechanisches Verhalten von Holz - Struktur-und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes*. Doctoral Thesis.
- Hörig, H. (1935): Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz. *Ingenieur-Archiv* 6: 8–14.
- Keunecke, D., Hering, S., & Niemz, P. (2008): Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Science and Technology* 42(8): 633–647.
- Klein, B. (2012): *FEM*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kollmann, F. F. P., & Cote, W. A. J. (1968): *Principles of Wood Science and Technology - Solid Wood*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kumpenza, C., Matz, P., Halbauer, P., Grabner, M., Feist, F., & Müller, U. (2017): Measuring Poisson's ratio: Mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques. Under Review.
- Leitgeb, Kirschbichle, & Al., E. (2006): Holz im strukturellen Fahrzeugbau. . Retrieved November 28, 2017, from http://www.woodcar.eu/wa_files/leitgeb_kirschbichler_etal_holz_im_strukturellen_fahrzeugbau_2internationales_fahrzeugkolloquium_s35-46_ihd_dresden_2016.pdf
- Müller, U. (2003): Effects of wood macro-and micro-structure on selected mechanical properties. Doctoral Thesis.
- Müller, U., Ringhofer, A., Brandner, R., & Schickhofer, G. (2015): Homogeneous shear stress field of wood in an Arcan shear test configuration measured by means of electronic speckle pattern interferometry: description of the test setup. *Wood Science and Technology* 49(6): 1123–1136.
-

-
- Müller, U., Sretenovic, A., Vincenti, A., & Gindl, W. (2005): Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 1: Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of electronic speckle pattern interferometry. *Holzforschung* 59(3): 300–306.
- Neuhaus, F. H. (1981): *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit* (Bochum. Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen). Inst. für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Univ.
- Niemz, P., & Caduff, D. (2008): Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 66(1): 1–4.
- Niemz, P., & Sonderegger, W. (2017): *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag München.
- Scheffler, M., & Callister, W. D. (2012): *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. Weinheim, Deutschland: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA.
- Schulze, G., & Vollhardt, E. (2013): *Werkstoffprüfung für Maschinen- und Eisenbau*. Springer-Verlag.
- Siebel, E. (2013): *Prüf- und Meßeinrichtungen*. Springer-Verlag.
- Sretenovic, A., Müller, U., Gindl-Altmatter, W., & Teischinger, A. (2002): New modified shear assay – experimental results and finite element analysis. *Wood Fiber Science*.
- Stamer, J. (1935): Elastizitätsuntersuchungen an Hölzern. *Ingenieur-Archiv* 6(1): 1–8.
- Teibinger, A., & Müller, U. (2016): WoodCAR. . Retrieved November 28, 2017, from http://www.woodcar.eu/wa_files/ulrich_mueller_zukunftstag_25082016.pdf
- Valla, A. (2007): Ein Methodenvergleich zwischen zwei optischen, flächenhaften, berührungslosen Messverfahren zur Bestimmung von Verschiebungen an einer Holzprobe. Master Thesis 1–104.
- Voigt, W. (1928): *Kristallphysik*. Leipzig.
- Zwick/Roell (2017a): Produktinformation LaserXtens. . Retrieved November 18, 2017, from <https://www.zwick.de/extensometer/laserxtens-hp>
- Zwick/Roell (2017b): Produktinformation VideoXtens-Breitenänderungsaufnehmer. . Retrieved November 18, 2017, from <https://www.zwick.de/extensometer/videoxtens>
-

Tables

TABLE 1. Experimentally determined material data of spruce wood in comparison to literature references: Moisture content (ω), mean values (\bar{x}) and coefficient of variation (COV) of the Poisson's ratio: μ_{LR} , μ_{LT} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TL} and μ_{TR} and also the Modulus of elasticity: E_L , E_R and E_T

		Own measurements			Literature references			
		ESPI	laserXtens (ϵ_i) in combination with videoXtens (ϵ_q)	Hörig (1935)	Wommelsdorf (1966)*	Neuhaus (1981)	Niemz and Caduff (2008)	Keunecke et al. (2008)
Moisture Content ω	[%]	12	12	9.8	13.7	12	12.1	12
\bar{x} [E_L]	[N/mm ²]	-	14635	16324	11287	11877	11496	12800
CoV [E_L]	[%]	-	18.2	-	-	-	20	9.2
\bar{x} [μ_{LR}]	[-]	-	0.706	0.43	0.447	0.409	0.376	0.36
CoV [μ_{LR}]	[%]	-	36.6	-	-	-	26	13.2
\bar{x} [μ_{LT}]	[-]	-	0.690	0.53	0.561	0.549	0.420	0.45
CoV [μ_{LT}]	[%]	-	19.7	-	-	-	18	8.2
\bar{x} [E_R]	[N/mm ²]	970	1038	699	980	817	1099	625
CoV [E_R]	[%]	16.7	17.1	-	-	-	12	20.4
\bar{x} [μ_{RL}]	[-]	0.110	0.120	0.019	0.049	0.055	0.022	0.018
CoV [μ_{RL}]	[%]	60.1	58.7	-	-	-	62	-
\bar{x} [μ_{RT}]	[-]	0.656	0.681	0.42	0.586	0.599	0.640	0.48
CoV [μ_{RT}]	[%]	8.2	12.2	-	-	-	17	19.2
\bar{x} [E_T]	[N/mm ²]	293	281	400	429	420	452	397
CoV [E_T]	[%]	27.5	23.6	-	-	-	13	10.3
\bar{x} [μ_{TL}]	[-]	0.041	0.033	0.013	0.028	0.035	0.015	0.014
CoV [μ_{TL}]	[%]	78.1	87.9	-	-	-	42	-
\bar{x} [μ_{TR}]	[-]	0.739	0.690	0.24	0.26	0.311	0.335	0.21
CoV [μ_{TR}]	[%]	7.6	18.1	-	-	-	33	16.8

*cited in Neuhaus (1981)

TABLE 2. Summarized Results of the test of Normality distribution (Shapiro-Wilk-test) applied on the Poisson's ratio: μ_{LR} , μ_{LT} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TL} and μ_{TR} and also on the Modulus of elasticity: E_L , E_R and E_T

Gauging technique	Shapiro-Wilk-test			
	Parameter	Statistic	df	Sig.
ESPI	E_L^*	-	-	-
	μ_{LR}^*	-	-	-
	μ_{LT}^*	-	-	-
	E_R	.947	24	.238
	μ_{RT}	.958	12	.760
	μ_{RL}	.811	12	.013
	E_T	.881	23	.010
	μ_{TR}	.827	13	.014
	μ_{TL}	.805	10	.017
laserXtens (for ε_l) in combination with videoXtens (for ε_q)	E_L	.938	20	.222
	μ_{LR}	.884	8	.204
	μ_{LT}	.948	12	.608
	E_R	.890	21	.023
	μ_{RT}	.969	10	.886
	μ_{RL}	.949	11	.626
	E_T	.932	20	.167
	μ_{TR}	.950	11	.647
	μ_{TL}	.895	9	.227

* Measurement failed

TABLE 3. Summarized Results of the test on statistical equivalence (Wilcoxon-Test) of the data gained by means of ESPI compared to laserXtens (for ε_i) in combination with videoXtens (for ε_q)

Parameter	Wilcoxon-Test*			
	Mean Rank	Sum of Ranks	Z	Asymp. Sig. (2-tailed)
E_L^{**}	-	-	-	-
μ_{LR}^{**}	-	-	-	-
μ_{LT}^{**}	-	-	-	-
E_R	12.83	77.00	-1.607	.108
	11.00	176.00		
μ_{RT}	4.40	22.00	-.561	.575
	6.60	33.00		
μ_{RL}	6.75	27.00	-.533	.594
	5.57	39.00		
E_T	10.09	111.00	-.224	.823
	11.00	99.00		
μ_{TR}	6.00	42.00	-.800	.424
	6.00	24.00		
μ_{TL}	5.25	21.00	-.178	.859
	4.80	24.00		

* ESPI compared to laserXtens (for ε_i) in combination with videoXtens (for ε_q)

** ESPI measurement failed

TABLE 4. Summarized Results of the test on statistical equivalence (Friedman-Test and Wilcoxon-Test) for the axial strain (ϵ_L) measurement by means of ESPI vs. laserXtens vs. videoXtens vs. makroXtens

Friedman-Test				
Mean Rank	N	Chi-square	df	Asymp.Sig.
2.68 (ESPI)	19	1.421	3	.701
2.53 (laserXtens)				
2.21 (videoXtens)				
2.58 (makroXtens)				
Wilcoxon-Test				
Gauging technique	Mean Rank	Sum of Ranks	Z	Asymp.Sig.(2-tailed)
laserXtens - ESPI	8.50	102.00	-.282	.778
	12.57	88.00		
videoXtens - ESPI	10.8	108.00	-.523	.601
	9.11	82		
makroXtens - ESPI	10.58	127.00	-.400	.689
	11.56	104.00		
videoXtens - laserXtens	8.85	115.00	-.805	.421
	12.5	75.00		
makroXtens - laserXtens	10.22	92.00	-.121	.904
	9.80	98.00		
makroXtens - videoXtens	8.75	70.00	-1.006	.314
	10.91	120.00		

Figures and legends

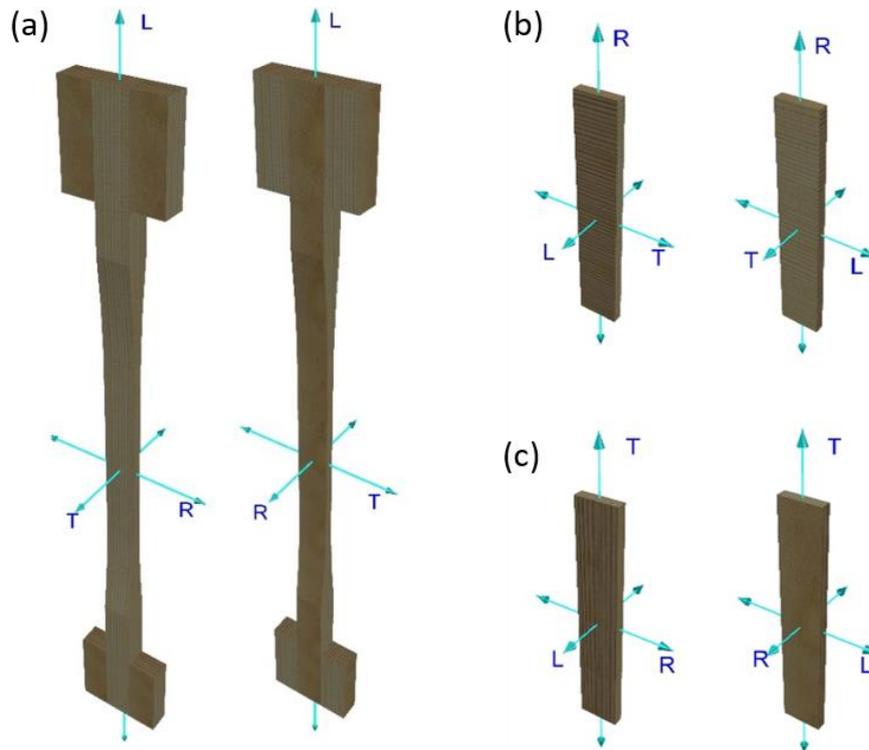


FIG. 1. 3D illustrations of the specimens; (a) dimensions corresponding to DIN EN 52188 (1979); (b) and (c) $20 \times 6 \times 120 \text{ mm}^3$ (width x height x length)

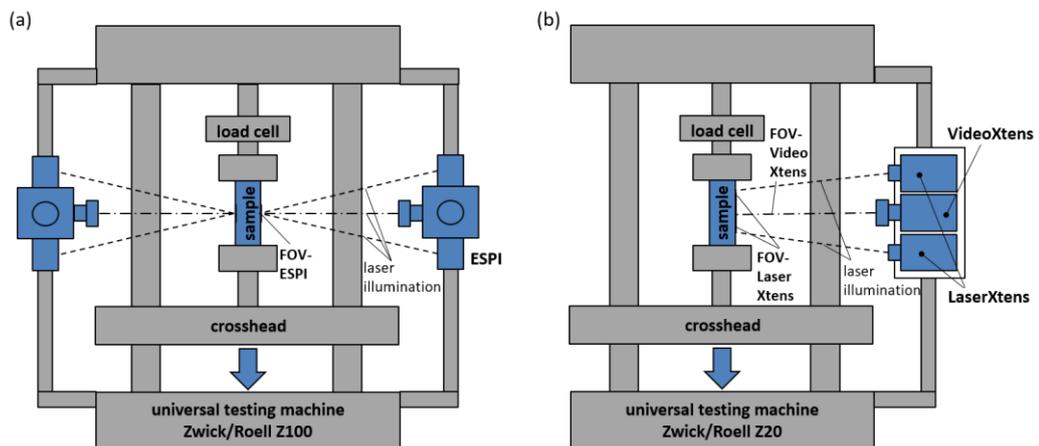


FIG. 2. Scheme of the uniaxial tensile experiments; (a) Set-up with two ESPI devices; (b) Set-up with the laserXtens and videoXtens system

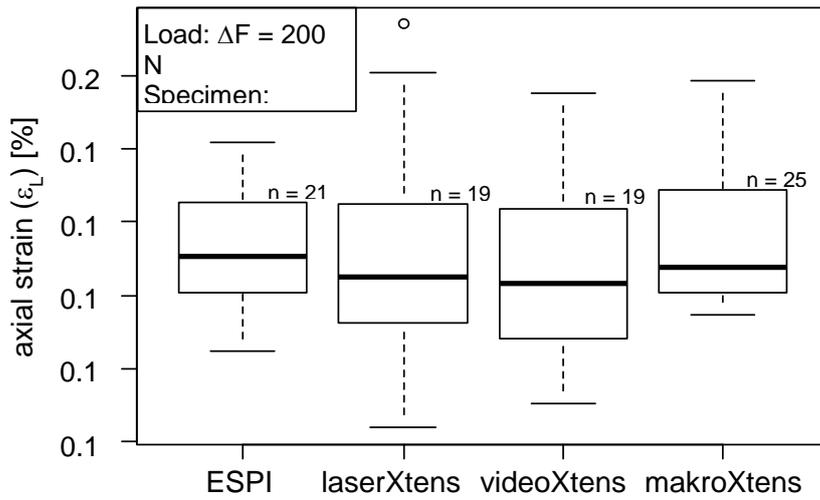
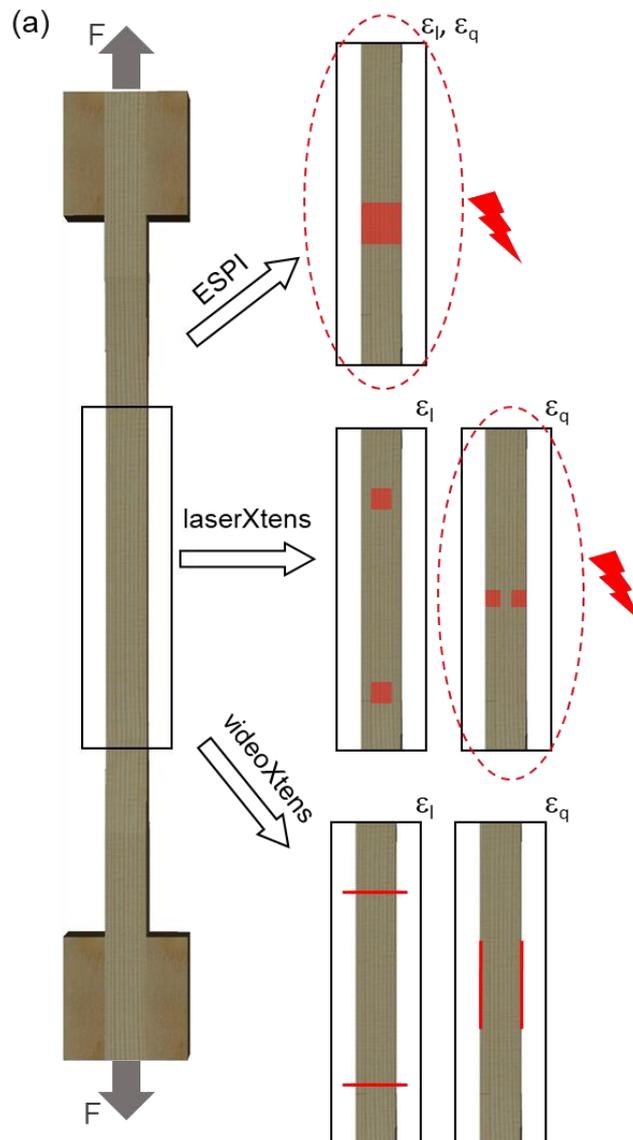


FIG. 3. Axial strain (ϵ_l) in dependence of the gauging techniques ESPI, laserXtens, videoXtens and makroXtens for the specimens RL and RT



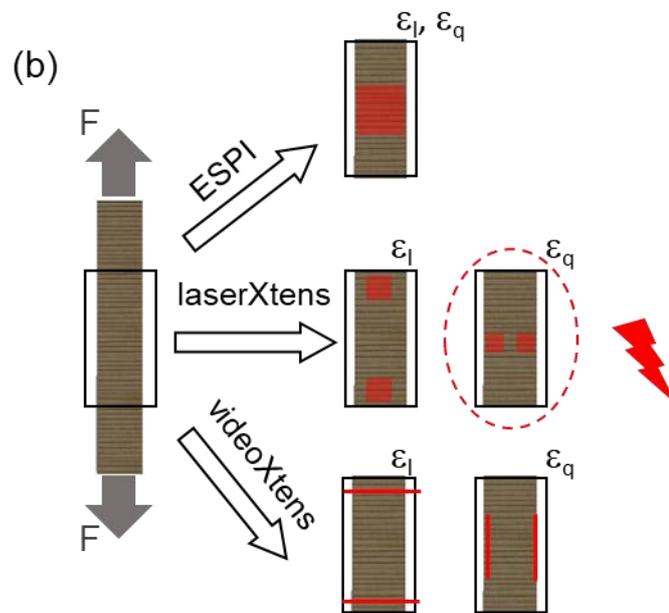


Fig. 4. Illustration of the failed measurements in dependence of the chosen gauging technique and the specimen type ((a) LR and LT; (b) RL, RT, TL and TR).