



**Universität für Bodenkultur Wien**  
University of Natural Resources  
and Life Sciences, Vienna

# **Masterarbeit**

## **Charakterisierung von physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Blauglockenbaums (*Paulownia* spp.)**

verfasst von

**David Moog, BSc**

Im Rahmen des Masterstudiums  
Stoffliche und energetische Nutzung  
nachwachsender Rohstoffe

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Wien, 12.2021

Betreut von:

Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller

Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

## **Abstract**

In the present study, wood of the tree species *Paulownia* (spp.) gained from eight-year-old plantation trees was tested for the characterization of its mechanical and elasto-mechanical properties. In the study, the wood material was tested for density, strength, impact energy, elasticity and Poisson's ratio in accordance with the relevant DIN standards. For an exact characterisation, the tests were carried out taking into account the orthotropic behaviour of wood. Thus, the tests were performed by considering the six directions LR and LT, TL and TR as well as RL and RT.

The values obtained were compared with other hardwood species and with Balsa wood, which had a similarly low density. As expected, the *Paulownia* values were significantly lower than the other wood species, but showed good agreement with Balsa.

**Keywords:** Bending strength, Compressive strength, Density, Impact bending strength, *Paulownia* (spp.), Poisson's ratio, Shear modulus, Shear strength, Tensile strength, Young's modulus

## **Zusammenfassung**

In der vorliegenden Studie wurde Holz der Baumart *Paulownia* (spp.), gewonnen aus achtjährigen Plantagenbäumen, zur Charakterisierung seiner mechanischen und elastomechanischen Eigenschaften untersucht. Im Rahmen der Studie wurde das Holzmaterial auf Dichte, Festigkeit, Kerbschlagarbeit, Elastizität und Poissonzahl gemäß den entsprechenden DIN-Normen geprüft. Für eine genaue Charakterisierung wurden die Prüfungen unter Berücksichtigung des orthotropen Verhaltens von Holz durchgeführt. So wurden die Prüfungen unter Berücksichtigung der sechs Richtungen LR und LT, TL und TR sowie RL und RT durchgeführt.

Die erhobenen Werte wurden mit anderen Laubholzarten sowie mit Balsaholz verglichen, welches eine ähnlich geringe Dichte aufweist. Erwartungsgemäß lagen die Werte von *Paulownia* deutlich unter denen der anderen Holzarten, zeigen aber eine gute Übereinstimmung mit Balsaholz.

**Keywords:** Biegefestigkeit, Bruchschlagarbeit, Dichte, Druckfestigkeit, E-Modul, *Paulownia* (spp.), Poissonzahlen, Scherfestigkeit, Schubmodul, Zugfestigkeit

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	<i>Paulownia</i> .....	2
1.2	Grundlagen der Holzchemie .....	2
1.3	Mechanisches Verhalten von Vollholz .....	5
1.3.1	Dichte .....	5
1.3.2	Festigkeit .....	6
1.3.3	Elastisches Verhalten .....	8
1.4	Messungen .....	12
1.5	Mittelwertkurven Berechnung .....	13
1.6	Forschungsziel.....	15
2	Vorhandene Forschungen zur <i>Paulownia</i> .....	16
2.1	Mechanische Eigenschaften <i>Paulownia</i> .....	16
2.2	Sekundäre Nutzungsmöglichkeiten.....	17
3	Material und Methoden .....	19
3.1	Verwendetes Material .....	19
3.2	Herstellung der Prüfkörper.....	21
3.2.1	Zugprüfung längs und quer zur Faser.....	21
3.2.2	Biegeprüfung .....	22
3.2.3	Schlagbiegeprüfung.....	22
3.2.4	Druckprüfung längs und quer zur Faser .....	23
3.2.5	Arcanprüfung .....	23
3.2.6	Dichte Messung .....	24
3.3	Messaufbau der verwendeten Prüfmaschinen.....	24
3.3.1	Software-Einstellungen.....	25
3.3.2	Prüfmaschinen Aufbau .....	26
3.4	Auswertung der Ergebnisse.....	28
3.4.1	Festigkeit .....	28
3.4.2	Elastisches Verhalten .....	28
3.4.3	Bruchschlagarbeit.....	29
3.4.4	Dichte .....	29

3.4.5	Statistische Auswertung .....	30
3.4.6	Mittelwertkurve.....	30
4	Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen .....	31
4.1	Test auf Normalverteilung.....	31
4.2	Dichte.....	33
4.3	Festigkeit .....	34
4.3.1	Zugfestigkeit .....	34
4.3.2	Druckfestigkeit .....	37
4.3.3	Biegefestigkeit .....	39
4.3.4	Scherfestigkeit .....	41
4.3.5	Bruchschlagarbeit.....	44
4.4	E-Modul .....	45
4.4.1	Zug E-Modul .....	45
4.4.2	Druck E-Modul.....	47
4.4.3	Biege E-Modul .....	49
4.5	Schubmodul.....	50
4.6	Poissonzahlen .....	52
5	Diskussion.....	53
5.1	Plausibilitätsprüfung der erhobenen Daten .....	53
5.2	Einordnung der gemessenen Festigkeitswerte mit Literatur Angaben	55
5.3	Einordnung der gemessenen Elastizitätswerte mit Literatur Angaben	56
5.4	Vergleich zwischen Balsa und <i>Paulownia</i> .....	58
6	Schlussfolgerung .....	60
7	Danksagung.....	61
8	Eidesstattliche Erklärung.....	62
9	Literaturverzeichnis.....	63
10	Tabellenverzeichnis .....	66
11	Abbildungsverzeichnis .....	67
12	Anhang.....	69

# 1 Einleitung

Mit der voranschreitenden Digitalisierung werden durch Informations- und Kommunikationstechniken industrielle Wertschöpfungsprozesse verbessert. Die 4. Industrielle Revolution, auch Industrie 4.0 genannt, ermöglicht, die Produktion effizienter zu gestalten. Dies geschieht sowohl durch eine Erhöhung der Produktivität, als auch durch effizientere Nutzung von Ressourcen und Maschinen. Grundlage hierfür sind Schlüsseltechnologien, wie unter anderem Data Mining, Digitaler Zwilling und Augmented Reality (Pistorius 2020).

Einhergehend mit der Digitalisierung und steigenden Leistung von Computern können immer komplexere Modelle zur Herstellung von Bauteilen berechnet werden. Dies hat einerseits den Vorteil, dass Simulationen bereits am Computer erstellt werden können, sodass sie nicht erst zur Prüfung physisch hergestellt werden müssen, andererseits können Bauformen geschaffen werden, die vorher nicht möglich waren (Müller und Groth 2007).

Ein weitverbreitetes Verfahren für solche Simulationen ist die numerische *Finite Elemente Methode (FEM)*. Hierbei werden mit entsprechenden Computer-Programmen sogenannte Materialmodelle erstellt, die mit Materialkarten bestückt werden. Dabei simulieren die Materialmodelle das Materialverhalten. Die Materialkarten dienen zur Beschreibung der Materialkenngrößen wie Festigkeiten und Steifigkeiten sowie Kenndaten zur Beschreibung der plastischen Deformation.

Zur Erstellung dieser Karten ist es notwendig, die mechanischen Eigenschaften des zu verarbeitenden Materials genauestens zu kennen (Grosse et al., S. 355). Ein Beispiel, wo die Finite Elemente Methode eingesetzt wird, ist die Automobilindustrie, in welcher fast alle Bauteile mit FEM berechnet werden (Müller und Groth 2007). Anders als bei Metallen sind bei Holz kaum die hierfür notwendigen mechanischen Eigenschaften bekannt. Um auch für Holz FEM basierte Modellierungen erstellen zu können, wurde in dieser Arbeit der Blauglockenbaum (*Paulownia* spp.) auf seine mechanischen und elastomechanischen Eigenschaften untersucht. Im Folgenden werden die Baumart vorgestellt, sowie die Grundlagen der Materialkennwerterhebung erläutert.

## 1.1 *Paulownia*

Von dem Blauglockenbaum (*Paulownia* spp.) sind derzeit sieben Spezies sowie zwei Kreuzungen offiziell anerkannt (NCBI 2020). Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wuchsform, ökologischer Amplitude (Temperatur und Wasserbedarf) und Aussehen. Eine umfangreiche Analyse der *Paulownia* wurde von Zhu Zhao-Hua et al. (1986) durchgeführt. Unter anderem geht aus der Studie hervor, dass die *Paulownia* bereits seit Jahrtausenden in China kultiviert und genutzt wird. Der Baum findet unter anderem Verwendung im Möbelbau, zur Herstellung traditioneller Musikinstrumente, aber auch in Agroforst Systemen, um beispielsweise den Ertrag von Feldfrüchten zu steigern. Charakteristisch für die *Paulownia* ist ihre Schnellwüchsigkeit. Zudem weist diese Baumart eine sehr geringe Dichte auf, welche bei einem Feuchtegehalt von 0% ( $\rho_0$  = Darrdichte) im Mittel bei 250 kg/m<sup>3</sup> liegt.

Die ersten *Paulownia*-Bäume wurden Mitte des 19. Jahrhunderts nach Europa gebracht (Nimmervoll 2018). Zwar wurde der Baum vorerst hauptsächlich in städtischen Parks gepflanzt, doch wurde bereits im Jahr 2009 in Deutschland eine Firma, die wegrow GmbH, gegründet, um den Baum auch in Wertholz-Plantagen anzubauen. Im Jahr 2012 begann die österreichische Firma Plantownia GesbR die ersten Anbauversuche in Plantagen zur Nutzholzgewinnung.

Die stetig wachsende Nachfrage an Baumaterialien stellt auch die Holzindustrie vor die Herausforderung, den Bedarf mit nachhaltigen Aufforstungen zu decken. So stieg die weltweite Holzproduktion von 2000 bis 2019 um 14% auf 3.966 Millionen m<sup>3</sup> (FAO 2020). Hier könnte eine schnellwachsende Baumart, welche ein qualitativ hochwertiges Holz bietet und in Plantagen angebaut werden kann, für eine Entlastung der Wälder sorgen.

## 1.2 Grundlagen der Holzchemie

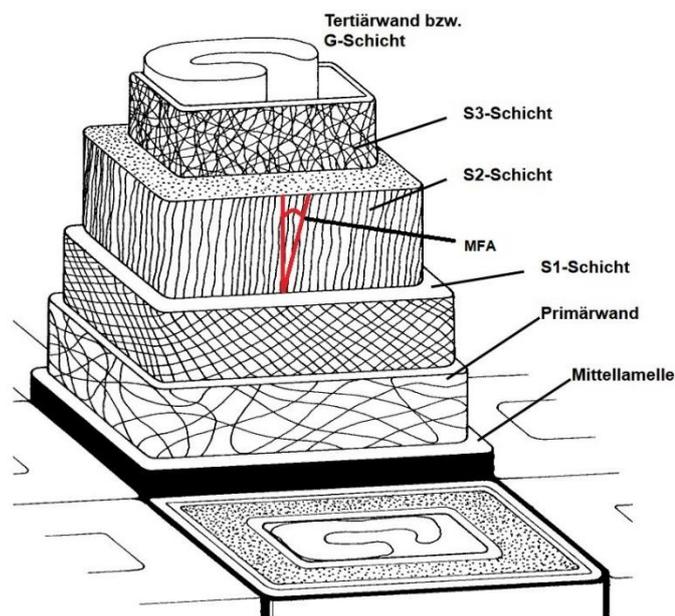
Holz kann als natürlicher Verbundwerkstoff betrachtet werden. Es besteht zu ca. 40% aus den Zellwandbestandteilen Lignin und Hemizellulose, in dem die hochfeste und sehr steife Cellulose eingebettet ist. Die Cellulose verleiht der Zellwand ihre hohe mechanische Leistungsfähigkeit. Hemizellulosen fungieren als Bindeglied, und Lignin dient als eher hydrophobe Kittsubstanz der Abdichtung der Zelle für den Wassertransport. Zusätzlich sind in den Zellen primär für die Erhöhung der natürlichen Dauerhaftigkeit ca. 5% verschiedenste Extraktstoffe eingelagert.

Cellulose kommt in allen pflanzlichen Zellwänden vor und verleiht, wie erwähnt, dem Holz seine hohen Festigkeitseigenschaften. Sie ist ein Polysaccharid, bestehend aus linearen Anhydro- $\beta$ -D-Glucose-Einheiten (AHD). Durch den hohen

Polymerisationsgrad (DP), bei Holz von bis zu 7.000, bildet die Cellulose lange Ketten. Dabei bildet die Cellulose kristalline und parakristalline Bereiche aus.

Im Gegensatz zu Cellulose hat Hemicellulose einen geringen DP Wert, <1.000 und ist amorph. Außerdem ist die Hemicellulose hydrophil und somit für das Quellen und Schwinden von Holz mitverantwortlich. Auch die Viskoelastizität ist der Hemicellulose zuzuschreiben. Die Hemicellulose umschließt die Cellulose-Ketten und wirkt mit seiner amorphen und hydrophilen Struktur wie ein Kleber. Zusammen mit der Cellulose bildet die Hemicellulose Mikrofibrillen aus, welche noch vom Lignin (lat. lignum ‚Holz‘) umgeben werden. So entsteht zusätzlich zu der Zugfestigkeit eine hohe Druckfestigkeit. Zudem ist das Lignin durch die eher hydrophoben Eigenschaften auch für die Dichtigkeit der Zellwände verantwortlich und ermöglicht so den Wassertransport von den Wurzeln bis in die Krone. Auch die viskoelastischen Eigenschaften sind zum Teil dem Lignin zuzuführen. Lignin ist über kovalente Bindungen mit der Hemicellulose sehr stark verbunden. Der Aufbau von Lignin ist sehr komplex und nicht restlos geklärt.

In den verschiedenen Zellwandschichten sind die Mikrofibrillen in unterschiedliche Richtungen orientiert und verleihen der verholzten Zelle die spezifischen mechanischen Eigenschaften (Wagenführ und Scholz 2018).

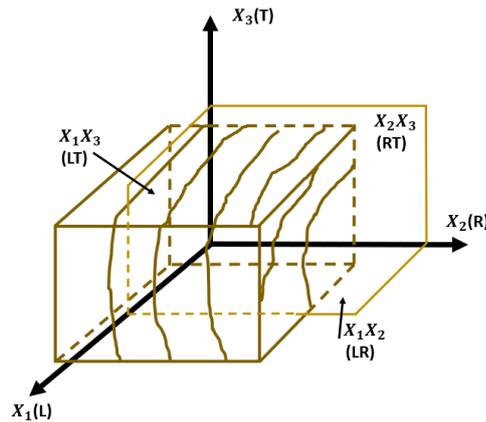


**Abbildung 1: Pflanzen Zellwandaufbau mit Mittellamelle, Primärwand, Sekundärwand (S1-S3), Tertiärwand und Mikrofibrillenwinkel (MFA) (Niemz et al. 2006)**

Die Zellen sind durch die Mittellamelle (ML) getrennt. Daran anschließend findet sich die Primärwand (P) und die Sekundärwand (SW), die sich wiederum in drei Unterschichten S1, S2 und S3 gliedert (Abbildung 1). Den größten Teil der Zellwand macht die Sekundärwand 2 (S2) von ca. 80% aus. Darum kommt der S2-Schicht eine besondere Bedeutung zu, denn die Ausrichtung der Mikrofibrillen hat neben der Zellwanddicke, einen zentralen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Holzes. Die Orientierung der Mikrofibrillen in der S2 wird als sogenannter Mikrofibrillenwinkel (engl. Micro fibril angle oder MFA) bezeichnet (Rösler et al. 2012).

Eine weitere besondere Eigenschaft von Holz ist, dass es in Zugrichtung ein sprödes Bruchverhalten aufweist, hingegen in Druckrichtung ein sehr duktileres Verhalten aufweist. Das spröde Verhalten auf Zugbelastung ist in den kristallinen Bereichen von den Mikrofibrillen begründet. Bei Druckbelastung wiederum kommt es in Faserrichtung zu einem Ausknicken (in Englisch Kink banding) der Mikrofibrillen in der Ligninmatrix. Bei der Druckbelastung kommt es in Faserrichtung zu einem eindeutigen Bruch, senkrecht zur Faser wird das Holz jedoch stark verdichtet, ohne dass es zu einem Bruch kommt. Dies liegt daran, dass bei steigender Druckbelastung die Mikrofibrillen beginnen, auszuknicken. Quer zur Faser bricht das Holz auf Zug ebenfalls eher spröde, was auf eine spontane Trennung des Materials zwischen den Zellwandschichten zurückzuführen ist. Auf Druck quer zur Faser zeigt das Holz ein ausgeprägt duktileres Bruchverhalten. Die Holzzellen werden dabei zusammengedrückt und kollabieren, da die primär längsorientierten Mikrofibrillen in der S2-Schicht den Beanspruchungen nicht standhalten können. Bei vollständiger Komprimierung wäre es theoretisch möglich, Holz bis zu maximal  $1500 \text{ kg/m}^3$  zu verdichten (Niemz und Sonderegger 2017).

Gegeben durch das Wachstum des Baumes, ist Holz ein orthotropes und anisotropisches Material. Somit weist Holz je nach Richtung unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf. Es wird zwischen den Richtungen Längs (L), Radial (R) und Tangential (T) unterschieden, dargestellt in Abbildung 2. Für eine vollständige Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes muss dieses Verhalten berücksichtigt werden.



**Abbildung 2: Die drei Haupttrichtungen Längs (L), Radial (R) und Tangential (T) mit ihren jeweiligen Bezugsflächen (Niemz und Sonderegger 2017, S. 270)**

Im folgenden Kapitel wird auf das Festigkeitsverhalten von Holz unter Berücksichtigung der Anisotropie eingegangen.

### 1.3 Mechanisches Verhalten von Vollholz

Wie eingangs erwähnt, müssen für FEM basierte Materialkarten die Festigkeitswerte sowie die elastischen Eigenschaften unter Berücksichtigung des orthotropen Verhaltens von Holz bekannt sein.

#### 1.3.1 Dichte

Die Dichte steht in enger Beziehung mit den Festigkeitseigenschaften. In Abbildung 3 werden die Biegefestigkeiten von 103 Baumarten ihren Rohdichte Werten gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Dichte auch die Festigkeitswerte steigen.

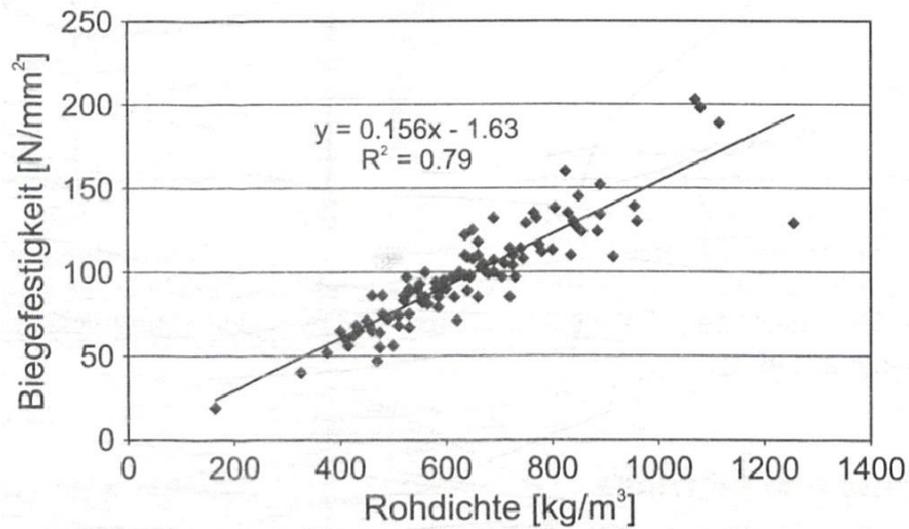
Die allgemeine Formel für die Dichte lautet:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Die Dichte errechnet sich nach folgender Formel (1), wobei  $\rho$  der Dichte in  $\text{kg/m}^3$ ,  $m$  der Masse in kg und  $V$  dem Volumen in  $\text{m}^3$  entspricht.

Es wird weiterhin zwischen Rohdichte, Darrdichte, Reindichte und Raumdichte unterschieden. Da die Dichte sowie mechanischen Eigenschaften auch vom Feuchtegehalt des Holzes abhängen, muss die Holzfeuchte, bei welcher Holz geprüft wird, stets angegeben werden. Üblicherweise wird jedoch unter Normal Klima geprüft. Dies bedeutet, dass das Holz vor der Prüfung bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von 65% gelagert wurde. Hierbei stellt sich, unabhängig von der Holzart, eine Holzfeuchte von etwa  $\omega = 12\%$  ein. Dies

ist von Bedeutung, da die mechanischen Eigenschaften von der Holzfeuchte beeinflusst werden und so die Messergebnisse mit anderen Studien verglichen werden können (Niemz und Sonderegger 2017, S. 138 ff.).



**Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte von 103 Baumarten (Niemz und Sonderegger 2017, S. 342)**

### 1.3.2 Festigkeit

Niemz und Sonderegger (2018) definieren die Festigkeit wie folgt: „Die Festigkeit ist jene Spannung, die errechnet wird aus der maximalen Kraft beim Versagen oder einer definierten Dehnung (bei Druck senkrecht zur Faser)“. In dieser Arbeit wurden die Zug-, Druck-, Biege- und Scherfestigkeiten sowie die Bruchschlagzähigkeit der *Paulownia* geprüft. Die Formeln zur Berechnung dieser Festigkeiten sind nachstehend aufgeführt:

$$\sigma_{zB} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$\sigma_{zB}$  = Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>],  $F$  = Bruchkraft [N],  $A$  = Bruchfläche (Querschnittsfläche) [mm<sup>2</sup>]

$$\sigma_{dB} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$\sigma_{dB}$  = Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>],  $F$  = Bruchkraft (bzw. Kraft im Bereich der Quetschgrenze bei Belastung senkrecht zur Faserrichtung) [N],  $A$  = Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

$$\sigma_{dB} = \frac{M_b}{W_b} \quad (4)$$

$\sigma_{dB}$  = Biegefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>],  $M_b$  = Biegemoment [N mm],  $W_b$  = Widerstandsmoment [mm<sup>3</sup>]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (5)$$

$\tau$  = Scherfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>],  $F$  = Bruchkraft [N],  $A$  = Scherfläche [mm<sup>2</sup>]

Zusätzlich zu den bereits erwähnten chemischen Einflussfaktoren auf die Festigkeit gehören der strukturelle Aufbau, Umweltbedingungen, Vorgeschichte (Vorbeanspruchungen, Schädigungen durch Pilz oder Insekten), Jahrringbreite, sowie das Prüfverfahren an sich (Wagenführ und Scholz 2018, S. 76). Zudem wird aus Tabelle 1 ersichtlich, dass die Festigkeits-Eigenschaften, hier Zug und Druck, stark in den Belastungsrichtungen längs, radial und tangential variieren.

**Tabelle 1: Zug- und Druckfestigkeit verschiedener Holzarten unter Berücksichtigung der Richtungen L, R, T nach (Niemz und Sonderegger 2017, S. 376)**

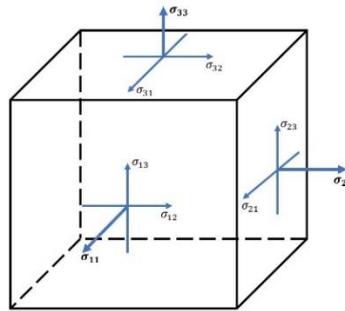
Holzart	Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Belastungsrichtung			Verhältnis
		Längs (L)	Radial (R)	Tangential (T)	
Fichte	Zug	87,20	3,96	3,07	1:1,3:28,4
	Druck	40,20	4,11	4,19	1:0,98:9,6
Rotbuche	Zug	96,7	14,7	8,9	1:1,7:10,9
	Druck	45	11	6	1:1,8:7,5
Eiche	Zug	73	6	7,8	1:0,8:9,4
	Druck	47,9	10,6	9	1: 1,2:5,3
Ahorn	Zug	112	16,2	8,9	1: 1,8:12,6
	Druck	61,5	15,4	10,3	1:1,5:6,0
Esche	Zug	130	12,45	10,1	1:1,2:12,9
	Druck	43,4	10,5	10,03	1:0,95:4,3

### 1.3.3 Elastisches Verhalten

Die Elastizität ist die Fähigkeit eines Materials, von außen einwirkende Kräfte durch Verformung aufzunehmen und bei Entlastung wieder abzugeben. Das elastische Verhalten orthotroper Werkstoffe lässt sich durch 12 Parameter beschreiben:

- Drei E-Moduli
- Drei Schubmoduli
- Sechs Poissonzahlen

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, führen Spannungen mit gleichen Indizes zu Normalspannungen und Spannungen mit ungleichen Indizes zu Schubspannungen. Dabei gibt der erste Index die Richtung der Kraft und der zweite Index die Richtung der Querdehnung an. Hierbei sei noch erwähnt, dass die Zahlen für die jeweilige anatomische Holzrichtung stehen, es gilt Längs (L) = 1, Radial (R) = 2 und Tangential (T) = 3.



**Abbildung 4: Normal- und Schubspannungen**  
(nach Niemz und Sonderegger 2017, S. 271)

Für Holz als orthotroper Werkstoff lässt sich die Voigt'sche Notation unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeitsmatrix wie folgt darstellen (Formel (6)):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

Werden nun die Dehnungs-, Gleit- und Querdehnungszahlen durch die im Ingenieur Bereich üblich verwendeten Konstanten E, G und  $\mu$  ersetzt und die Indexes 1, 2 und 3 mit den Richtungen L, R und T getauscht, lässt sich der Verzerrungs-Spannungs-Zustand von Holz wie in Formel (7) zusammenfassen (Niemz und Sonderegger 2017, 272 ff):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\mu_{RL}}{E_R} & -\frac{\mu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\mu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{LR}}{E_L} & -\frac{\mu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (7)$$

## E-Modul

Das Elastizität Modul, kurz E-Modul (E), ergibt sich aus der Steigung der Hooke'schen Geraden aus dem Spannung-Dehnung Diagramm (Abbildung 5). Der E-Modul kann mit Formel (8) berechnet werden, oder er wird mithilfe einer Wegmesseinrichtung im Versuch bestimmt. Hierbei wird die Dehnung unterhalb der Proportionalitätsgrenze gemessen. Üblich ist hier der Bereich zwischen 10% und 40% von  $F_{max}$ .

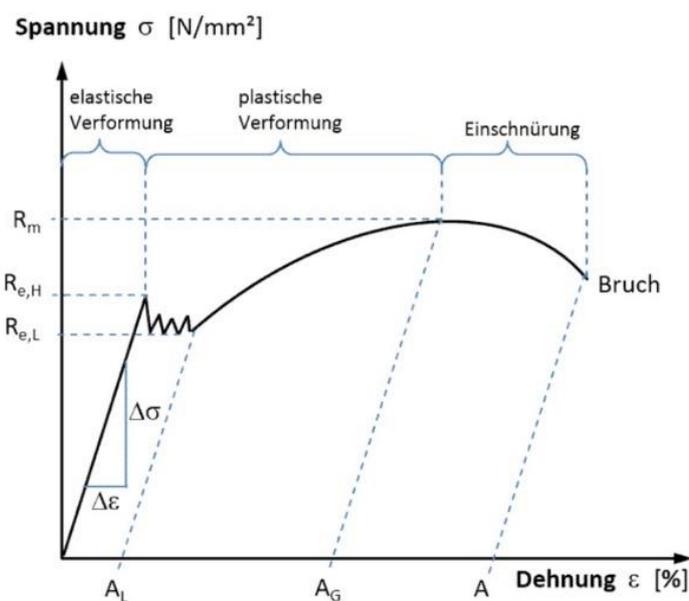


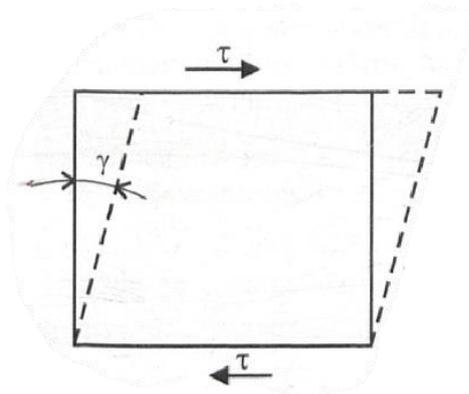
Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Saenger 2016)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (8)$$

$E$  = Elastizitätsmodul,  $\sigma$  = Spannung,  $\varepsilon$  = Dehnung

### Schubmodul

Schubspannungen ( $\tau$ ) entstehen, wenn zwei parallele Kräfte gegeneinander gerichtet auf einen Körper wirken. Bei dem dabei entstehenden Winkel ( $\gamma$ ), Abbildung 6, handelt es sich um den Schubwinkel.



**Abbildung 6: Auf einen Körper wirkende Schubspannungen**  
(Niemz und Sonderegger 2017, S. 285)

Für die Berechnung des Schubmoduls ( $G$ ) wird Formel (9) verwendet.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (9)$$

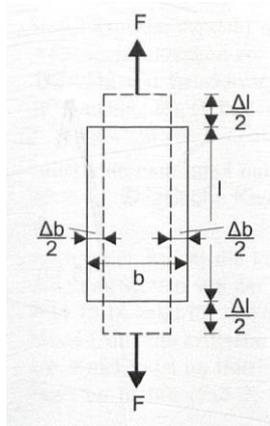
$G$  = Schubmodul,  $\tau$  = Schubspannungen [N/mm<sup>2</sup>],  $\gamma$  = Schubwinkel [Grad]

Der Schubmodul wird weiterhin unterteilt in Längsschub (LR, LT), Rollschub (RT, TR) und Abscheren (RL, TL).

### Poissonzahlen

Das Formelzeichen für die Poissonzahl ist  $\mu$ . Weitere Bezeichnungen für die Poissonzahl sind auch Querkontraktionszahl, Poissonsche Zahl oder Poissonsche Konstante. Sie beschreibt das Verhalten eines Körpers, der bei Zugbelastung länger und schmaler und bei Druckbelastung kürzer und breiter wird, wie in Abbildung 7 ersichtlich. Um die sechs Poissonzahlen zu ermitteln, müssen mindestens drei von ihnen gemessen werden, die anderen drei lassen sich annähernd berechnen, allerdings kommt es bei Holz durch die asymmetrische Jahrringlänge oftmals zu anderen Ergebnissen, als würden diese auch gemessen und

nicht nur berechnet werden (Niemz und Sonderegger 2017, 287 f.). In der vorliegenden Arbeit wurden aus diesem Grund alle sechs Poissonzahlen mit dem Prüfverfahren ermittelt.



**Abbildung 7: Querkontraktion eines auf Zug belasteten Körpers (Niemz und Sonderegger 2017, S. 287)**

Die Formeln zur Berechnung der Poissonzahl, Formeln (10) und (11), lauten:

$$\frac{\Delta b}{b} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (10)$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{quer}}{\varepsilon_{längs}} \quad (11)$$

$\mu$  = Poissonzahl,  $b$  = Probenbreite,  $\Delta b$  = Breitenänderung,  $l$  = Probenlänge,  $\Delta l$  = Längenänderung,  $\varepsilon_{quer}$  = Kontraktion (Querdehnung),  $\varepsilon_{längs}$  = Kontraktion (Längsdehnung)

In weiteren Studien konnte jedoch auch beobachtet werden, dass bei Holz unter bestimmter Jahrringneigung die auf Zug belasteten Prüfkörper positive Poissonzahlen aufwiesen. Dies deutet daraufhin, dass die Proben breiter geworden sind (Wagenführ und Scholz 2018, S. 101).

## **1.4 Messungen**

Um die Längenänderung der Probe während der Prüfung zu messen, gibt es unterschiedliche Messarten. Dazu zählen Messung über den Traversenweg, Makromechanische-, Video- und Laser-Extensometer, sowie Elektronische Laser Speckle Pattern Interferometrie (ESPI) und Digitale Bildkorrelation. Die beiden erst genannten Methoden gehören den berührenden Messverfahren an, die anderen zählen zu den optischen Messverfahren. In der vorliegenden Arbeit wurden das Laser Extensometer und Video Extensometer verwendet. Diese Verfahren werden im Nachstehenden genauer beschrieben.

### **Laser Extensometer**

Das verwendete laserXtens Verfahren von Zwick/Roell beruht auf dem Prinzip eines Laser Extensometers. Hierbei wird ein Speckle Muster auf dem Probenstück erzeugt. Dieses Muster entsteht durch die Reflektion von kohärenten, monochromatischen Laserlicht, welches von der rauen Oberfläche eines Probenstücks reflektiert wird. Kommt es zu einer Veränderung dieses Musters, wird dies durch einen mustervergleichenden Algorithmus ausgewertet. Somit können Rückschlüsse auf das Dehnungsverhalten des Probenstückes gezogen werden (Zagar et al. 2000).

### **Video Extensometer**

Bei dem videoXtents von Zwick/Roell werden zwei Messmarkierungen an der Probe angebracht. Die integrierte hochauflösende Kamera überträgt das Bild auf den Computer, wo die Messmarkierungen automatisch von der zugehörigen Software testXpert III erkannt und der Abstand zwischen ihnen vermessen wird. Kommt es zu einer Verschiebung der Messpunkte, wird dies ebenfalls registriert (Gälle 2021).

Mit einer Kraftmessdose wird die Kraft gemessen, welche aufgebracht werden muss, um die Probe zu stauchen oder zu strecken. Aus der gemessenen Kraft und dem Weg lässt sich ein Kraft-Weg-Diagramm erstellen, welches zu einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgerechnet werden kann.

## 1.5 Mittelwertkurven Berechnung

Die Materialsimulation mittels FEM erfordert ein Materialmodell und die Bedatung dieses Modells. Das Materialmodell beschreibt das Materialverhalten, die dazugehörigen Daten beschreiben die Kennwerte (z.B. Proportionalitätsgrenze, E-Modul, Bruchfestigkeit, etc.) eines Materials. Aufgrund des sehr ähnlichen Materialverhaltens von Holz unterschiedlicher Baumarten können für die numerische Simulation von unterschiedlichen Holzarten einheitliche Materialmodelle verwendet werden. Je nach Anforderung an die Simulation, Beanspruchungsrichtung und Leistungsfähigkeit des Materialmodells kann es notwendig sein, für unterschiedliche Belastungsrichtungen unterschiedliche Materialmodelle zu verwenden. Unabhängig von diesen Materialmodellen müssen für jede numerische Simulation von Holzarten eine hohe Anzahl von Kenndaten erhoben werden, die die mechanischen Eigenschaften dieser Holzart repräsentieren.

Nun weist Holz, als natürliches Material, eine gewisse Variabilität hinsichtlich seiner mechanischen Kennwerte auf. Es ist daher notwendig, einerseits einen repräsentativen Mittelwert aller Kennwerte einer Holzart zu finden, andererseits jedoch auch die Streuung der Kennwerte zu erheben. Die Streuung der Materialkennwerte wird in der Materialsimulation bzw. in der nachfolgenden Bemessung von Bauteilen durch ein sogenanntes Sicherheitskonzept berücksichtigt. Dabei werden die Kenndaten durch Abschlagsfaktoren belastet und die dabei ermittelten zulässigen Spannungen reduziert. Auf die Hintergründe der Materialsimulation soll aber in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden.

Für die Erhebung der einzelnen Kennwerte und damit zur exakten Beschreibung des Materialverhaltens einer Holzart empfiehlt es sich, die ermittelten Prüfkurven zu einer sogenannten Mittelkurve zusammenzufassen. Eine solche Mittelwertkurve ist beispielhaft in Abbildung 8 dargestellt.

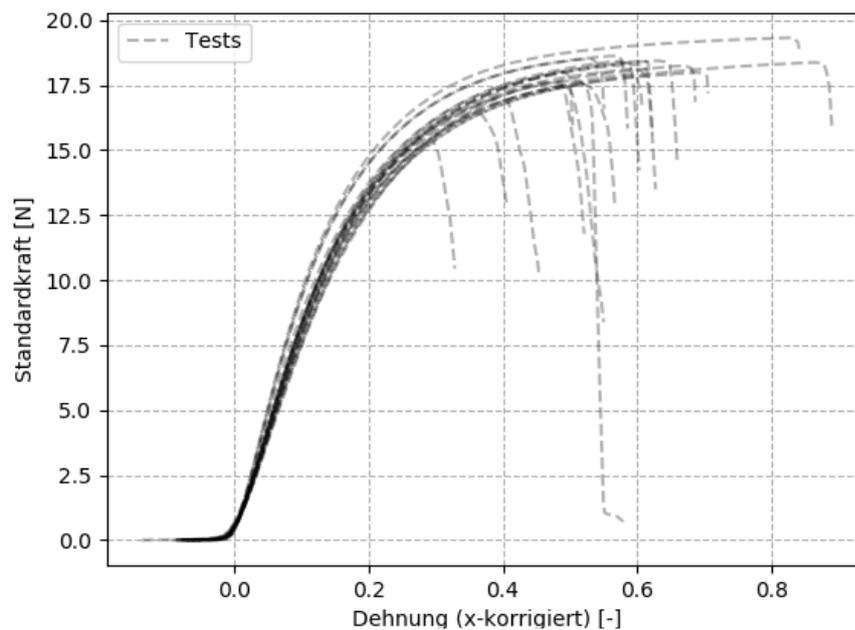
Bei der Bildung einer Mittelwertkurve entstehen aufgrund des möglicherweise sehr unterschiedlichen Materialversagens Herausforderungen, die im Nachfolgenden näher diskutiert werden. Bei unterschiedlichen Festigkeits- aber auch unterschiedlichem Bruchcharakteristiken einzelner Proben kann es bei einer simplen Mittelwertbildung aller verfügbaren Daten zu Unstetigkeitsstellen bei der Mittelwertkurve kommen, die wiederum nicht der Form einer natürlichen Prüfkurve entsprechen. Daraus folgt die Schwierigkeit, einen aussagekräftigen Mittelwert zu berechnen. Für die Lösung des Problems führt Schneider (2018) drei mögliche Ansätze auf.

In Variante 1 wird ein Mittelwert über alle Kurven gelegt. Allerdings kommt es hier zu Unregelmäßigkeiten und Unstetigkeiten entlang der Kurve. Diese Variante wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

In Variante 2 wird nur der Mittelwert bis zum Versagen der ersten Probe gebildet. Diese Variante bringt den wesentlichen Nachteil, dass über das Versagen dieser Probe hinaus keine Aussagen über das Materialverhalten getroffen werden können.

In Variante 3 werden analytische Funktionen verwendet, um die Kurven bestmöglich zu einer Mittelwertkurve nachzubilden. Hierbei gibt es unterschiedliche Softwarefunktionen, die entsprechende Kurven berechnen können.

In dieser Arbeit wurde Variante 3 angewandt, da diese Methode dem realen Mittelwert am nächsten kommt.



**Abbildung 8: Testergebnisse mehrerer Proben einer Prüfung**

## 1.6 Forschungsziel

Um für Computer-Simulationen der *Finiten Element Methode* künftig eine möglichst vollständige Datengrundlage zur Verfügung stellen zu können, soll in dieser Arbeit die *Paulownia* auf ihre mechanischen und elastischen Kennwerte geprüft werden. Dazu gehören Festigkeitseigenschaften auf Zug-, Druck-, Biege- und Scherbelastung, sowie die Bruchzähigkeit. Des Weiteren werden die elastischen Eigenschaften wie der E-Modul, die Poissonzahlen und der Schubmodul ermittelt. Zuletzt wird noch die Dichte bestimmt.

Die Datenerhebung findet, sofern möglich, unter Berücksichtigung der Richtungen LR, LT, TL, TR, RL und RT statt. Die Prüfungen sollen an acht unterschiedlichen Individuen durchgeführt werden. Der Probenumfang umfasst pro Prüfung, Individuum und Richtung mindestens  $n = 3$ , um eine möglichst aussagekräftige Datenlage zu ermöglichen.

Im Anschluss sollen die erhobenen Werte im Vergleich zu Literaturwerten eingeordnet werden.

## 2 Vorhandene Forschungen zur *Paulownia*

Um die in dieser Arbeit erhobenen Daten mit vorhandenen Forschungen in der Diskussion vergleichen zu können, werden in diesem Kapitel veröffentlichte Studien zur *Paulownia* kurz zusammengefasst.

### 2.1 Mechanische Eigenschaften *Paulownia*

Die zum Vergleich relevanten Werte der jeweiligen Studien sind im Diskussions- teil in Tabellen übersichtlich zusammengefasst.

Koman und Feher (2020) haben den *Paulownia Clone* in vitro 112 auf Dichte ( $\rho_0$ ), Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, Scherfestigkeit und den E-Modul geprüft und erhielten in der Reihenfolge folgende Werte: 215,1 kg/m<sup>3</sup>, 19,9 MPa, 32,3 MPa, 4,1 MPa und 3.800 MPa. Zudem führten Koman et al. (2017) eine Studie über die mechanischen Eigenschaften der *Paulownia tomentosa* durch. Die geprüften Parameter mit den jeweiligen Ergebnissen sind Dichte  $\rho_0$  (275 kg/m<sup>3</sup>), Biegefestigkeit (41,51 MPa), Druckfestigkeit (22,14 MPa), Zugfestigkeit (33,23 MPa), E-Modul (3492 MPa), Schlagfestigkeit (1,59 J/m<sup>2</sup>) sowie die Brinell-Härte in Längs- (26,74), Tangential- (9,13) und Radialrichtung (9,51).

Eine ähnliche Studie von Kaymakci et al. (2013) hat die *Paulownia elongata* auf Druckfestigkeit (35,56 MPa), Biegefestigkeit (35,79 MPa), E-Modul (3883,14 MPa) sowie Schlagbiegefestigkeit (0,25 kgm/cm<sup>2</sup>) geprüft.

Da auch die Holzanatomie einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat, wurden einige relevante Eigenschaften der *Paulownia fortunei* von Kiaei (2011) untersucht. Zu den untersuchten Parametern gehörten Zellwandanteil (17,41%), Porosität (82,59%), Faser Sättigungspunkt (31,15%), maximale Wasseraufnahmefähigkeit (349,72%) Anteil an Cellulose (51%), Hemicellulose (80,1%), Lignin (23,5%) und Extraktstoffe (11,8%), Faserlänge (996  $\mu$ m), Faserbreite (30,55  $\mu$ m), Breite der Lumen (25,3  $\mu$ m) und Zellwand-Dicke (5,25  $\mu$ m). Zudem wurde das Holz noch auf folgende mechanische Eigenschaften analysiert: Dichte (261 kg/m<sup>3</sup>), Biegefestigkeit (41,07 MPa), E-Modul (3740 MPa), Druckfestigkeit (14,61 MPa),

Müller und Stingl (2019) untersuchten in ihrer Studie Plantagen- und Altbäume der *Paulownia*. Da es deutliche Unterschiede zwischen den beiden Kategorien gab, werden hier nur die Plantagen-Bäume vorgestellt, da sie mit den in dieser Arbeit verwendeten Bäumen vergleichbarer sind. Diese wiesen im Mittel eine Dichte  $\rho_0$  von ca. 200 kg/m<sup>3</sup> auf. Zudem wurden noch die Zugfestigkeit (34,40

MPa), Zug E-Modul (4115 MPa), Druckfestigkeit (19,57 MPa), Querdruckfestigkeit (1,84 MPa), Biegefestigkeit (30,51 MPa), Biege E-Modul (4097,86 MPa), Schubfestigkeit (5,57 MPa) und Schlagzähigkeit (11,18 kJ/m<sup>2</sup>) ermittelt.

Weitere Werkstoffeigenschaften der *Paulownia* führen Frank und Voigt (2020) auf ihrer Website auf. Zu den dort aufgeführten 18 Eigenschaften gehören auch die Zugfestigkeit parallel zur Faser (36,12 - 40,6MPa), Biegefestigkeit (32 MPa), Biegebruchfestigkeit (2978 MPa), Druckfestigkeit parallel zur Faser (17,2 – 20 MPa), Dichte (280 kg/m<sup>3</sup>) ( $\omega = n/a$ ).

## 2.2 Sekundäre Nutzungsmöglichkeiten

Neben der primären Qualitätsholzgewinnung von *Paulownia* Bäumen gibt es noch sekundäre Nutzungsmöglichkeiten, diese führen zu einer weiteren Steigerung der Attraktivität zum Anbau des Holzes. So weisen die Blätter einen hohen Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff auf, und auch deren Verhältnis (C:N – Verhältnis) ist geeignet, um die Blätter in Biogasanlagen einzusetzen (Kirov et al. 2014).

Zudem fallen in der Holzverarbeitung Sägespäne an. Dieses Nebenprodukt kann zu einem Festbrennstoff verarbeitet werden. Obwohl das *Paulownia* Holz an sich einen sehr hohen Flammpunkt von 380°C hat und somit als Brennholz uninteressant ist, können die Sägespäne zu Briketts oder Pellets verpresst werden, welche den für Festbrennstoffen vorgeschriebenen Standards entsprechen (Spirchez et al. 2021).

Auch die Plattenwerkstoff Industrie könnte von der schnellwachsenden *Paulownia* profitieren. So wurden OSB-Platten von Salari et al. (2013) in einer Studie mit unterschiedlicher Presszeit und unterschiedlichen Anteilen an Nano-Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) hergestellt. Die geprüften Parameter waren Biegefestigkeit, E-Modul, Klebefestigkeit, Schrauben- und Nagel-Haltefestigkeit, Wasser Absorption, Dickenquellung sowie die Formaldehyd-Emissionen. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass *Paulownia* für die OSB Platten Herstellung geeignet ist.

In weiteren Studien wurden Spanplatten hergestellt. Kalaycioglu et al. (2005) stellten Spanplatten mit einer Dichte von 550 kg/m<sup>3</sup> und einer Presszeit von 5 Minuten her, sowie einer höheren Dichte von 650 kg/m<sup>3</sup> mit einer Presszeit ebenfalls von 5 Minuten sowie einmal von 7 Minuten. Die Prüfkörper wurden auf E-Modul, MOR, Biegefestigkeit, Klebefestigkeit (IB), Schrauben-Haltefestigkeit und Dickenquellung getestet. Die Ergebnisse erfüllen ebenfalls die vorgegebenen

Standards. Dass die Holzspäne von Paulownia für Spanplatten, auch in Kombination mit anderen Holzspäne Sorten, geeignet ist, stellten Nelis et al. (2017) in ihrer Studie fest.

### 3 Material und Methoden

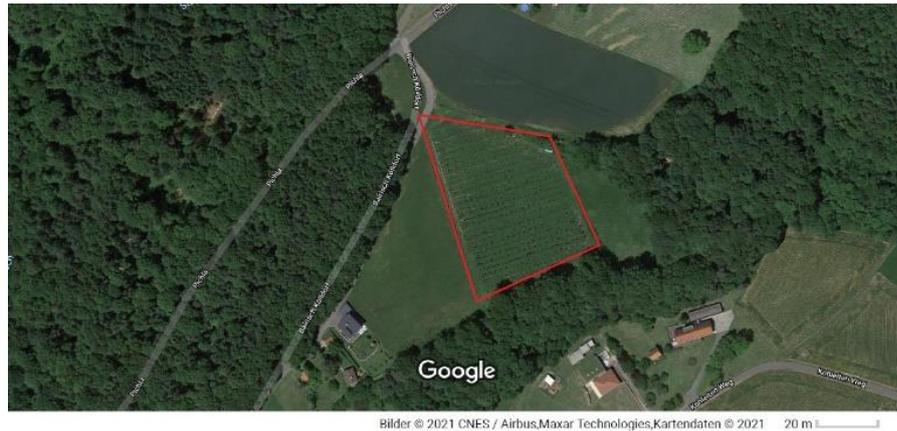
Für eine erste Übersicht wurden in Tabelle 2 die Prüfarten mit den zu prüfenden Parametern unter der jeweilig verwendeten DIN-Norm aufgeführt. Im Anschluss wird auf das verwendete Material und die Prüfaufbauten näher eingegangen.

**Tabelle 2: DIN-Normen der zu prüfenden Parameter**

Prüfungsart	Prüf-Parameter	Richtung	DIN
Rohdichte	Holzdichte	LR, LT	52182
Zugprüfung längs zur Faser	Zugfestigkeit, Zug E-Modul, Poissonzahlen	LR, LT	52188
Zugprüfung quer zur Faser	Zugfestigkeit, Zug E-Modul, Poissonzahlen	RT, TR, TL, RL	
Biegeprüfung	Biegefestigkeit, Biege E-Modul	LT, LR	52186
Schlagbiegeprüfung	Bruchschlagarbeit	LT, LR	52189
Druckprüfung parallel zur Faser	Druckfestigkeit, Druck E-Modul	LT, LR	52185
Druckprüfung quer zur Faser	Druckfestigkeit, Druck E-Modul	RT, TR, TL, RL	52192
Arcanprüfung	Schubfestigkeit, Schubmodul	LR, LT, RL, RT, TR, TL	

#### 3.1 Verwendetes Material

Die Stämme, welche für die Materialkennwerterhebung verwendet wurden, wuchsen auf der Versuchsfläche der Firma Plantownia. Die Versuchsfläche besitzt folgende Koordinaten: 46°53'03.9"N 15°56'10.9"E und liegt auf halber Strecke zwischen den Ortschaften Bairisch Kölldorf und Pichla, in der Nähe von Bad Gleichenberg, Steiermark, Österreich. Ein bei Google Maps gespeichertes Satellitenbild der Versuchsfläche ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9: Versuchsfläche der Firma Plantownia**

Gefällt wurden die acht gleichaltrigen Bäume mit acht Jahren. Nachdem die Stämme im Forschungszentrum Tulln zu Bohlen gesägt wurden, kamen sie in eine Trocknungsanlage. Bei der Trocknungsanlage handelt es sich um eine Hochfrequenz-Vakuum Trocknungsanlage. Mit entsprechenden Dioden wurde automatisch die Holzfeuchte alle 15 Minuten gemessen. Die entsprechenden Daten, die während der Trocknung erhoben wurden, sind im Anhang beigefügt, stehen aber nicht im Fokus dieser Forschung.

Sobald die vorgegebene Holzfeuchte von 12% erreicht wurde, wurden die Bohlen entnommen und in einem Klimaraum bei konstanter Temperatur von 20°C und Luftfeuchtigkeit 60% gelagert. Unter diesen Bedingungen stellt sich eine Holzgleichsfeuchte von 12% ein.

Aus den Bohlen wurden die genormten Prüfkörper hergestellt. Als Vorlage für die Herstellung der Prüfkörper diente eine Arbeitsanweisung von Linkeseder (2020), welche im Rahmen des WoodC.A.R.-Projekts erstellt wurde. Bei der Herstellung wurde darauf geachtet, dass nur aus fehlerfreiem Holz Proben hergestellt wurden. Dies ist wichtig, da z.B. Ast-, Zug- oder Druckholz anatomisch anders aufgebaut ist als normal gewachsenes Holz und somit andere mechanischen Eigenschaften aufweist. Auch zu beachten gilt, dass die Jahrringe der Prüfrichtung entsprechend in dem Prüfkörper liegen.

Für die Herstellung der Proben wurden eine Formatkreissäge und eine CNC Maschine verwendet. Die fertigen Prüfkörper wurden wiederum in einem Klimaraum bei konstanter Temperatur und Luftfeuchte zwischengelagert.

Um die Prüfkörper eindeutig zuzuordnen, wurde ein internes Nummern System verwendet.

## 3.2 Herstellung der Prüfkörper

Wie in Tabelle 2 bereits aufgeführt, wurden die Prüfkörper nach der Vorgabe der entsprechenden DIN-Normen hergestellt. Auf Basis der DIN-Normen wurde eine detaillierte Anleitung zur Herstellung der Prüfkörper von Linkeseder (2020) erarbeitet. Nach dieser Arbeitsanweisung wurden auch die in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper hergestellt. Im Folgenden wird näher auf die Geometrie der Prüfkörper und Besonderheiten bei den Prüfverfahren eingegangen.

### 3.2.1 Zugprüfung längs und quer zur Faser

Wie in Abbildung 10 und 11 ersichtlich, unterscheiden sich die Zugprüfungen längs (LR, LT) und quer (RT, RL, TR, TL) zur Faser in ihrer geometrischen Form. Mit dieser Prüfung wurden die sechs Poissonzahlen, die jeweiligen Zugfestigkeiten sowie der Zug E-Modul ermittelt.

#### Zugprüfung längs zur Faser

Um ausreichend Halt bei den während des Prüfvorgangs aufkommenden Kräften zu gewährleisten, wurden an den Enden jeweils zwei Hartholz Stücke (20x15x60 mm) angeleimt. Zusätzlich wird dadurch einer starken Quetschung des weichen *Paulownia* Holzes beim Einspannen in das Prüfwerkzeug vorgebeugt. Wie in der DIN vorgeschrieben, weist die Probe eine Ausfräsung auf (siehe Abbildung 10 unten). Diese wurde mit einer CNC Maschine hergestellt.

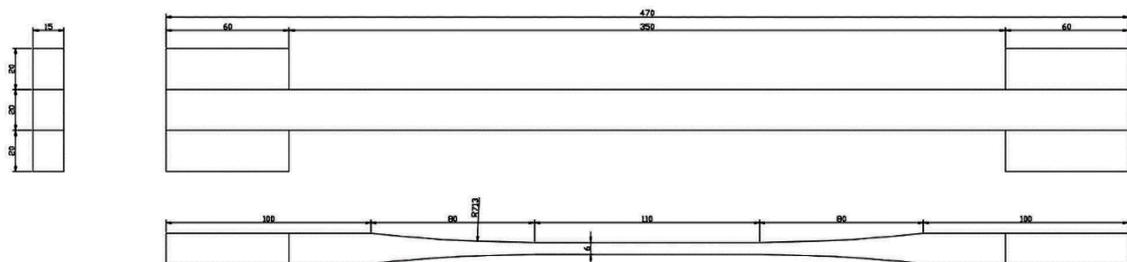


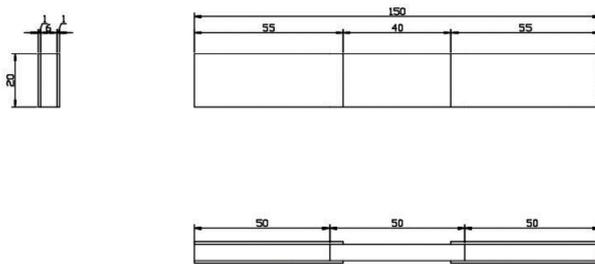
Abbildung 10: Geometrie Prüfkörper parallel zur Faser

#### Zugprüfung quer zur Faser

Die Geometrie der Prüfkörper quer zur Faser ist in Abbildung 11 dargestellt. Um eine für die Prüfmaschine ausreichende Größe zu erhalten, werden links und rechts an die *Paulownia* Stücke aus Hartholz angeleimt. Dies geschieht, indem die *Paulownia* zuerst auf die Maße 22x50x150 mm gesägt wird. An die Seiten werden jeweils Hartholz-Stücke ebenfalls mit den Maßen 22x50x150 mm mit 1K-PUR angeleimt. So entsteht eine feste Verbindung zwischen den Holzarten. Nachdem der Leim ausgehärtet war und die Proben von 22 auf 20 mm Dicke

gehobelt wurden, wurde das Holz in 6 mm dicke Streifen gesägt. Für einen sicheren Halt und um einen Bruch in der Leimfuge zu verhindern, wird zusätzlich ein Furnierstreifen sowohl auf die Ober- als auch auf die Unterseite der Probe, mit einer Überlappung von 5mm, geleimt (Abbildung 12). So wird gewährleistet, dass die Sollbruchstelle im Prüfkörper liegt.

Die Maße der *Paulownia* müssen in der Breite mindestens 47 mm betragen, da die Dehnungsmessung mit der Prüfmaschine in einem Messabstand von 25mm durchgeführt wird.



**Abbildung 11: Geometrie Prüfkörper quer zur Faser**



**Abbildung 12: Prüfkörper quer zur Faser (RT)**

### 3.2.2 Biegeprüfung

Bei der Prüfung wurden die Biegefestigkeit sowie der Biege E-Modul ermittelt. Geprüft wurde nach Vorlage einer Dreipunkt-Biegeprüfung der DIN 52186. Die DIN sieht vor, dass quadratische Stäbe mit den Maßen 20x20x360 mm verwendet werden. Diese wurden unter Berücksichtigung der Richtungen LT und LR hergestellt.

### 3.2.3 Schlagbiegeprüfung

Die Schlagbiegeprüfung unterliegt der DIN 52189. Es wurde mit dieser Prüfung die Bruchschlagfestigkeit gemessen. Die Maße der quadratischen Stäbe beträgt 20x20x300 mm. Wie die Biegeprüfung wurde diese Prüfung in den Richtungen LT und LR durchgeführt. Geprüft wurde mit einem mechanischen Schlagpendel der Firma Otto Wolpert-Werke.

### *3.2.4 Druckprüfung längs und quer zur Faser*

Die Druckprüfung unterliegt parallel zur Faserrichtung der DIN 52185 und quer zur Faserrichtung der DIN 52192. Die quadratischen Prüfkörper haben die Maße 20x20x50 mm. Da es für die Prüfung wichtig ist, dass die Probe einen sicheren Stand hat und sich korrekt ausrichtet, befindet sich am unteren Teil der Prüfmaschine, auf welcher der Prüfkörper steht, eine bewegliche Kugelkalotte. Um Randpressungen an den Pressplatten zu vermeiden und so eine möglichst homogene Kräfteinleitung in die Proben zu garantieren, wurden auf der Ober- und Unterseite der Proben aus 2k Epoxidharz Auflageflächen gegossen. Als Gussform dienten runde Schälchen aus Aluminium mit einem Durchmesser von 43 mm. Die zweite Seite konnte erst gegossen werden, nachdem das Epoxidharz 24 Stunden im Klimaraum aushärten konnte. Vor der Prüfung wurde das Aluminium entfernt.

### *3.2.5 Arcanprüfung*

Mit dieser Prüfung wurden die Schubfestigkeit und der Schubmodul ermittelt. In Abbildung 13 ist die Proben-Geometrie der Prüfkörper in der Seiten-, Drauf- und Vorderansicht dargestellt. Die Prüfung auf Scherfestigkeit unterliegt keiner Norm. Die Schwierigkeit, Holz auf Scherfestigkeit zu prüfen, liegt darin, die Probe während der Prüfung reiner Scherbelastung auszusetzen. Durch den anisotropischen Aufbau von Holz, kommt es während der Prüfung zu Störfaktoren von zusätzlichen Kräften wie Zug-, Druck-, Biege- oder Torsionsspannungen. Um diese auftretenden Kräfte zu minimieren, wurde von Arcan et al. (1978) eine Methode entwickelt, um Faser Verbundwerkstoffe auf repräsentable Schubfestigkeits-Werte zu prüfen. Diese Methode wurde von Müller et al. (2015) weiterentwickelt. Das in dieser Arbeit verwendete Prüfverfahren folgte diesen Erkenntnissen. Daraus leitet sich die besondere Probengeometrie ab, denn nur so kann gewährleistet werden, dass während der Prüfung in der Mitte der Probe Scherkräfte auftreten und die bereits genannten Störfaktoren weitestgehend minimiert werden.

Jedoch wurden nur die Richtungen RL und TL aus einem Stück geschnitten. Bei den weiteren 4 Richtungen wurden jeweils an den Seiten Hartholzstücke mit den Maßen 37x35 mm angeleimt, so dass nur der mittlere Teil aus dem zu prüfenden Material besteht.

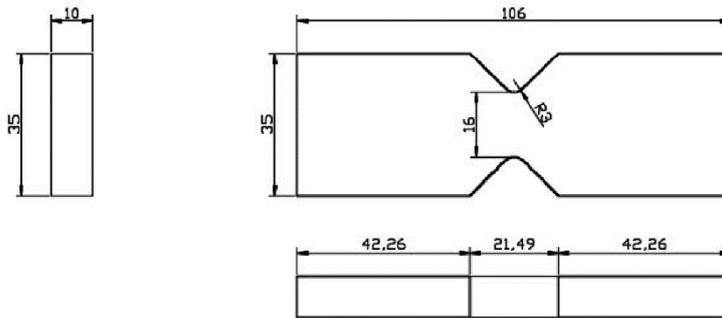


Abbildung 13: Geometrische Daten Arcan-Prüfkörper

### 3.2.6 Dichte Messung

Für die Messung der Dichte nach DIN 52182 wurden Würfel mit Kantenlängen von 20x20x20 mm hergestellt. Diese Würfel wurden aus den bereits beprobten Schlagbiege Prüfkörpern gesägt. Pro Individuum wurden 6 Würfel hergestellt und mit einer Schieblehre auf den 100stel mm genau vermessen. Anschließend wurde noch das Gewicht mittels Laborfeinwage ermittelt.

### 3.3 Messaufbau der verwendeten Prüfmaschinen

Der Messaufbau gliedert sich zum einen in die Softwareeinstellungen des testXpert III Programms und zum anderen in den Aufbau der Prüfmaschinen. Die Messungen wurden an drei unterschiedlichen Maschinen durchgeführt. Dabei handelte es sich um zwei Universalprüfmaschinen der Firma Zwick/Roell mit dem Modell Z020 und Z100 sowie einem Schlagpendel der Firma Otto Wolpert-Werke. Für die Maschinen von Zwick/Roell wurde das dazugehörige Softwareprogramm testXpert III verwendet. Wichtig für die Testdurchführung sind die Voreinstellungen in der Software. Die wichtigsten Parameter sind:

- Die Messmethode: Auswählen der Messungs-Art mit der entsprechenden DIN-Norm.
- Die Vorkraft: Gibt an, wie stark die Probe gespannt oder belastet wurde, bevor der eigentliche Prüfversuch gestartet wird. Damit können Messabweichungen am Beginn der Prüfung verhindert werden.
- Die Prüfgeschwindigkeit: Beschreibt die Geschwindigkeit, mit welcher die Traverse nach oben bzw. nach unten fährt und wird üblicherweise in mm/min oder mm/sec. angegeben.
- Prüfungsende: Definiert durch Kraftabschaltwert, welcher in Prozent oder Newton angegeben wird. Bedeutet, wenn die Spannungsdehnungskurve zu einem definierten Wert, i.d.R. 95% abfällt, oder die vorgegebene Kraft erreicht wird, wird die Prüfung beendet.

Für den Aufbau der Prüfmaschine gilt, dass das Werkzeug zum Einspannen der Prüfkörper parallel ausgerichtet wird, um ein mögliches Verdrehen der Probe auszuschließen, welches zu unerwünschten Spannungen führen kann.

### 3.3.1 Software-Einstellungen

In Tabelle 3 sind die jeweiligen Softwareeinstellungen zu den durchgeführten Messungen aufgeführt.

**Tabelle 3: Softwareeinstellungen der unterschiedlichen Messungen**

Prüfung	Prüf-Maschine	Weg-Messmethode	Vorkraft [N]	Prüf-geschw. [mm/min]	Prüfungs-ende
Zugfestigkeit (LR, LT)	Z020	Laser Extensometer	10	1	95% von $F_{max}$
Poissonzahl (LR, LT)	Z020	Video- und Laser Extensometer	20	1	500 N
Zugfestigkeit (RT, TR, TL, RL)	Z020	Laser Extensometer	10	1	95% von $F_{max}$
Poissonzahl (RT, TR, TL, RL)	Z020	Video und Laser Extensometer	10	1	80N
Biegefestigkeit (LR, LT)	Z100	Makromechanischer Extensometer	20	10	90% von $F_{max}$
Druckfestigkeit (LR, LT, RL, RT, TR, TL)	Z100	Traversenweg	100	3	90% von $F_{max}$
Schubfestigkeit (LR, LT, TR, TL)	Z100	Laser Extensometer	10	3	Vorne 100 N *) Hinten 90%
Schubfestigkeit (RL, RT)	Z100	Laser Extensometer	10	3	Vorne 250 N Hinten 90%

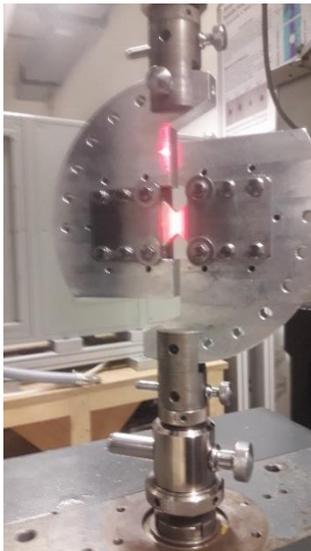
\*) Für eine genauere Datenlage des Schubmoduls wurde die Schubfestigkeits-Messung zweimal durchgeführt. Nachdem die Messung auf der Vorderseite bis 100 bzw. 250 N geprüft wurde, wurde die Probe entnommen, um 180° gedreht, wieder eingespannt, und die Rückseite wurde bis zum Bruch belastet.

Des Weiteren wurde vor jeder Prüfung der Prüfkörper mit einem digitalen Messschieber auf den hundertstel Millimeter genau gemessen, und die Maße wurden entsprechend in die Software eingetragen, um jene Spannung zu errechnen, welche sich aus der gemessenen Kraft und der Fläche des Prüfkörpers herleitet.

### 3.3.2 Prüfmaschinen Aufbau

Bei der Universalprüfmaschine Z020 wurde ein Kraftaufnehmer mit 20 kN und bei der Z100 mit 100 kN verwendet. Die Einspannlänge zwischen den Werkzeugen betrug bei der Längszug-Prüfung 350 mm, bei der Querkzug-Prüfung 70 mm, bei der Schubfestigkeits-Prüfung 22 mm, bei der Biegefestigkeits-Prüfung 21 mm und bei der Druckfestigkeits-Prüfung 51 mm. Die Prüfaufbauten sind in Abbildung 14-20 dargestellt.

Um einer Beschädigung des Prüfkörpers vorzubeugen, wurde bei der Biegeprüfung eine Klammer aus Metall an die Stelle der Probe geklemmt, an welcher die Maschine von oben Druck ausübt.



**Abbildung 14: Arcan Prüfung**



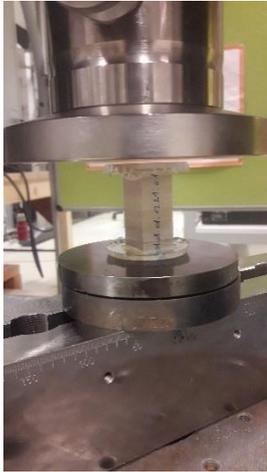
**Abbildung 15: Querkzug Prüfung Poissonzahl**



**Abbildung 16: Längszug Prüfung Festigkeit und E-Modul**

Bei der Verwendung eines Videoextensometers erkennt die Software Markierungen oder die Seitenkanten der Probe. Im Falle der Bestimmung der Poissonkonstanten wurden die Seitenkanten als Bezugspunkt herangezogen. Für die Messung der Poissonzahl wurde hinter dem Prüfkörper ein helles Licht (Abbildung 15, exemplarisch an der Querkzug-Prüfung dargestellt) geschaltet, um einen stärkeren Kontrast zur Probe herzustellen. So konnte die Kamera die Ränder der Probe besser erkennen, um die Breitenänderung auf Längszug im  $\mu\text{m}$  Bereich

zu analysieren. Da es trotz des Kontrastes zu Messfehlern kommen kann, wurde jede Probe 4-mal bis zu der vorgegebenen Kraftgrenze geprüft. Diese Prüfung wurde vor der Festigkeitsprüfung sowohl an den Querkzug-, als auch Längszugproben durchgeführt. Anschließend wurde die Lichtquelle entfernt, und die Prüfung wurde bis zum Versagen des Materials geprüft.



**Abbildung 17:**  
**Druck Prüfung**



**Abbildung 18:**  
**3-Punkt Biegeprüfung**



**Abbildung 19:**  
**Schlagpendel Aufnahme Prüfkörper**



**Abbildung 20:**  
**Schlagpendel Mess-einrichtung und Hammerkopf**

Für die Ermittlung der Bruchschlagzähigkeit kam ein mechanisches Schlagpendel der Firma Otto Wolpert-Werke zum Einsatz. Verwendet wurde ein 15kg schwerer Pendelkopf. Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper mit einem Messschieber gemessen und auf einer Feinwaage gewogen.

### 3.4 Auswertung der Ergebnisse

Die Daten wurden während des Prüfverfahrens mit der Software testXpert III in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet. Aus diesem lässt sich zum einen die Festigkeit berechnen, zum anderen das elastische und plastische Verhalten des untersuchten Materials beschreiben.

#### 3.4.1 Festigkeit

Wie bereits in Kapitel 1.3.2 beschrieben, bezeichnet die Festigkeit jene Spannung, welche entsteht, wenn eine Kraft [N] auf eine Fläche [mm<sup>2</sup>] wirkt. Für die Auswertung wurde die Probe bis zum Bruch belastet. Die dabei entstandene maximale Kraft wurde automatisch von der Software ermittelt und auf die manuell eingegebene Fläche (Länge x Breite) bezogen. Die Biegefestigkeit ergibt sich aus dem maximalen Biegemoment, dividiert durch das Widerstandsmoment. Bei der durchgeführten Druckprüfung quer zur Faser konnte keine Maximallast für das Versagen ermittelt werden, da durch die Kollabierung der Zellen in den einzelnen Jahrringen die Probe schrittweise verdichtet wird. Nach dem ersten steilen Anstieg der Spannungs- Dehnungskurve kommt es zum Versagen des ersten Jahrrings. In weiterer Folge oszilliert die Prüfkurve und steigt dabei kontinuierlich an. Sind alle Frühholzbereiche komprimiert, erfolgt ein neuerlicher steiler Anstieg. Die Querdruckfestigkeit kann daher nicht wie bei den anderen Prüfversuchen automatisch ausgewertet werden. Aus diesem Grund wurde daraufhin die maximale Kraft manuell vor dem ersten irreversiblen Bruch ermittelt. Bei der Ermittlung der Scherbelastung gab es in den Richtungen RL und TL ebenfalls keinen klaren Bruch, sodass auch hier manuell der korrekte  $F_{\max}$  Wert ausgelesen werden musste.

Nach Durchführung der mechanischen Festigkeitsversuche wurden auf der Software die relevanten Werte ausgewählt und in Excel exportiert. Erste statistische Auswertungen wurden in Excel durchgeführt; für ausführliche Statistiken wurde die Software SPSS verwendet.

#### 3.4.2 Elastisches Verhalten

Das elastische Verhalten wird durch die, wie in Kapitel 1.3.3 dargestellten, E-Moduli, Schubmoduli und die Poissonzahlen beschrieben. Auch diese Werte wurden automatisch von der Software testXpert III ermittelt. Der E-Modul wird zwischen 10% und 40% von  $F_{\max}$  festgelegt. Auch hier musste bei der Druckprüfung manuell der E-Modul ausgelesen werden. Sicherheitshalber wurde auch bei den anderen Prüfungen kontrolliert, ob die Gerade des E-Moduls im elastischen Bereich des Kraft-Weg-Diagramms liegt.

Für die Berechnung der Schubmoduli wurde ein vorgefertigtes Excel-Paper des WoodC.A.R. Projekts verwendet. Mit den inkludierten Formeln zur Berechnung der Schubmoduln konnten der Längsschub (LR, LT), der Rollschub (RT, TR) sowie das Abscheren (RL, TL) errechnet werden.

Die Poissonzahlen ( $\mu$ ) wurden ebenfalls automatisch erstellt und mussten als Parameter zum Exportieren in Excel ausgewählt werden.

### *3.4.3 Bruchschlagarbeit*

Die Daten der Prüfkörper, Länge, Höhe, Breite und Gewicht wurden mit den gemessenen Daten des Schlagpendels in einer Excel-Tabelle zusammengefasst. Das verwendete Prüfmaschinen Modell hat den gemessenen Wert in [kgm] angegeben. Um eine gängige Maßeinheit, Joule [J], zu erhalten, musste der erhobene Wert [kgm] mit dem Faktor 10 multipliziert werden. Die Bruchschlagarbeit wird in [kJ/m<sup>2</sup>] angegeben. Hierzu wurde das berechnete Joule durch 1000 und dann durch die Fläche [m<sup>2</sup>] des Prüfkörpers dividiert. Die Fläche ergibt sich aus der Höhe, multipliziert mit der Breite.

### *3.4.4 Dichte*

Mit einer Schieblehre und einer Laborwaage wurden die genaue Kantenlänge der Würfel sowie das Gewicht ermittelt und in einer Excel Tabelle zusammengefasst. In einem Trockenschrank wurde bei 103 +/-2°C die Feuchtigkeit entzogen. Im Abstand von drei Tagen wurden die Proben gewogen, bis eine Gewichtsveränderung von unter 1% zur vorherigen Messung festgestellt wurde. Da die Proben durch das Feuchtigkeitsgefälle zwischen der Luft und dem Holz wieder Wasser aufnehmen und sich somit eine Gewichtsveränderung einstellt, mussten die Proben direkt nach der Entnahme aus dem Trockenschrank in einen mit Silikat befüllten Behälter gelegt werden. So wurde gewährleistet, dass die Prüfkörper nur während der Gewichtsmessung Kontakt mit der Umgebungsfeuchte hatten.

### 3.4.5 Statistische Auswertung

Da die Software testXpert III bereits automatisch die Kennwerte ausgelesen hat, mussten in einem weiteren Schritt diese Daten noch statistisch ausgewertet werden. Dazu wurden die Software Programme Excel und SPSS verwendet. Die zu ermittelnden Kennwerte sind der Mittelwert, Median, Standardabweichung und Variationskoeffizient. Die Darstellung erfolgt zum einen in Tabellenform und für eine bessere optische Darstellung in Boxplots. Für die Berechnung gelten folgende Formeln:

Mittelwert ( $\bar{x}$ ):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

Standardabweichung (s):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Variationskoeffizienten (CoV):

$$COV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (14)$$

$x_i$  = Wert einer einzelnen Messung,  $n$  = Anzahl der Messungen

### 3.4.6 Mittelwertkurve

Für die Mittelwertkurven wurden die Daten einem Partnerinstitut, Institut für Fahrzeugsicherheit (VSI) der TU-Graz, übermittelt, welches mit einem erstellten Algorithmus die Daten der gemessenen Kurven zu einem Mittelwert zusammengefasst hat. Die zurückerhaltenen Werte mussten aus einer .txt-Datei in Excel eingelesen und als Grafik dargestellt werden.

## 4 Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt zum einen in Tabellenform, um die Gesamtheit der erhobenen Daten detailliert aufzuzeigen. Zusätzlich wurden Individuen übergreifende Boxplots der jeweiligen Richtungen erstellt, um einerseits die Streuung, andererseits die Größenunterschiede der Richtungen sowie mögliche Ausreißer und Extremwerte grafisch darzustellen.

### 4.1 Test auf Normalverteilung

Bei Test auf Normalverteilung werden die erhobenen Daten mit den erwarteten Daten verglichen. Daraus ergeben sich zwei Hypothesen:

- Nullhypothese,  $H_0$ : Die erhobenen Daten sind Normalverteilt
- Alternativhypothese,  $H_1$ : Die erhobenen Daten sind nicht Normalverteilt

Übersteigt die Signifikanz den Wert 0,05, kann  $H_0$  nicht verworfen werden, und somit liegt eine Normalverteilung vor. Ist der Wert kleiner als 0,05, wird  $H_0$  verworfen, und es gilt die Alternativhypothese  $H_1$ .

Um die Normalverteilung zu prüfen, wird der Shapiro-Wilk Test oder der Kolmogorov-Smirnov Test verwendet. Dabei gilt jedoch zu beachten, dass der Shapiro-Wilk Test aussagekräftiger ist als der Kolmogorov-Smirnov Test. Somit kommt dem zuerst genannten Test eine größere Bedeutung zu und sollte bei der Auswertung priorisiert werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung für die Dichte, die Festigkeitseigenschaften mit den jeweiligen Richtungen, sowie die Schlagzähigkeitsprüfungen aufgeführt.

**Tabelle 4: Test auf Normalverteilung**

	<b>Tests auf Normalverteilung</b>					
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistik	Df	Signifi- kanz	Statistik	df	Signifi- kanz
Dichte	,094	48	,200*	,981	48	,630
Zugfestigkeit LR	,160	23	,133	,908	23	,037
Zugfestigkeit LT	,088	24	,200*	,985	24	,967
Zugfestigkeit RL	,086	24	,200*	,954	24	,332
Zugfestigkeit RT	,239	23	,001	,728	23	,000
Zugfestigkeit TL	,150	24	,172	,927	24	,082
Zugfestigkeit TR	,125	24	,200*	,947	24	,234
Druckfestigkeit LR	,102	24	,200*	,966	24	,576
Druckfestigkeit LT	,163	24	,099	,932	24	,107
Druckfestigkeit RL	,157	24	,128	,951	24	,278
Druckfestigkeit RT	,160	24	,113	,944	24	,198
Druckfestigkeit TL	,088	24	,200*	,976	24	,804
Druckfestigkeit TR	,115	24	,200*	,981	24	,916
Biegefestigkeit LR	,126	45	,072	,950	45	,053
Biegefestigkeit LT	,102	48	,200*	,920	48	,003
Scherfestigkeit LR	,083	26	,200*	,978	26	,826
Scherfestigkeit LT	,176	25	,043	,852	25	,002
Scherfestigkeit RL	,131	24	,200*	,976	24	,814
Scherfestigkeit RT	,147	24	,191	,949	24	,261
Scherfestigkeit TL	,122	24	,200*	,973	24	,737
Scherfestigkeit TR	,092	24	,200*	,968	24	,619
Schlagzähigkeit LR	,311	8	,022	,755	8	,009
Schlagzähigkeit LT	,221	8	,200*	,918	8	,411

\*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors

Wie anfangs erwähnt, sind Unterschiede zwischen den beiden Tests erkennbar. Dies ist durch die jeweiligen, den Tests zugrundeliegenden Berechnungsarten zu erklären. Bei dem Kolmogorov-Smirnov Test sind 20 von 23 Tests Normalverteilt, wohingegen bei dem Shapiro-Wilk Test lediglich 18 Prüfungen Normalverteilt sind.

## 4.2 Dichte

Die Darrdichte  $\rho_0$  der gemessenen Stämme, ersichtlich in Tabelle 5, weist im gesamten Durchschnitt 221,52 kg/m<sup>3</sup> auf. Individuum 8 liegt mit über 250 kg/m<sup>3</sup> höher als die anderen Individuen, welche jeweils unter 230 kg/m<sup>3</sup> liegen. Der Variationskoeffizient (CV), weist im Schnitt einen geringen Wert auf. Insgesamt streuen die Werte mit knapp 13% um den erwarteten Wert.

**Tabelle 5: Darrdichte der jeweiligen Individuen**

Individuum	n	$\bar{x}$	CV
		[kg/m <sup>3</sup> ]	%
1	6	204,17	9,0
2	6	205,68	18,1
3	6	217,65	9,3
4	6	227,53	12,3
5	6	218,39	12,0
6	6	226,67	14,6
7	6	219,94	13,7
8	6	252,16	6,0
Gesamt	48	221,52	12,9

Grafisch sind die Daten in Abbildung 21 dargestellt. Einzig Individuum 4 weist einen Ausreißer auf, welcher aber unter Betrachtung der anderen Individuen im Rahmen liegt. Die 4 bedeutet, dass es sich um den 4ten Wert in der verwendeten Software handelt und kann somit dem genauen Prüfkörper, um welchen es sich dabei handelt, zugeordnet werden.

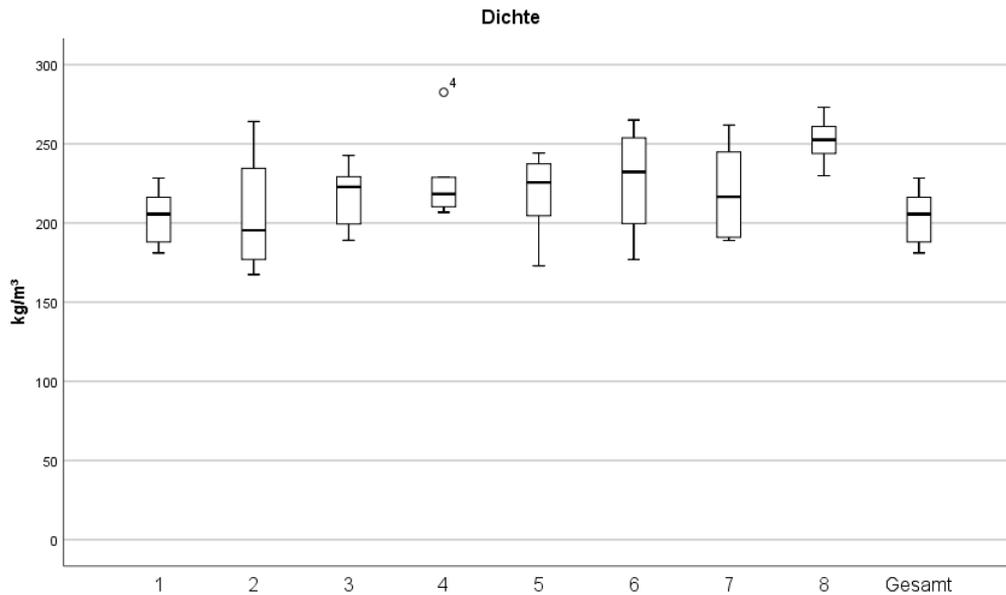


Abbildung 21: Dichteverteilung Individuum 1-8 (n=6), Gesamt (n=48)

### 4.3 Festigkeit

Eine bedeutende Einflussgröße auf die Festigkeitseigenschaften ist die Dichte. Es konnte beobachtet werden, dass mit zunehmender Dichte auch die Festigkeitswerte steigen (Niemz und Sonderegger 2017). Somit ist zu erwarten, dass die *Paulownia* mit ihrer, im Vergleich zu anderen Holzarten geringen Dichte niedrige Festigkeiten aufweisen wird. Auf eine genauere Einordnung diesbezüglich wird im Diskussionsteil eingegangen.

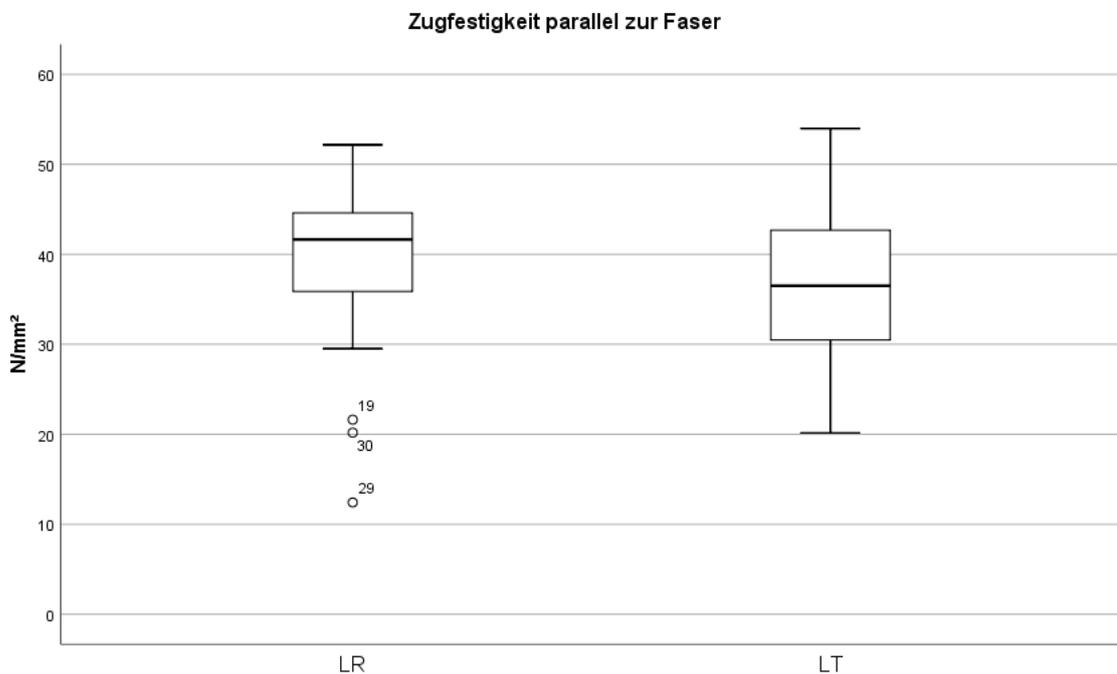
#### 4.3.1 Zugfestigkeit

Aus Tabelle 6 wird ersichtlich, dass Individuum 8 in Richtung LR die niedrigsten und in Richtung LT die höchsten Werte aufweist. Die Auffälligkeiten ziehen sich auch in den Richtungen RT, TL und TR durch. Einzig in Richtung RL sind die Werte im mittleren Bereich. Der Variationskoeffizient von Individuen 5 und 8 sind in Richtung LR mit über 30 % auffällig hoch. Als Richtwert dient hier ein CV von 20% bei fehlerfreiem Holz (Niemz und Sonderegger 2017).

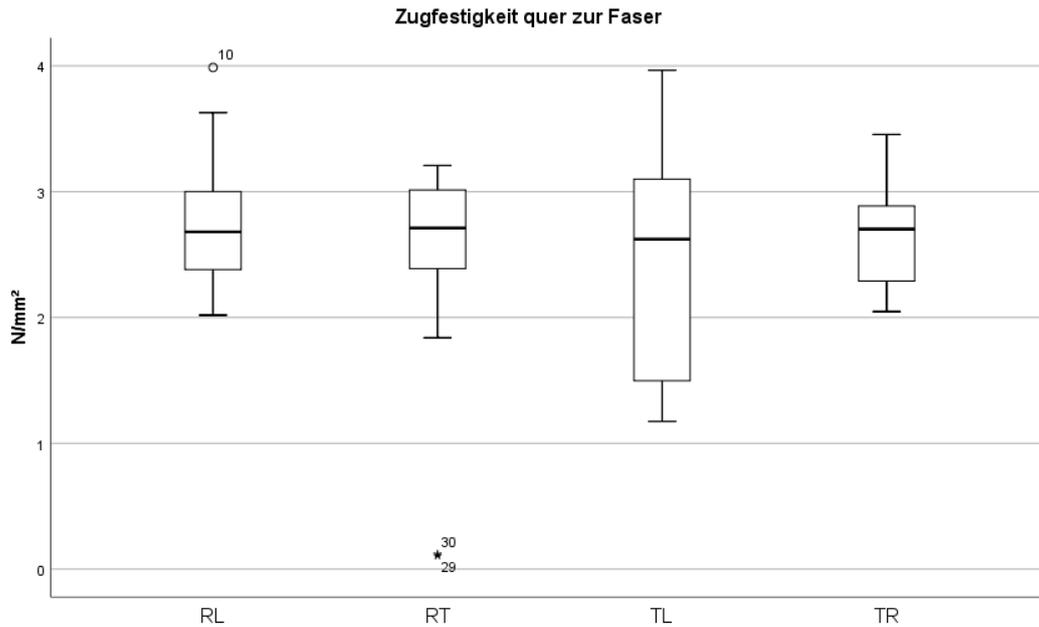
**Tabelle 6: Zugfestigkeit Mittelwert und CV**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV										
	[N/mm <sup>2</sup> ]	%										
1	36,48	14,7	45,58	7,1	3,10	5,4	2,77	10,9	2,93	9,4	3,16	9,4
2	43,45	9,6	27,31	21,5	2,08	3,3	2,37	12,1	1,22	4,3	2,06	0,9
3	46,14	16,6	35,29	21,2	3,59	11,6	3,03	6,8	3,32	19,1	2,70	1,8
4	41,09	9,0	32,83	14,5	2,59	0,5	2,57	25,8	1,36	7,1	2,18	4,3
5	37,82	31,0	35,89	6,2	2,26	3,7	2,43	10,7	2,56	3,2	2,41	5,6
6	45,86	8,0	37,65	9,8	2,76	5,3	2,61	5,7	3,06	12,2	2,94	8,4
7	40,91	5,7	27,38	9,5	2,76	11,9	3,11	3,2	1,95	19,0	2,73	0,8
8	21,17	35,8	47,81	10,1	2,70	5,6	0,11	7,6	3,85	5,9	3,07	2,4
Ge-samt	38,93	26,3	36,22	23,7	2,73	17,7	2,47	33,6	2,53	37,1	2,65	15,4

Die Werte 29 und 30 aus den Boxplots der Abbildung 22 und 23 sind dem Individuum 8 zuzuordnen. Die anderen beiden Ausreißer sind weniger auffällig.



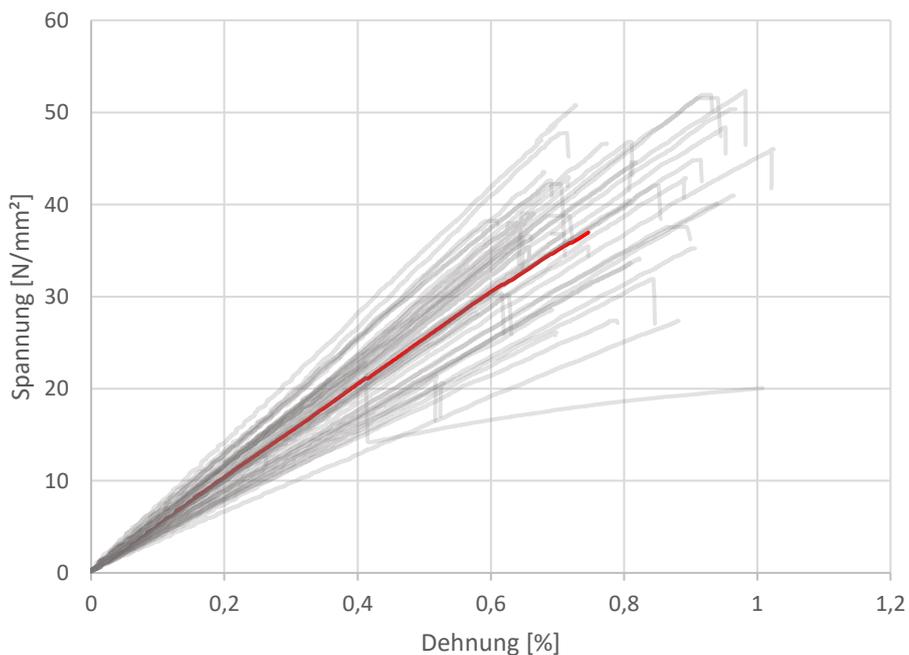
**Abbildung 22: Boxplot Zugfestigkeit parallel zur Faser, Richtung LR (n=23) und TL (n=24)**



**Abbildung 23: Boxplot Zugfestigkeit quer zur Faser, Richtung RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24)**

In Abbildung 24 wurden die Ergebnisse der Längs Zugprüfung aus dem von testXpert III erstellten Kraft-Weg-Diagramm in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgerechnet. Zu erkennen sind die 47 Verläufe (grau) und die daraus berechnete Mittelwertkurve (rot). Das von der Mittelwertkurve berechnete E-Modul beträgt 5030 N/mm<sup>2</sup> und die Zugfestigkeit 37 MPa.

**Zug Längs mit Mittelwertkurve**



**Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs Diagramm der Zugprüfung longitudinal (n=47)**

### 4.3.2 Druckfestigkeit

Auch bei der Druckfestigkeit, in Tabelle 7 dargestellt, ist auffällig, dass Individuum 8 in den Radial Richtungen die niedrigsten Werte aufweist, in den Longitudinal die höchsten Werte und in der tangentialen Richtung im oberen Bereich liegt. Des Weiteren ist auffällig, dass der Variationskoeffizient in radialer Richtung in der Gesamtauswertung deutlich über den Werten innerhalb eines Individuums liegt. Würde Individuum 8 bei der Bewertung nicht berücksichtigt werden, läge der CV in RL bei 6% und in RT bei 7%.

**Tabelle 7: Druckfestigkeit Mittel- und CV-Wert**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV										
	[N/mm <sup>2</sup> ]	%										
1	23,24	4,2	22,10	18,3	1,73	2,0	1,74	4,1	1,80	3,3	1,80	5,2
2	23,10	18,7	21,16	28,7	1,79	2,9	1,78	0,9	1,51	1,5	1,50	3,4
3	23,19	9,5	24,13	14,1	1,87	5,9	1,83	5,7	1,81	5,2	1,84	5,8
4	25,59	2,5	25,33	6,4	1,70	1,6	1,72	2,8	1,50	6,2	1,53	7,3
5	27,11	18,9	22,58	21,2	1,56	6,2	1,53	8,6	1,87	9,6	1,92	11,4
6	24,29	11,9	23,56	18,9	1,68	3,6	1,67	7,6	2,03	0,9	2,05	2,5
7	26,67	14,4	22,88	16,3	1,60	3,6	1,62	2,9	1,91	4,0	1,91	2,8
8	29,42	12,0	29,27	5,3	0,56	2,8	0,48	9,7	1,96	5,0	2,02	3,6
Gesamt	25,33	13,9	23,88	17,2	1,56	25,8	1,55	27,5	1,80	11,2	1,82	11,9

In Abbildung 25 sind die Boxplots der Druckfestigkeit parallel und in Abbildung 26 quer zu Faser dargestellt. Hier ist grafisch an dem Mittelwert gut zu erkennen, dass es innerhalb der Richtungen keine großen Unterschiede gibt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die quadratischen Prüfkörper lediglich auf der y-Achse um 90° gedreht wurden. Dies ist für die zusätzlichen Filmaufnahmen von Bedeutung, hat auf die Prüfung jedoch keinen Einfluss.

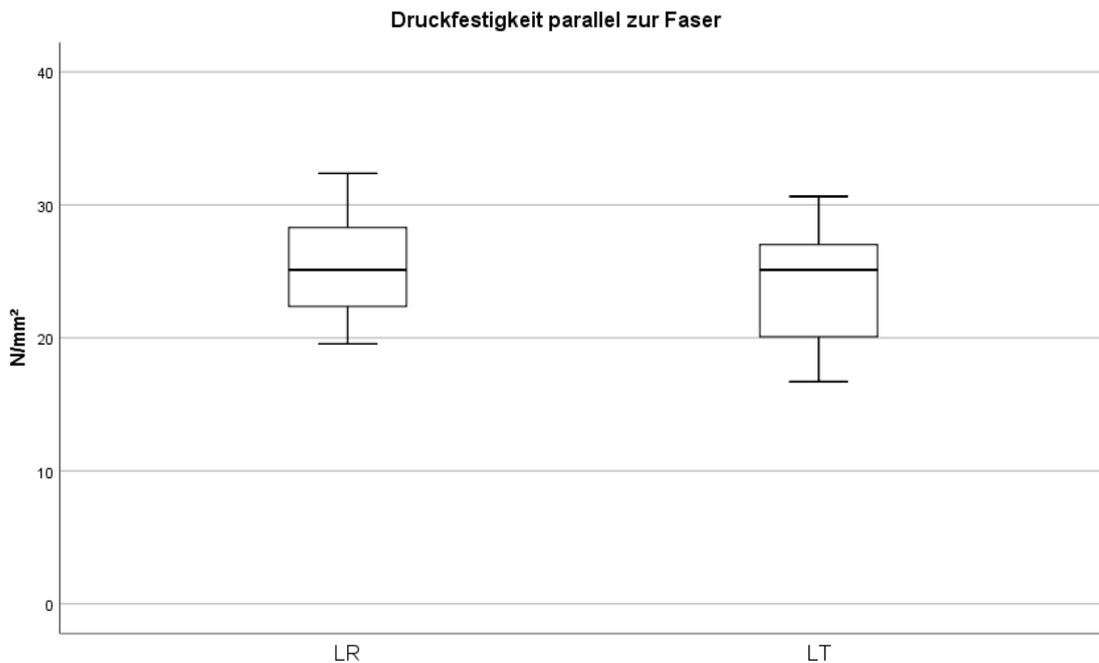


Abbildung 25: Boxplot Druckfestigkeit parallel zur Faser, Richtung LR (n=24) und LT (n=24)

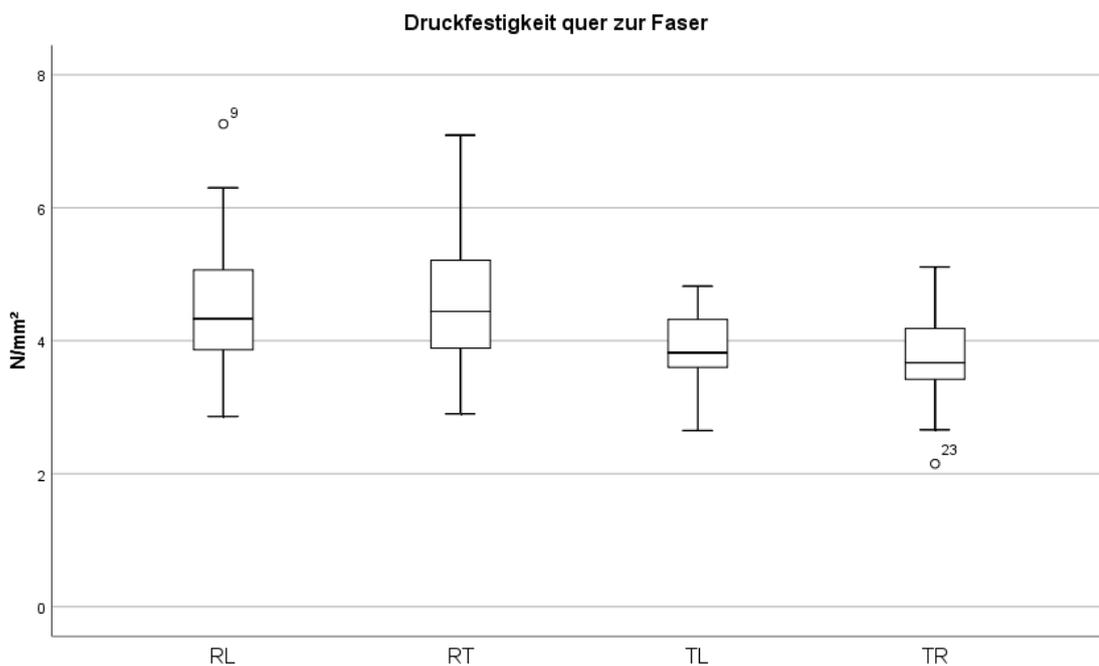


Abbildung 26: Boxplot Druckfestigkeit quer zur Faser, Richtung RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24)

Da sich die Richtungen TL und TR in der Datenanalyse nicht unterscheiden, wurden diese in Abbildung 27 zusammen mit der Mittelwertkurve grafisch dargestellt. Die Prüfung wurde automatisch bei einer Kompression von 25 mm abgebrochen. Da die Prüfkörper eine Höhe von 50 mm aufwiesen, entspricht dies einer Dehnung von 50%. Eine weitere Kompression der Prüfkörper hätte zu keinem ersichtlichen Mehrwert der Daten geführt.

### Mittelkurve Tangentialer Druck

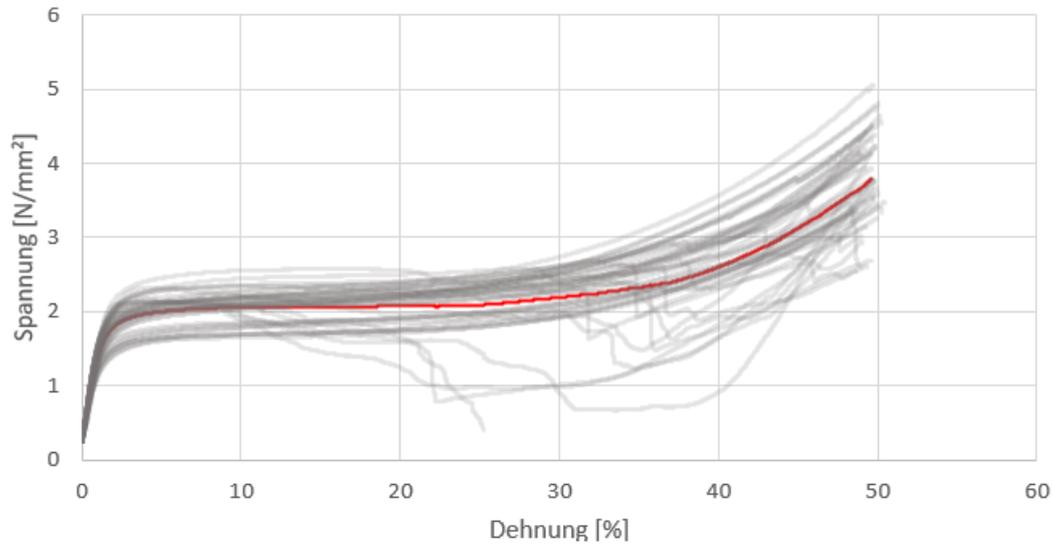


Abbildung 27: Spannungs-Dehnungs Diagramm Druckfestigkeit mit Mittelwertkurve

#### 4.3.3 Biegefestigkeit

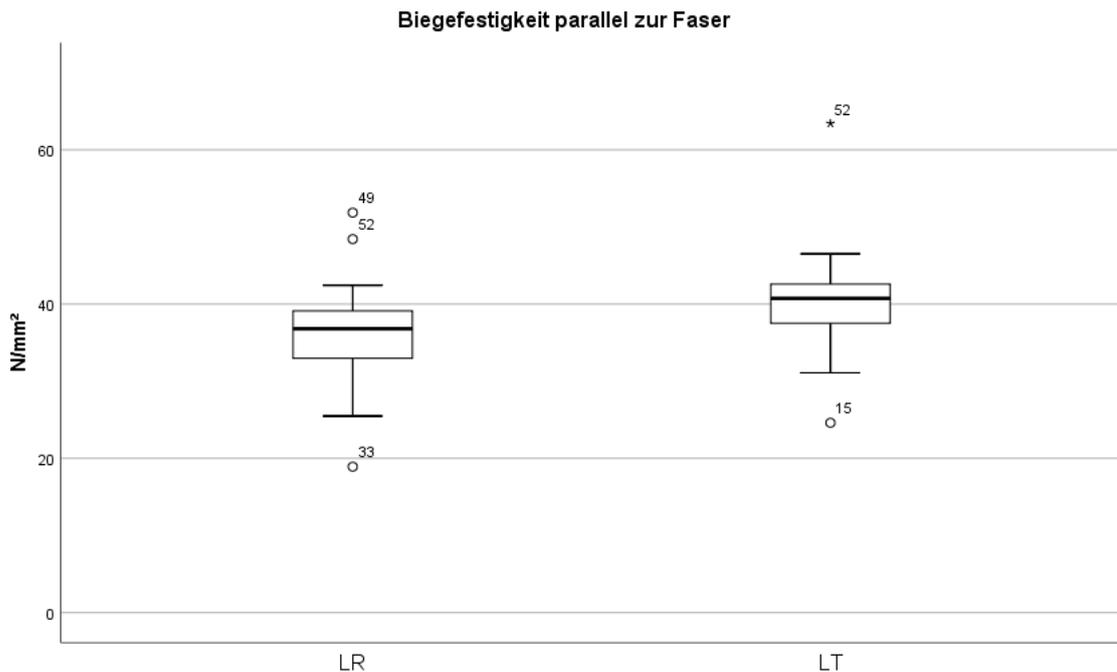
In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Dreipunkt-Biegeprüfung zusammengefasst. In der Richtung LR ist der Festigkeitswert von Individuum 8 um 27,9% höher als der Mittelwert der anderen 7 Bäume, welcher ohne Individuum 8 bei 35,5 N/mm<sup>2</sup> liegt. In der anderen Richtung ist der Unterschied nicht ganz so gravierend. Der CV-Wert weist keine Auffälligkeiten auf.

Tabelle 8: Biegefestigkeit Mittel- und CV-Wert

Individuum	LR		LT	
	$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	CV %	$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	CV %
1	34,7	12,5	38,5	10,3
2	36,4	7,1	38,9	15,2
3	37,0	8,4	37,2	13,3
4	36,1	9,8	40,6	5,3
5	30,6	19,7	39,6	10,4
6	34,9	15,0	37,0	7,8
7	38,6	5,6	40,1	12,2
8	45,4	15,1	45,4	23,8
Gesamt	36,4	15,8	39,6	15,0

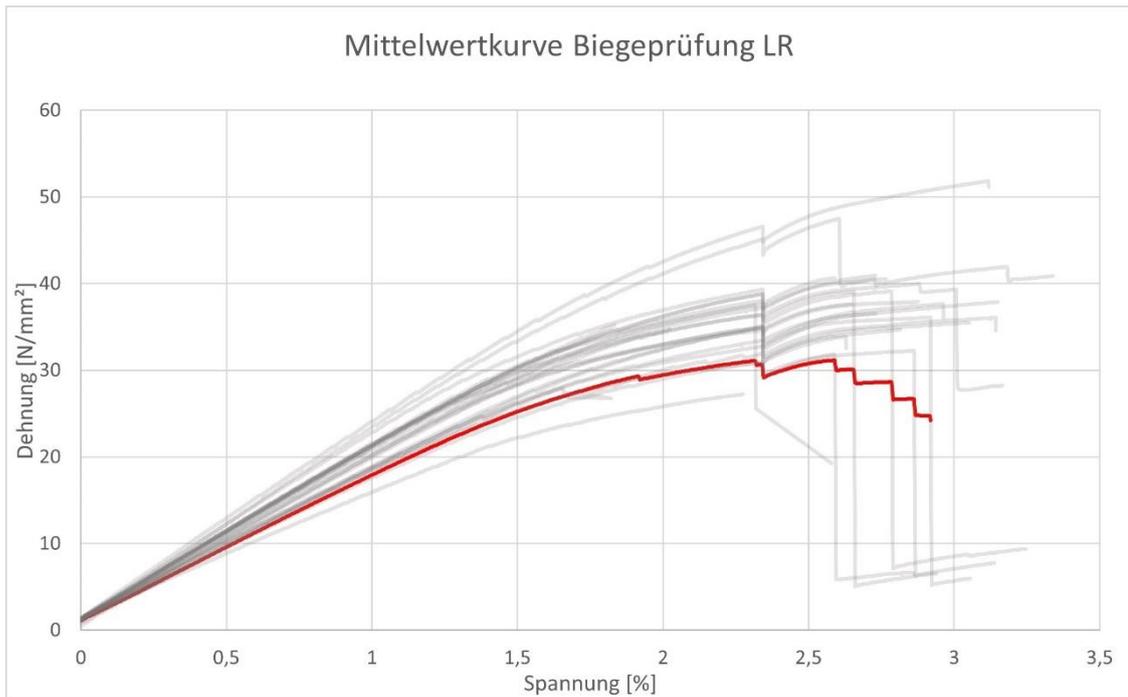
Die Festigkeitswerte sind in Abbildung 28 grafisch abgebildet. Der Boxplot mit der Richtung LT ist leicht höher als die Richtung LR. Somit hat die Orientierung der Faser einen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften bei Biegebelastung.

Von den 5 Ausreißern sind die Punkte mit den Nummern 49, 52 und 52 dem Individuum 8 zugehörig. Die beiden anderen Ausreißer 33 und 15 gehören zu zwei unterschiedlichen Individuen. Der niedrige CV aus Tabelle 8 spiegelt sich auch in dem geringen Abstand der Whisker in den Boxplots wider.



**Abbildung 28: Biegefestigkeit Richtung LR (n=45) und TL (n=48)**

Für die Biegefestigkeit wurde in Abbildung 29 die berechnete Mittelwertkurve grafisch dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden die in den Prüfungen erhobenen Kurven ebenfalls in der Abbildung miteingefügt.

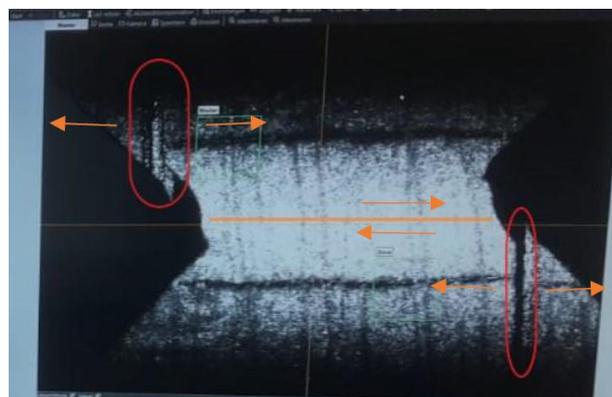


**Abbildung 29: Mittelwertkurve Biegefestigkeit Richtung LR (n=24)**

#### 4.3.4 Scherfestigkeit

Die Schubfestigkeit teilt sich auf in Längsschub (LR und LT), Abscheren (RL und TL) sowie Rollschub (RT und TR).

Die höchsten Werte weist das Abscheren auf, gefolgt von dem Längsschub, und die niedrigsten Festigkeits-Werte hat der Rollschub (Tabelle 9). Allerdings spiegelt der Abscher-Wert nicht den wahren Wert wider. Bedingt durch den holz-anatomischen Aufbau, reißt das Holz während der Prüfung längs der Faser, und es kommt nicht zu dem gewünschten Abscheren. In Abbildung 30 ist erkennbar, wie das Holz in den roten Umrandungen reißt. Die korrekte Scherfestigkeit würde dadurch beschrieben werden, wenn es zu einem Material Versagen entlang der gesamten orangenen Linie käme.

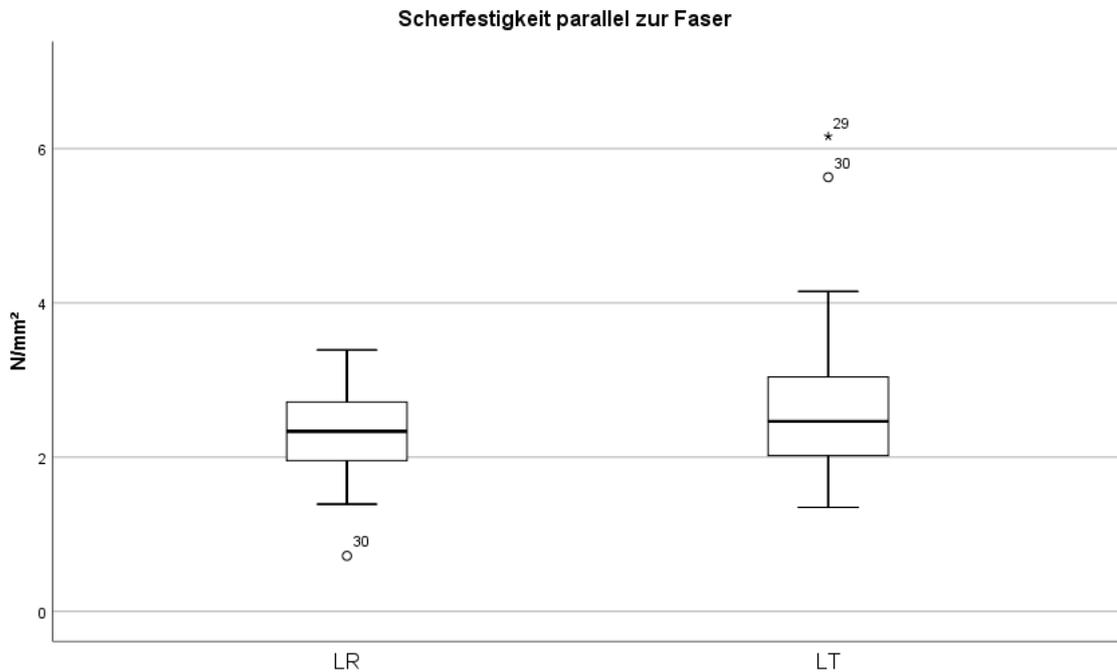


**Abbildung 30: Scherverhalten Abscheren**

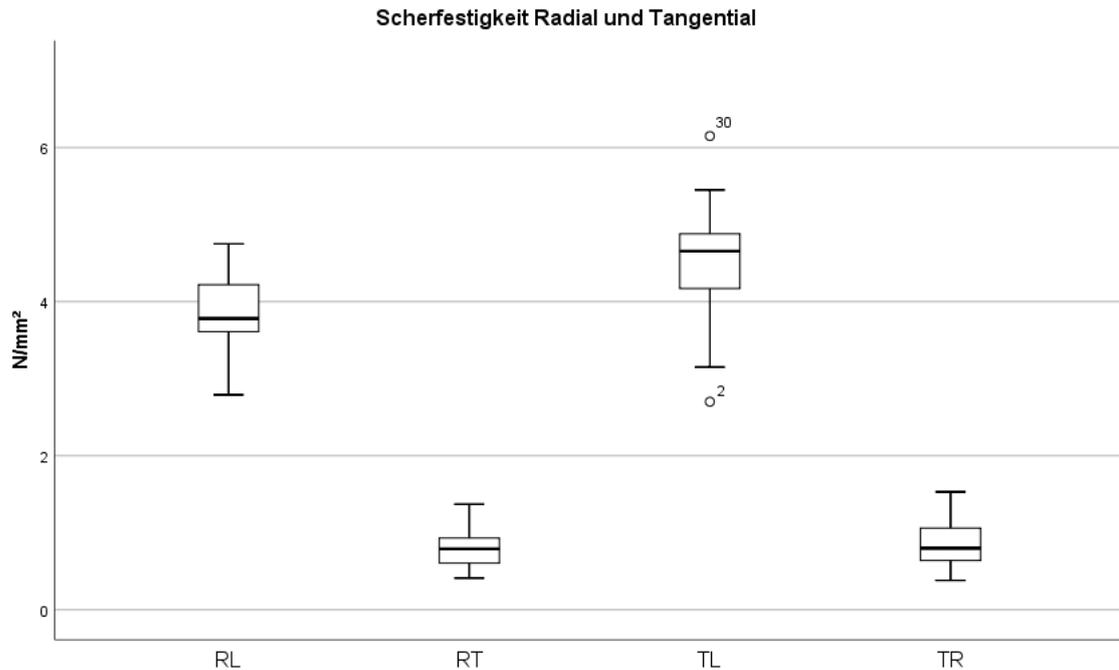
**Tabelle 9: Scherfestigkeit Mittel- und CV-Wert**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV										
	[N/mm <sup>2</sup> ]	%										
1	2,36	13,6	2,44	39,4	3,48	18,7	1,02	22,1	3,23	17,8	1,18	29,2
2	2,06	13,4	1,81	31,4	3,59	1,4	0,53	22,5	4,09	6,2	0,52	20,7
3	2,00	4,8	2,46	6,8	4,23	2,9	0,84	9,3	4,62	20,6	0,88	32,0
4	2,68	11,4	2,01	19,9	3,96	6,6	0,99	12,2	4,55	6,1	1,05	8,2
5	2,16	36,7	2,34	49,3	3,83	2,8	0,73	27,7	4,57	8,0	0,78	3,0
6	2,69	19,3	3,03	0,8	4,07	14,5	0,74	12,9	4,53	7,8	0,76	14,4
7	2,90	15,9	2,24	19,4	4,50	1,4	1,01	36,7	5,17	3,0	1,15	13,7
8	1,68	53,3	5,31	19,6	3,49	7,7	0,54	1,1	5,24	15,1	0,44	14,7
Ge- samt	2,31	25,8	2,70	44,8	3,89	11,6	0,80	30,5	4,50	16,7	0,85	35,8

Die in Abbildung 31 und 32 dargestellten Ausreißer sind alle, bis auf Nummer 2, Individuum 8 zugehörig.

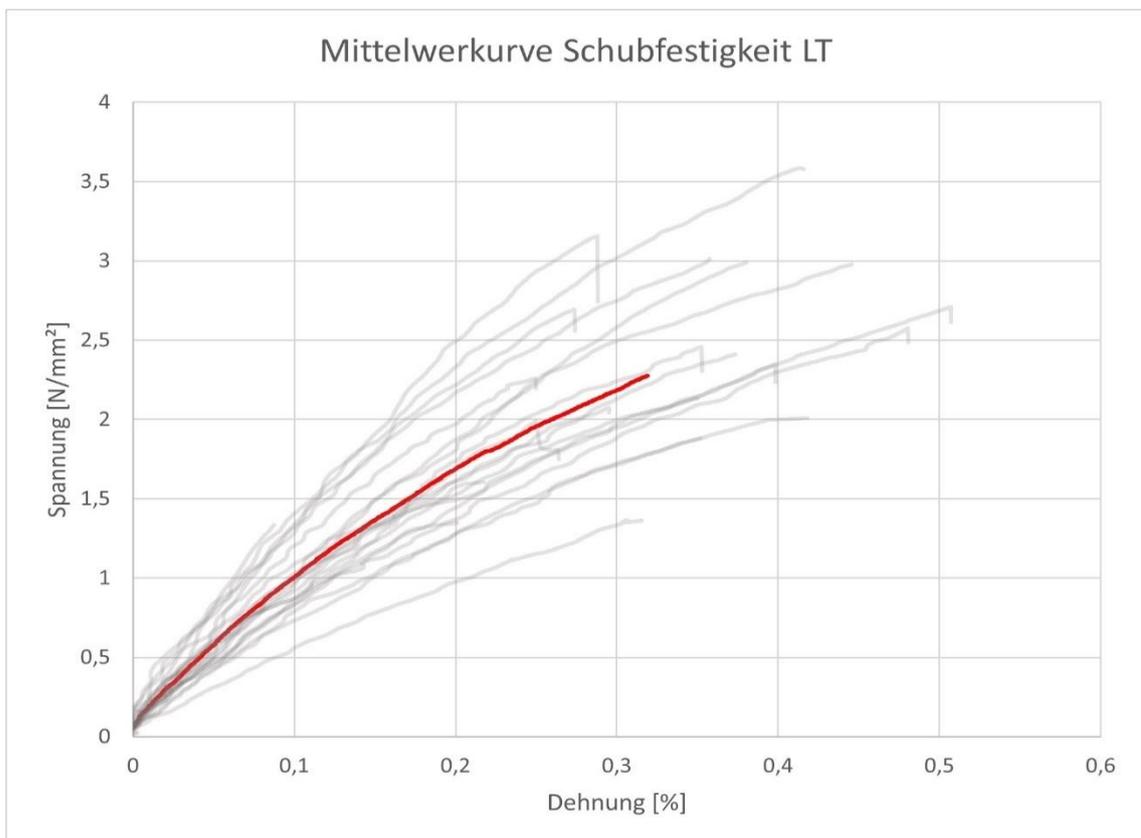


**Abbildung 31: Scherfestigkeit Längsschub LR (n=26), LT (n=25)**



**Abbildung 32: Scherfestigkeit Abscheren RL (n=24), TL (n=24), Rollschub RT (n=24), TR (n=24)**

In Abbildung 33 wurde beispielhaft für die Richtung LT die berechnete Mittelwertkurve (rote Linie) über die erhobenen Kurven (graue Linien) gelegt. Die in der Mittelwertkurve berechnete Spannung liegt bei 2,3 N/mm<sup>2</sup>. Diese Berechnung weicht von dem in Tabelle 9 berechneten Mittelwert von 2,7 N/mm<sup>2</sup> ab.



**Abbildung 33: Mittelwertkurve Schubfestigkeit Richtung LT (n=21)**

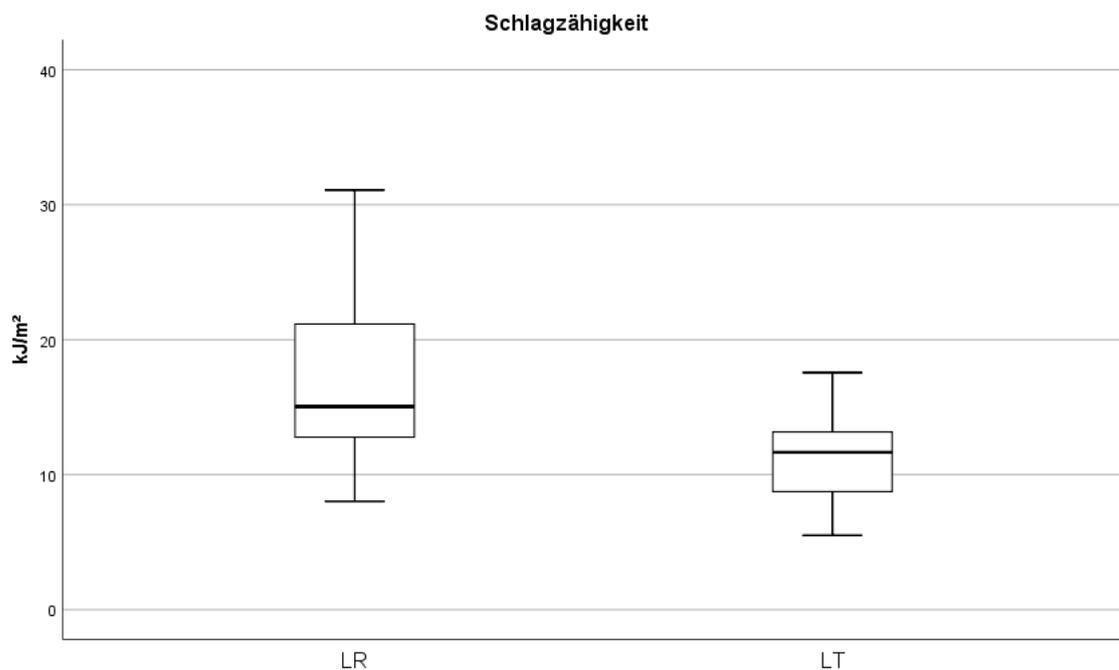
#### 4.3.5 Bruchschlagarbeit

Gesamt betrachtet, weist Richtung LT niedrigere Werte auf. Auch gibt es eine sehr geringe Streuung, was aus dem niedrigen CV-Wert hervor geht (Tabelle 10).

**Tabelle 10: Bruchschlagarbeit Mittelwert und CV**

Richtung	LR			LT		
	n	$\bar{x}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	CV %	n	$\bar{x}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	CV %
Individuum						
1	3	15,21	7,2	3	9,56	2,6
2	3	14,34	4,0	3	7,51	1,3
3	3	16,64	4,8	3	12,93	4,4
4	3	15,44	6,2	3	12,85	1,4
5	3	15,84	3,7	3	12,09	3,2
6	3	12,07	3,5	3	8,52	2,7
7	3	17,63	4,2	3	11,70	3,2
8	3	27,81	4,8	3	13,94	1,5
Gesamt	24	16,87	6,1	24	11,14	3,2

Erkennbar durch die Länge der Whisker und die Größe der Box in Abbildung 34, liegt in Richtung LR eine größere Streuung der Werte vor. Jedoch sticht kein Extremwert hervor.



**Abbildung 34: Schlagzähigkeit LR (n=24), LT (n=24)**

## 4.4 E-Modul

Der E-Modul wurde für die Zug-, Druck- und Biegeprüfung ermittelt.

### 4.4.1 Zug E-Modul

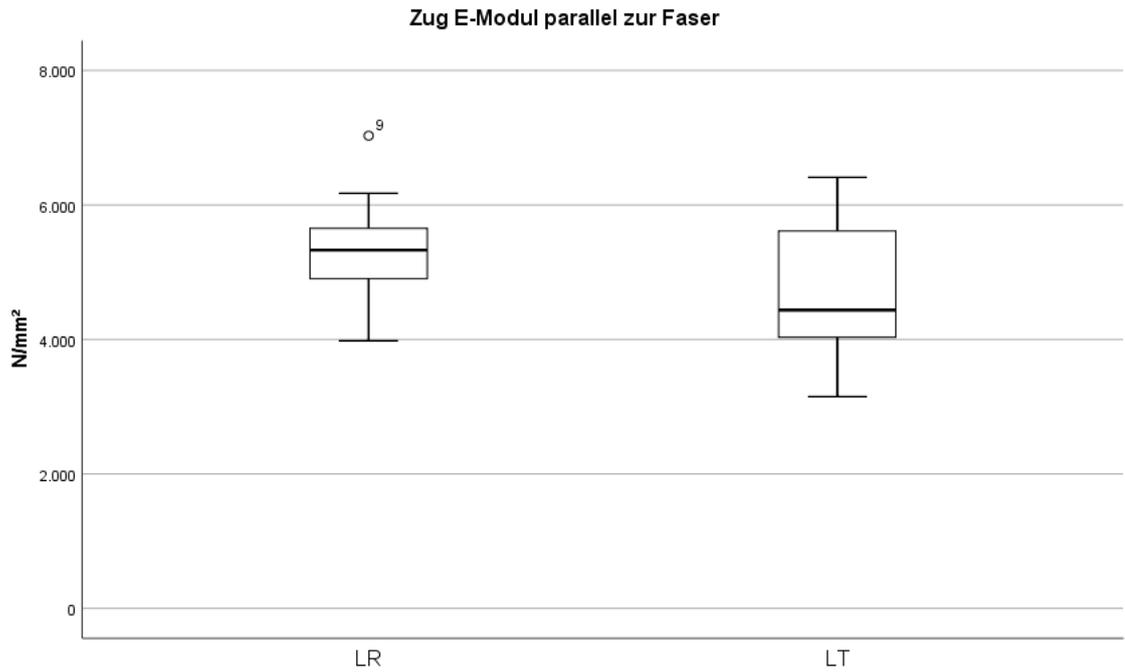
Je größer der Wert, desto spröder ist das Material. Die höchsten Werte wurden parallel zur Faser gemessen (LR und LT). In der radialen Richtung sind die Werte etwas mehr als doppelt so hoch wie in tangentialer Richtung. Im Schnitt ist der CV gering. Nur vereinzelt steigt er innerhalb der Individuen über 20% (Tabelle 11)

**Tabelle 11: Zug E-Modul Mittelwert und CV**

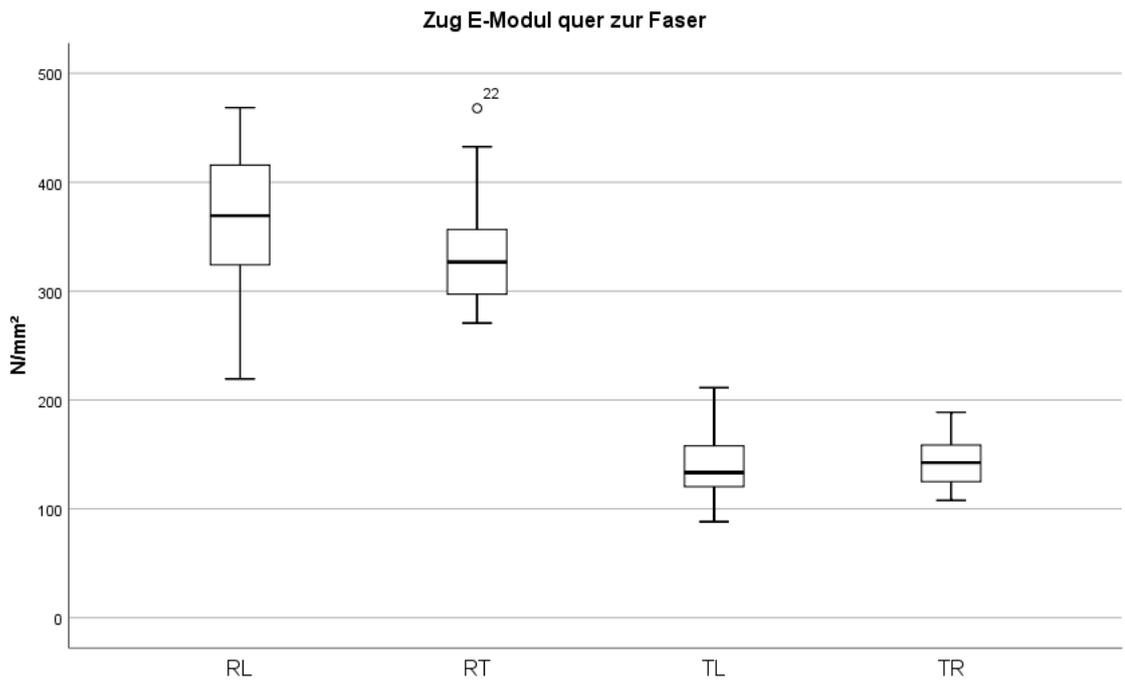
Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
	[MPa]	%	[MPa]	%	[MPa]	%	[MPa]	%	[MPa]	%	[MPa]	%
1	5514,14	9,6	5508,81	9,4	411,98	8,69	358,67	10,45	134,80	3,90	147,89	20,83
2	5819,85	1,3	4106,18	7,5	334,87	15,92	305,92	5,89	110,31	21,86	120,40	7,37
3	5961,60	12,7	4434,83	23,6	346,14	6,65	379,46	12,56	121,71	5,26	144,53	1,35
4	5051,11	6,3	5171,69	17,1	342,93	4,04	293,96	2,94	162,79	2,95	110,52	2,44
5	4988,40	15,3	4453,33	10,9	247,44	9,91	305,18	5,83	120,70	8,55	141,28	0,79
6	4972,33	9,4	4747,11	14,3	403,06	4,81	399,18	15,05	181,61	18,37	177,16	5,88
7	5158,40	8,5	3572,41	1,6	454,00	3,89	306,32	11,77	155,17	31,60	159,82	3,27
8	5213,46	8,6	6023,20	6,0	255,56	5,54	/	/	204,09	9,63	159,91	3,91
Gesamt	5313,83	12,3	4752,20	20,7	349,50	21,0	335,53	15,1	148,90	25,1	145,19	15,9

Von Individuum 8 waren die Festigkeiten in RT so gering (siehe Tabelle 6), dass es keinen linearen Bereich in der Hooke'schen Geraden gab, in der der E-Modul hätte ermittelt werden können. Auch in den anderen Richtungen weist Individuum 8 höchst- bzw. niedrigste Werte auf.

Mit lediglich 2 Ausreißern von zwei unterschiedlichen Individuen, in Abbildung 35 und 36, sind die gemessenen Werte nah beieinander. Einzig Richtung RL weist einen etwas höheren Interquartilabstand auf. Auch die Mittelwerte innerhalb der Richtungen sind etwa auf gleicher Höhe.



**Abbildung 35: Zug E-Modul parallel zur Faser, LR (n=23), LT (n=24)**



**Abbildung 36: Zug E-Modul quer zur Faser, RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24)**

#### 4.4.2 Druck E-Modul

Dass die Werte von Individuum 8 in den Richtungen RL und RT nicht repräsentativ sind, wird in Tabelle 12 deutlich. Die hier gemessenen Werte wurden nicht in die Gesamt-Bewertung mit einbezogen, da offensichtlich ist, dass etwas mit dem Holz nicht in Ordnung war.

**Tabelle 12: Druck E-Modul Mittelwert und CV**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$ [MPa]	CV %										
1	4616,37	8,4	4450,80	23,6	291,66	8,3	303,48	11,3	131,26	12,4	128,26	12,7
2	4819,95	7,1	3575,63	5,8	254,65	12,7	247,63	7,1	106,57	2,4	104,42	9,3
3	3873,66	9,8	4065,17	11,8	370,31	23,3	276,93	27,5	134,17	16,3	135,66	10,8
4	5250,22	3,3	5005,32	9,6	243,97	7,6	264,71	8,4	111,23	12,2	115,96	9,4
5	5414,60	20,3	4720,97	15,2	244,99	15,0	283,88	13,8	128,27	14,1	130,81	12,4
6	4562,57	11,8	4394,79	22,1	258,06	10,6	250,62	19,3	135,87	14,6	143,08	10,8
7	5827,52	10,9	5000,77	27,2	245,45	13,0	247,54	13,0	151,62	5,4	154,50	2,2
8	5106,38	7,9	5101,69	13,6	4,50	2,05	45,96	426,24	145,49	5,5	147,15	6,1
Gesamt	4933,91	15,0	4539,39	18,8	272,73	20,6	267,83	15,3	130,56	14,8	132,48	14,3

Auffällig ist der hohe Wert der Richtung RL von Individuum 3. Die erhobenen Werte der anderen Individuen sind < 300 MPa. Dass es sich hierbei um Ausreißer handelt, wird in Abbildung 38 ersichtlich. Die unteren Ausreißer in derselben Abbildung sind die bereits erwähnten von Individuum 8. Abbildung 37 hingegen weist weder Ausreißer noch weitere Auffälligkeiten auf.



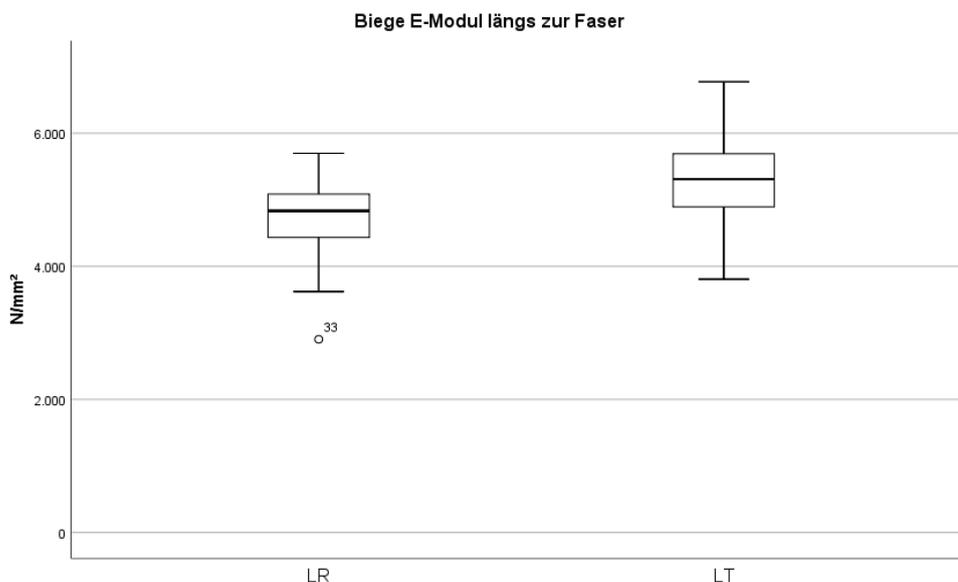
#### 4.4.3 Biege E-Modul

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, weist Richtung LT höhere Gesamt-Werte auf. Der Variationskoeffizient variiert stark zwischen den Individuen. Insbesondere in der Richtung LT bei Individuum 6 mit einer sehr geringen Streuung von 2,43% und Individuum 7 variiert mit rund 18% stark. Gesamt betrachtet ist im Mittel der CV in den Richtungen LR und LT nah beieinander.

**Tabelle 13: Biege E-Modul Mittelwert und CV**

Individuum	LR		LT	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
	[MPa]	%	[MPa]	%
1	4517,53	10,9	4517,53	11,64
2	4926,70	8,3	4926,70	10,78
3	4696,47	12,0	4696,47	14,34
4	4718,62	8,9	4718,62	6,80
5	4287,33	17,6	4287,33	12,29
6	4657,12	15,0	4657,12	2,43
7	4778,20	5,9	4778,20	18,07
8	5284,63	8,7	5284,63	10,60
Gesamt	4703,24	12,6	5170,60	13,1

In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass es lediglich einen Ausreißer gibt. Dieser ist dem Individuum 5 zuzuordnen. Ansonsten sind keine weiteren Auffälligkeiten erkennbar.



**Abbildung 39: Boxplot Biege E-Modul LR (n=45), LT (n=48)**

## 4.5 Schubmodul

In Tabelle 14 sind die Mittel- und CV-Werte der Schubmoduln zusammengefasst. Während der Längsschub-Wert LR beinahe doppelt so hoch ist wie LT, variiert der Mittelwert innerhalb Rollschub (RT und TR) und Abscheren (RL und TL) nicht so stark. Und auch innerhalb der Individuen der Richtung LR gibt es deutliche Unterschiede. Diese Streuung spiegelt der hohe CV-Wert im Gesamten wider.

Weiterhin auffällig ist Individuum 3, welches in der Richtung LR einen sehr hohen CV-Wert hat, in der Richtung RT jedoch kaum streut.

Ansonsten sind die Daten durch starke Streuungen charakterisiert, sodass sich nicht auf ein Individuum schließen lässt, ob es immer die höchsten oder niedrigsten Werte aufweist.

**Tabelle 14: Schubmodul Mittel- und CV-Wert**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV										
	[MPa]	%										
1	222,60	20,3	134,57	29,6	270,89	64,0	24,79	30,2	226,24	67,4	23,54	27,4
2	96,66	13,2	73,77	22,4	261,97	39,2	17,15	24,0	153,84	16,6	25,45	33,3
3	247,41	75,1	98,44	31,6	264,97	37,3	16,10	8,4	215,44	13,0	25,18	14,9
4	118,90	48,6	79,91	27,8	224,85	49,3	24,88	17,7	217,54	29,6	34,68	8,4
5	173,58	58,6	77,21	47,2	272,38	61,4	18,80	18,2	217,93	26,8	21,29	10,8
6	168,28	35,1	120,19	21,5	206,94	20,6	21,61	12,1	229,51	24,0	17,27	10,1
7	173,76	35,5	65,96	17,1	246,84	50,2	25,01	16,4	220,47	39,2	30,86	9,5
8	167,10	47,2	132,68	21,2	196,14	20,2	19,67	10,6	237,19	41,9	23,44	31,7
Gesamt	169,13	55,7	96,88	37,7	243,12	45,9	21,50	24,5	214,77	36,6	25,53	26,6

Die Unregelmäßigkeiten der Daten werden auch in Abbildung 40 und 41 erkennbar. Bis auf die Richtungen LT und TR gibt es ansonsten mind. 2 Ausreißer. Insgesamt lässt sich jedoch sagen, dass die Boxen der jeweils zueinander gehörigen Schubmoduln auf einer Höhe sind.

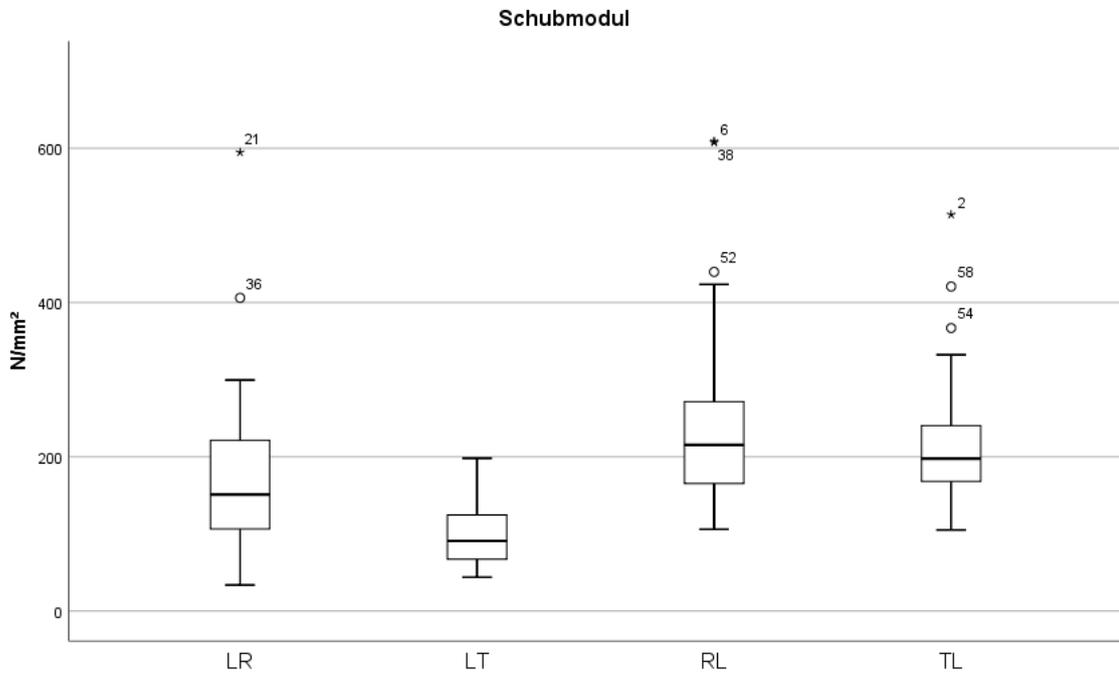


Abbildung 40: Längsschub LR (n=26), LT (n=25) und Abscheren RL (n=24), TL (n=24)

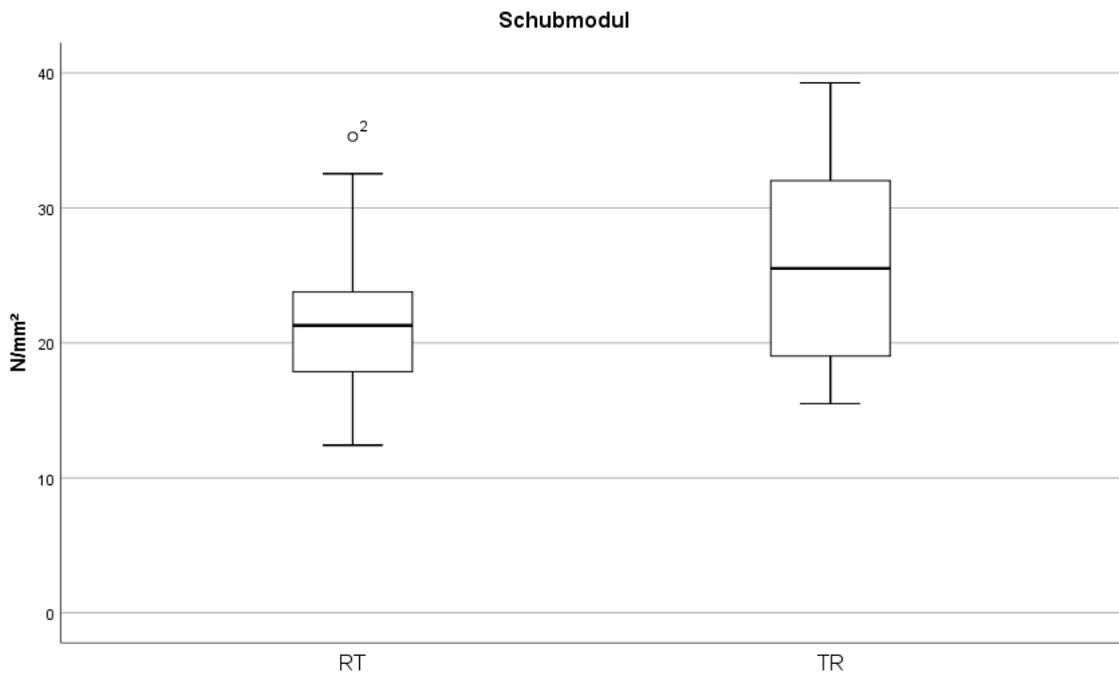


Abbildung 41: Rollschub RT (n=24), TR (n=24)

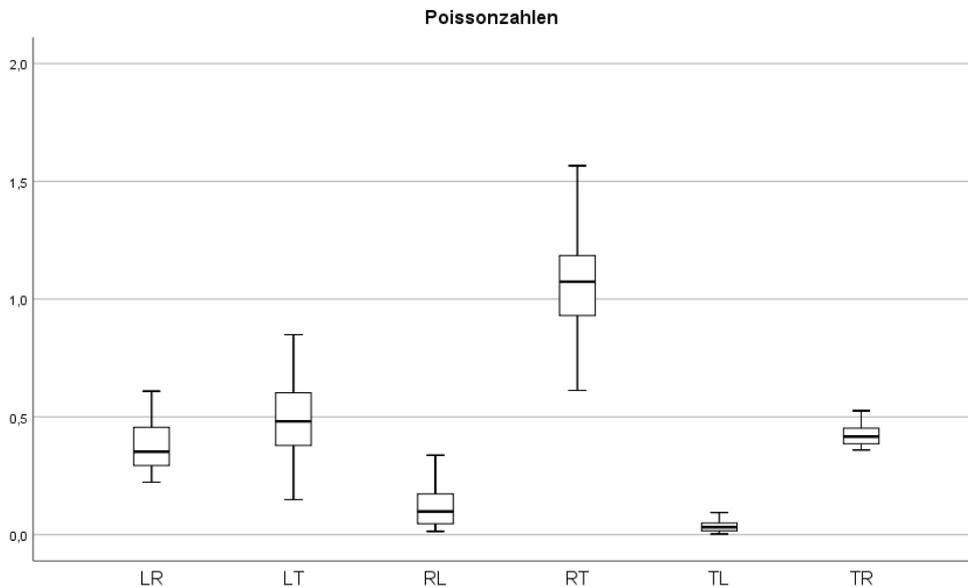
## 4.6 Poissonzahlen

Die Ergebnisse der Poissonzahlen-Messung sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Insgesamt fällt auf, dass es eine starke Streuung gibt. Besonders die Richtung TL sticht hier hervor. In der Richtung RT war es bei Individuum 8 nicht möglich, eine Messung durchzuführen. Die Prüfkörper waren für diese Messung zu fragil.

**Tabelle 15: Poissonzahlen Mittelwert und CV-Wert**

Individuum	LR		LT		RL		RT		TL		TR	
	$\bar{x}$	CV										
		%		%		%		%		%		%
1	0,48	11,94	0,55	22,09	0,09	71,59	1,09	16,00	0,02	47,05	0,45	10,56
2	0,43	26,27	0,60	10,38	0,12	51,48	1,25	16,93	0,03	53,62	0,43	10,85
3	0,40	22,54	0,51	38,45	0,13	74,66	1,01	11,27	0,05	36,05	0,44	8,66
4	0,33	17,97	0,44	47,37	0,08	59,38	1,26	18,28	0,04	62,60	0,40	5,80
5	0,26	31,97	0,40	10,17	0,09	58,00	0,85	19,22	0,04	63,48	0,44	10,55
6	0,29	22,69	0,51	14,02	0,13	52,60	0,99	13,42	0,05	59,08	0,42	13,01
7	0,37	21,79	0,41	50,62	0,10	73,77	1,09	18,22	0,03	76,06	0,39	12,27
8	0,41	47,02	0,58	46,77	0,11	49,55	/	/	0,07	68,04	0,52	22,25
Gesamt	0,37	32,41	0,50	35,18	0,11	62,55	1,07	20,15	0,04	72,54	0,44	15,30

Bei den Boxplots, dargestellt in Abbildung 42, wird die Grafik etwas verzerrt, da die Richtung RT sich in einem weitaus höheren Wertebereich befindet als z.B. die Richtung TL. Zudem weist die Abbildung ein sehr inhomogenes Bild auf.



**Abbildung 42: Poissonzahlen**

## 5 Diskussion

Im Nachfolgenden werden die erhobenen Daten diskutiert und mit Werten aus der Literatur verglichen, um deren Aussagekraft und Richtigkeit zu überprüfen.

### 5.1 Plausibilitätsprüfung der erhobenen Daten

Bereits während der Herstellung der Prüfkörper fiel das Individuum 8 mit Verfärbungen des Holzes auf. Zudem waren bei diesem Individuum die Prüfungen zum Teil nicht möglich, da das Holz so geringe Festigkeiten aufwies, dass bereits das Einspannen in die Prüfmaschine zu einem Materialversagen führte. Insbesondere bei dem Schubversuch wirkte das hohe Eigengewicht der Einspannwerkzeuge auf die Proben, sodass es hier oftmals, auch bei anderen Individuen, vorzeitig zu einem Bruch des Prüfkörpers kam. Zudem wurde in den Ergebnissen deutlich, dass Individuum 8 oftmals die niedrigsten, aber andererseits auch die höchsten Werte aufwies. Es kann somit angenommen, dass Individuum 8 teilweise durch Pilzbefall angegriffen wurde. Der beginnende Abbau von Holzsubstanz würde erklären, warum bei diesem Individuum stark schwankende Werte beobachtet wurden. Somit wurde bei Individuum 8 auch bei der Erstellung der Mittelwertkurven genauestens geprüft, ob die Werte den Werten des restlichen Probenkollektivs entsprachen und wenn nicht, wurden sie ausgeschlossen, um ein Verzerrern der Ergebnisse zu vermeiden.

Obwohl mit höherer Dichte auch die Festigkeit steigt, konnte jedoch nicht beobachtet werden, dass Individuum 4, mit der zweithöchsten Dichte nach Individuum 8, durchgängig die höchsten Festigkeitswerte aufwies. Gründe hierfür sind, dass die Dichte zwischen den Individuen nicht zu groß und auf natürlich gegebene Schwankungen zurückzuführen ist. Hinzu kommt, dass die *Paulownia* sehr schnellwüchsig ist, breite Jahrringe ausbildet und somit einen hohen Anteil an Frühholz besitzt. Bei untersuchten Holzarten ist die Raumdichte von Spätholz 2-3 mal so hoch wie das von Frühholz (Bosshard 1984, S. 195). Somit hat das Verhältnis zwischen Früh- und Spätholz ebenfalls einen Einfluss sowohl auf die Dichte als auch auf die Festigkeit. Solange die Schwankungen jedoch im Rahmen liegen, ist dies im natürlichen Verhalten von Holz begründet. So werden für fehlerfreies Holz üblicherweise folgende Variationskoeffizienten ( $v$ ) beobachtet ((Niemz und Sonderegger 2017, S. 339) und (Wagenführ und Scholz 2018, S. 76)):

- Zugbelastung:  $v = 20\%$
- Rohdichte:  $v = 10\%$
- Biegefestigkeit  $v = 16\%$ ,
- E-Modul:  $v = 22\%$ ,
- Bruchschlagarbeit:  $v = 30\%$

Zur Einordnung der erhobenen Daten wurde in Tabelle 16 der Variationskoeffizient den Literaturwerten gegenübergestellt. Die größte Abweichung ist bei der Zugfestigkeit in den Richtungen LR, TL und RL zu erkennen. Auch bei der Druckfestigkeit liegen die Werte von TL und TR deutlich höher als in der Literatur angegeben. Ansonsten liegen die gefundenen Werte dieser Arbeit in einem vergleichbaren Bereich. Des Weiteren fällt auf, dass für die Bruchschlagarbeit in der Literatur ein Variationskoeffizient von 30% angegeben wird (Wagenführ und Scholz 2018). In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch hinsichtlich dieses Parameters eine deutlich geringere Schwankungsbreite von gerade einmal 6,1% bzw. 3,2% beobachtet.

Die Rohdichte liegt mit  $\rho = 12,9\%$  etwas über dem von (Wagenführ und Scholz 2018, S. 76)): angegebenen CV-Wert von 10%.

**Tabelle 16: Variationskoeffizient Literatur und erhobene Daten**

Prüfung	Literatur	Erhobene Werte					
		LR	LT	TR	TL	RL	RT
	$v$	$v$	$v$	$v$	$v$	$v$	$v$
Festigkeit: Zug	20	26,3	23,7	17,7	33,6	37,1	15,4
Festigkeit: Druck	18	13,9	17,2	25,8	27,5	11,2	11,9
Festigkeit: Biege	16	15,8	15,0				
Bruchschlagarbeit:	30	6,1	3,2				
E-Modul: Zug	20	12,3	20,7	21,0	15,1	25,1	15,9
E-Modul: Druck	20	15,0	18,8	20,6	15,3	14,8	14,3
E-Modul: Biege	20	12,6	13,1				

## 5.2 Einordnung der gemessenen Festigkeitswerte mit Literatur Angaben

Im Vergleich mit den Werten aus der Literatur (Tabelle 17), liegen die Dichte- und Festigkeitswerte innerhalb der höchsten und niedrigsten Werte. Somit ist bei erster Betrachtung erkennbar, dass die in dieser Arbeit erhobenen Daten plausibel sind und keine systematischen Messfehler anzunehmen sind. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die erhobenen Werte trotz einer im Vergleich geringen Dichte, höhere Festigkeitswerte, als z.B. Koman et al. (2017) in ihrer Arbeit gemessen haben, aufweisen.

Ein genauer Vergleich ist kaum möglich, da keine Arbeit ausreichend detaillierte Werte erhoben hat. Die Literatur-Werte beschränken sich oftmals auf die Längsrichtung, und auch wird dort nicht zwischen den Richtungen LR und LT unterschieden.

**Tabelle 17: Festigkeitswerte im Vergleich zu Literatur Angaben**

Quelle	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Festigkeit				
		Zug [MPa]	Druck [MPa]	Biege [MPa]	Scher [MPa]	Schlag- biege [kJ/m <sup>2</sup> ]
Komand und Fehrer 2020	215		L: 19,9	L: 32,3	R: 4,1	
Koman et al. 2017	275	L: 33,23	L: 22,14	L: 41,5		L: 15,9
Kaymakci et al. 2013			L: 35,56	L: 35,8		L: 25
Kiaei 2011	261			L:41,1		
Müller und Stingl 2019	200	L: 34,40	L:19,57 Quer:1,84	L: 30,5	R: 5,57	L: 11,18
Frank und Voigt 2020		L: 36,12 bis 40,6		L: 32		
Erhobene Werte	221,52	L: 37,58 R: 2,6 T: 2,59	L: 24,61 R: 1,56 T: 1,81	L: 38	L: 2,51 R: 4,2 T: 0,83	LR: 16,87 LT: 11,14

Des Weiteren war auffällig, dass es bei der Druckfestigkeits-Prüfung in Längs Richtung zu einer Zerstörung der Fasern kam (Abbildung 43 rechts), wohingegen quer zur Faser die Proben nach der Komprimierung von 50 mm auf 25 mm, bedingt durch die Jahrringe, nur leicht ausknickten (Abbildung 43 links). Außerdem waren die Proben quer zur Faser noch so weit intakt, dass sie nach der Prüfung von den komprimierten 25 mm wie ein Schwamm auf über 30 mm zurückfeder-ten.



**Abbildung 43: Nach der Prüfung quer (links) und längs (rechts) zur Faser**

### 5.3 Einordnung der gemessenen Elastizitätswerte mit Literatur Angaben

Wie aus Tabelle 18 hervorgeht, gibt es kaum Daten zum E-Modul in der Literatur. Bis auf Müller und Stingel (2019), welche zusätzlich den Zug E-Modul ermittelt haben, wurde in den vorliegenden Publikationen nur der Biege E-Modul bestimmt. Zum Druck E-Modul konnten keine Werte gefunden werden. Es wird ersichtlich, dass die in dieser Arbeit erhobenen Daten etwa 15 bis 20% über den Werten aus der Literatur liegen.

**Tabelle 18: E-Modul**

Quelle	Zug	Druck	Biege
Koman und Fehrer 2020			3800
Koman et al 2017			3492
Kaymakci et al. 2013			3883
Kiaei 2011			3740
Müller und Stingl 2019	4115		4080
Erhobene Werte	L: 5033,015 R: 342,515 T: 147,045	L: 4736,65 R: 270,28 T: 131,52	LR: 4703,24 LT: 5170,60

Zu den Poissonzahlen konnten keine Literatur Werte zur *Paulownia* gefunden werden. Um eine ungefähre Einordnung zu ermöglichen, wurden in Tabelle 19 die Werte von Laub- und Nadelhölzern aus Bodig und Jayne (1993) den Querkontraktionszahlen der *Paulownia* gegenübergestellt. Die größte Abweichung besteht in der Richtung RT, wo der *Paulownia* Wert um 0,4 höher liegt als für Laubholz üblich. Und auch die Richtung RL ist ca. doppelt so hoch wie die Literatur Angabe. Ansonsten stimmen die Werte mit leichten Abweichungen überein. Zu beachten ist, dass sich die in Bodig und Jayne (1993) angegebenen Werte auf Baumarten mit deutlich höherer Dichte beziehen. Die Abweichungen könnten daher auf die unterschiedliche Holzanatomie und deutlich geringere Dichtewerte zurückgeführt werden.

**Tabelle 19: Poissonzahlen**

Poissonzahl	Erhobene Werte	Laubholz	Nadelholz
	<i>Paulownia</i>	Literatur	Literatur
$\mu_{LR}$	0,37	0,37	0,37
$\mu_{LT}$	0,5	0,50	0,42
$\mu_{RL}$	0,11	0,044	0,041
$\mu_{RT}$	1,07	0,67	0,47
$\mu_{TL}$	0,04	0,027	0,033
$\mu_{TR}$	0,44	0,33	0,35

Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen den Literaturwerten und den selbst erhobenen Werten eine gute Übereinstimmung. Teilweise liegen die eigenen Werte darüber. Bei dem untersuchten Probenmaterial ist anzumerken, dass dieses einer speziellen Züchtung der Firma Plantownia entspringt und die Plantage mehrmals im Jahr aufgeastet wird, wodurch die Astigkeit im unteren Stammbereich (und exakt solche Stämme wurden untersucht) vollständig ast- und fehlerfrei ist. Über die Holzqualität der anderen Studien kann hier keine Aussage getroffen werden. Ggf. sind aber die tendenziell höheren Werte durch die bessere Holzqualität des Plantagenmaterials zu erklären.

#### 5.4 Vergleich zwischen Balsa und *Paulownia*

Um einen Vergleich zu einer anderen Baumart zu ziehen, wurde die *Paulownia* mit dem Balsabaum (*Ochroma pyramidale*) verglichen. Bei dem Balsa Holz handelt es sich ebenfalls um eine schnellwachsende Baumart mit einer sehr geringen Dichte.

Borrega und Gibson (2015) haben in ihrer Studie Balsa Prüfkörper mit unterschiedlicher Dichte auf das mechanische Verhalten geprüft. Aus den in der Studie entstandenen Graphiken konnten die jeweiligen Festigkeits- und Elastizitätswerte bei einer Dichte von  $225 \text{ kg/m}^3$  entnommen werden. Diese Dichte wurde gewählt, da der Wert nahe an den in dieser Arbeit gemessenen  $221 \text{ kg/m}^3$  für die *Paulownia* liegt. Allerdings muss beachtet werden, dass zum einen in der Studie von Borrega und Gibson (2015) keine Angabe bzgl. der verwendeten Prüfvorschrift angeführt war, und zum anderen wurden die Prüfkörper vor den Messungen bei  $103^\circ \text{ C}$  für 24 Stunden getrocknet. Hierbei stellt sich eine Holzfeuchte von  $5,8 \pm 1,2\%$  ein. Da der Blauglockenbaum bei einer Holzfeuchte von 12% getestet wurde, und die Holzfeuchte sich wiederum auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, muss dies bei der Interpretation der nachfolgenden Zahlen, in Tabelle 20, berücksichtigt werden. Zudem gilt zu beachten, dass mit steigender Holzfeuchte sowohl die Festigkeits-, als auch elastischen Eigenschaften von Holz sinken.

Da in der Forschungsarbeit von Borrega und Gibson (2015) nur die Bruchlast des Biegeversuchs aufgeführt war, musste der Festigkeits-Wert mit der in Kapitel 1.3.2 aufgeführten Formel (4) berechnet werden. Erst so sind die in dieser Arbeit und die in der Studie aufgeführten Daten vergleichbar.

**Tabelle 20: Vergleich mechanischer Eigenschaften zwischen Balsa- und Blauglockenbaum**

Eigenschaft	Balsa* $\omega = 5,8 \pm 1,2\%$	<i>Paulownia</i> $\omega = 12\%$
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	225	221
Druckfestigkeit [MPa]	L: 23 R: 1,6	L: 24,6 R: 1,6
Biegefestigkeit [MPa]	L: 31,92	L: 38
Scherfestigkeit [MPa]	R: 4,9	R: 4,2
Biege E-Modul [MPa]	L: 4900	L: 4936
Druck E-Modul [MPa]	L: 5500 R: 270	L: 4736 R: 270
Schubmodul [MPa]	310	229

\*Werte nach (Borrega und Gibson 2015)

Aus der Tabelle 20 geht hervor, dass es eine große Überschneidung der jeweils erhobenen Daten gibt. Werden jedoch die zuvor erwähnten Faktoren berücksichtigt, weist die *Paulownia* bei gleicher Dichte höhere Werte auf.

## 6 Schlussfolgerung

Wie anfangs in der Zielstellung definiert, wurde in dieser Arbeit eine umfassende Analyse der *Paulownia* durchgeführt. Die Einordnung der in dieser Arbeit erhobenen Werte mit Literaturangaben zeigte mehrheitlich mit der Literatur übereinstimmende Werte. Teilweise lagen die Werte über den angegebenen Literaturwerten. Ggf. können die höheren Werte auf eine bessere Holzqualität des speziell gezüchteten und behandelten Plantagenholzes zurückzuführen sein. Mit der Arbeit wurden einige Lücken zur Beschreibung von *Paulownia* geschlossen. Ob sich das untersuchte Plantagenmaterial signifikant von anderen Rundholzressourcen unterscheidet, müssen zukünftige Arbeiten klären. Für eine vollständige Beschreibung der Baumart *Paulownia* müssten weitere Forschungen im Bereich der mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden. Für das untersuchte Plantagenmaterial jedoch bietet die vorliegende Arbeit eine ausreichende Grundlage, um mit numerischen Methoden wie der *Finiten Element Methode* Berechnungen durchzuführen. Die Daten dienen auch dazu, mögliche Anwendungen von Plantagen-*Paulownia*, wie zum Beispiel im Holzbau, abzuschätzen.

## **7 Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken die mich bei der Arbeit unterstützt haben. In erster Linie bei Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller, für die kompetente Betreuung der Arbeit. Bei Fragen und Unklarheiten bekam ich immer schnell eine Rückmeldung. Zudem möchte ich mich bei der Firma Plantownia GesbR für die Bereitstellung der Bäume bedanken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ein großes Dankeschön an Peter Halbauer, der mich bei der praktischen Umsetzung im Labor stark unterstützt hat und immer eine Antwort auf meine Fragen hatte. Außerdem möchte ich mich bei allen beteiligten Mitarbeiter\*innen des Instituts für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe für die gute Unterstützung bedanken.

Ganz besonders gilt mein Dank meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und hilfreichen Gespräche.

## **8 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 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

David Moog

## 9 Literaturverzeichnis

Arcan, M.; Hashin, Z.; Voloshin, A. (1978): A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. In: *Experimental Mechanics*, S. 141–146.

Bodig, Jozsef; Jayne, Benjamin A. (1993): Mechanics of wood and wood composites. Reprint ed. with corr. Malabar, Fla.: Krieger.

Borrega, Marc; Gibson, Lorna J. (2015): Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. In: *Mechanics of Materials* 84, S. 75–90. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.01.014.

Bosshard, Hans Heinrich (1984): Holzkunde. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. Aufl.: Birkhäuser Verlag (2).

FAO (2020): Forest product statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2021, zuletzt geprüft am 02.06.2021.

Frank, Jürgen; Voigt, Gerd (2020): Paulownia - Verwendung. Online verfügbar unter <https://paulownia.de/verwendung/>, zuletzt aktualisiert am 26.03.2021, zuletzt geprüft am 30.08.2021.

Gälle, Kathrin (2021): Optische Extensometer. Wer genau hinschaut, sieht mehr. ZwickRoell GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.zwickroell.com/de/news-events/news/beruehrungslos-messende-extensometer/>, zuletzt geprüft am 20.07.2021.

Grosse, Marco; Rautenstrauch, Karl; Schlegel, Roger (2005): Numerische Modellierung von Holz und Verbindungselementen in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. In: *Bautechnik* 82 (6), S. 355–364.

Kalaycioglu, Hulya; Deniz, Ilhan; Hiziroglu, Salim (2005): Some of the properties of particleboard made from paulownia. In: *J Wood Sci* 51 (4), S. 410–414. DOI: 10.1007/s10086-004-0665-8.

Kaymakci, Alperen; Bektas, İbrahim; Bal, Bekir Cihad (2013): Some Mechanical Properties of Paulownia (*Paulownia elongata*) Wood. In: *International Caucasian Forestry Symposium*, S. 917–919.

KIAEI, Majid (2011): Technological properties of Iranian cultivated Paulownia Wood (*Paulownia Fortunei*). Islamic Azad University, Iran. Department of Wood and Paper Science and Technology.

Kirov, Veselin; Shindarska, Zaprianka; Kostadinova, Gergana; Gencheva, Adelina; Hadgiev, Stojan; Penev, Toncho; Baykov, Bayko (2014): Comparative study of new energy crops for the production of biogas. In: *International Journal of current Microbiology and applied sciences* (11), S. 181–188.

Koman, Szabolcs; Fehrer, Sandor; Vityi, Andrea (2017): Physical and mechanical properties of Paulownia Tomentosa wood planted in Hungaria. University of Sopron, Sopron, Hungary. Institute of wood Sciences, institute of forestry and environmental techniques.

Koman, Szabolcs; Feher, Sandor (2020): Physical and mechanical properties of Paulownia clone in vitro 112. In: *Eur. J. Wood Prod.* 78 (2), S. 421–423. DOI: 10.1007/s00107-020-01497-x.

Linkeseder, Florian (2020): Arbeitsanweisung zur Prüfkörperherstellung. Massivholzproben WoodC.A.R., S. 1–18.

Müller, Günter; Groth, Clemens (2007): FEM für Praktiker. Band 1: Grundlagen. 8. Aufl.: expert Verlag.

Müller, Ulrich; Ringhofer, Andreas; Brandner, Reinhard; Schickhofer, Gerhard (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. In: *Wood Sci Technol* 49 (6), S. 1123–1136. DOI: 10.1007/s00226-015-0755-3.

Müller, Ulrich; Stingl, Robert (2019): Die Paulownia. Eigenschaften des Blauglockenbaums. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe.

NCBI (2020): Lifemap ncbi. National Center for Biotechnology Information. Online verfügbar unter <http://lifemap-ncbi.univ-lyon1.fr/>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2020, zuletzt geprüft am 31.05.2021.

Nelis, Philipp A.; Michaelis, Franz; Krause, Kim C.; Mai, Carsten (2017): Kiri wood (Paulownia tomentosa): can it improve the performance of particleboards? In: *European Journal of Wood and Wood Products* (Volume 76), S. 445–453. DOI: 10.1007/s00107-017-1222-7.

Niemz, Peter; Baum, Sebastian; Junghans, Kristin; Bächle, F.; Sonderegger, Walter (2006): Holzphysik: (Skript zur Vorlesung). Unter Mitarbeit von Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion Zürich.

Niemz, Peter; Sonderegger, Walter Ulrich (2017): Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Nimmervoll, Stefan (2018): Kaiserbaum für Agroforst. In: *Blick ins Land* (5), S. 34–35. Online verfügbar unter <https://blickinsland.at/ausgaben/052018-blick-ins-land/>, zuletzt geprüft am 31.05.2021.

Pistorius, Johannes (2020): Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter [https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie\\_4.0/2015-04-10\\_Umsetzungsstrategie\\_Industrie\\_4.0\\_Plattform\\_Industrie\\_4.0.pdf](https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie_4.0/2015-04-10_Umsetzungsstrategie_Industrie_4.0_Plattform_Industrie_4.0.pdf).

Rösler, Joachim; Harders, Harald; Bäker, Martin (2012): Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Saenger, Anton (2016): Der Elastizitätsmodul (E-Modul) - Maschinenbau Wissen einfach erklärt! Online verfügbar unter <https://www.precifast.de/elastizitaetsmodul-e-modul/>, zuletzt aktualisiert am 31.01.2021, zuletzt geprüft am 14.06.2021.

Salari, Ayoub; Tabarsa, Taghi; Khazaeian, Abolghasem; Saraeian, Ahmadreza (2013): Improving some of applied properties of oriented strand board (OSB) made from underutilized low quality paulownia (*Paulownia fortunei*) wood employing nano-SiO<sub>2</sub>. In: *Industrial Crops and Products* 42 (2), S. 1–9. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.05.010.

Schneider, Bernd (2018): Calculation of mean curve from experimental data. University of Technology, Graz. Vehicle Safety Institute.

Spirchez, Cosmin; Japalela, Veronica; Lunguleasa, Aurel; Buduroi, Daniel (2021): Analysis of Briquettes and Pellets obtained from two types of Paulownia (*Paulownia tomentosa* and *Paulownia elongata*) sawdust. In: *BioResources* (16 (3)).

Wagenführ, André; Scholz, Frieder (2018): Taschenbuch der Holztechnik. Unter Mitarbeit von Autorenkollektiv. 3. Aufl.: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Zagar, B.; Trummer, B.; Weiß, H.; Anwander, M.; Weiß, B. (2000): Ein schnell messendes Laser-Speckle-Extensometer zur Bestimmung von statischen und dynamischen Materialparametern, 273-278.

Zhao-Hua, Zhu; Ching-Ju, Chao; Xin-yu, Lu; Yao Gao, Xiong (1986): PAULOWNIA IN CHINA: CULTIVATION AND UTILIZATION.

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zug- und Druckfestigkeit verschiedener Holzarten unter Berücksichtigung der Richtungen L, R, T nach (Niemz und Sonderegger 2017, S. 376).....	7
Tabelle 2: DIN-Normen der zu prüfenden Parameter.....	19
Tabelle 3: Softwareeinstellungen der unterschiedlichen Messungen.....	25
Tabelle 4: Test auf Normalverteilung .....	32
Tabelle 5: Darrdichte der jeweiligen Individuen.....	33
Tabelle 6: Zugfestigkeit Mittelwert und CV.....	35
Tabelle 7: Druckfestigkeit Mittel- und CV-Wert.....	37
Tabelle 8: Biegefestigkeit Mittel- und CV-Wert.....	39
Tabelle 9: Scherfestigkeit Mittel- und CV-Wert.....	42
Tabelle 10: Bruchschlagarbeit Mittelwert und CV.....	44
Tabelle 11: Zug E-Modul Mittelwert und CV.....	45
Tabelle 12: Druck E-Modul Mittelwert und CV.....	47
Tabelle 13: Biege E-Modul Mittelwert und CV.....	49
Tabelle 14: Schubmodul Mittel- und CV-Wert.....	50
Tabelle 15: Poissonzahlen Mittelwert und CV-Wert .....	52
Tabelle 16: Variationskoeffizient Literatur und erhobene Daten.....	54
Tabelle 17: Festigkeitswerte im Vergleich zu Literatur Angaben.....	55
Tabelle 18: E-Modul .....	56
Tabelle 19: Poissonzahlen .....	57
Tabelle 20: Vergleich mechanischer Eigenschaften zwischen Balsa- und Blauglockenbaum.....	59

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pflanzen Zellwandaufbau mit Mittellammelle, Primärwand, Sekundärwand (S1-S3), Tertiärwand und Mikrofibrillenwinkel (MFA) (Niemz et al. 2006).....	3
Abbildung 2: Die drei Hauptrichtungen Längs (L), Radial (R) und Tangential (T) mit ihren jeweiligen Bezugsflächen (Niemz und Sonderegger 2017, S. 270).....	5
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und Rohdichte von 103 Baumarten (Niemz und Sonderegger 2017, S. 342) .....	6
Abbildung 4: Normal- und Schubspannungen (nach Niemz und Sonderegger 2017, S. 271).....	8
Abbildung 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Saenger 2016) .....	9
Abbildung 6: Auf einen Körper wirkende Schubspannungen .....	10
Abbildung 7: Querkontraktion eines auf Zug belasteten Körpers (Niemz und Sonderegger 2017, S. 287) .....	11
Abbildung 8: Testergebnisse mehrerer Proben einer Prüfung .....	14
Abbildung 9: Versuchsfläche der Firma Plantownia .....	20
Abbildung 10: Geometrie Prüfkörper parallel zur Faser .....	21
Abbildung 11: Geometrie Prüfkörper quer zur Faser.....	22
Abbildung 12: Prüfkörper quer zur Faser (RT) .....	22
Abbildung 13: Geometrische Daten Arcan-Prüfkörper .....	24
Abbildung 14: Arcan Prüfung .....	26
Abbildung 15: Querkzug Prüfung Poissonzahl.....	26
Abbildung 16: Längszug Prüfung Festigkeit und E-Modul.....	26
Abbildung 17: Druck Prüfung .....	27
Abbildung 18: 3-Punkt Biegeprüfung.....	27
Abbildung 19: Schlagpendel Aufnahme Prüfkörper.....	27
Abbildung 20: Schlagpendel Messeinrichtung und Hammerkopf .....	27
Abbildung 21: Dichteverteilung Individuum 1-8 (n=6), Gesamt (n=48).....	34
Abbildung 22: Boxplot Zugfestigkeit parallel zur Faser, Richtung LR (n=23) und TL (n=24) .....	35
Abbildung 23: Boxplot Zugfestigkeit quer zur Faser, Richtung RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24) .....	36
Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs Diagramm der Zugprüfung longitudinal (n=47).....	36
Abbildung 25: Boxplot Druckfestigkeit parallel zur Faser, Richtung LR (n=24) und TL (n=24) .....	38
Abbildung 26: Boxplot Druckfestigkeit quer zur Faser, Richtung RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24) .....	38

Abbildung 27: Spannungs-Dehnungs Diagramm Druckfestigkeit mit Mittelwertkurve .....	39
Abbildung 28: Biegefestigkeit Richtung LR (n=45) und TL (n=48) .....	40
Abbildung 29: Mittelwertkurve Biegefestigkeit Richtung LR (n=24).....	41
Abbildung 30: Scherverhalten Abscheren .....	41
Abbildung 31: Scherfestigkeit Längsschub LR (n=26), LT (n=25).....	42
Abbildung 32: Scherfestigkeit Abscheren RL (n=24), TL (n=24), Rollschub RT (n=24), TR (n=24) .....	43
Abbildung 33: Mittelwertkurve Schubfestigkeit Richtung LT (n=21) .....	43
Abbildung 34: Schlagzähigkeit LR (n=24), LT (n=24).....	44
Abbildung 35: Zug E-Modul parallel zur Faser, LR (n=23), LT (n=24).....	46
Abbildung 36: Zug E-Modul quer zur Faser, RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24).....	46
Abbildung 37: Druck E-Modul parallel zur Faser, LR (n=24), LT (n=24) .....	48
Abbildung 38: Druck E-Modul quer zur Faser, RL (n=24), RT (n=24), TL (n=24) und TR (n=24).....	48
Abbildung 39: Boxplot Biege E-Modul LR (n=45), LT (n=48) .....	49
Abbildung 40: Längsschub LR (n=26), LT (n=25) und Abscheren RL (n=24), TL (n=24).....	51
Abbildung 41: Rollschub RT (n=24), TR (n=24) .....	51
Abbildung 42: Poissonzahlen .....	52
Abbildung 43: Nach der Prüfung quer (links) und längs (rechts) zur Faser .....	56
Abbildung 44: Diagramm des ersten Trocknungs-Verlaufs .....	69
Abbildung 45: Diagramm des zweiten Trocknungs-Verlaufs.....	69
Abbildung 46: Diagramm des dritten Trocknungs-Verlaufs .....	70

## 12 Anhang

### Trocknungsdaten

Da nicht das gesamte Holz in eine Trocknungskammer gepasst hat, wurde das Holz aufgeteilt und in drei Schritten getrocknet.

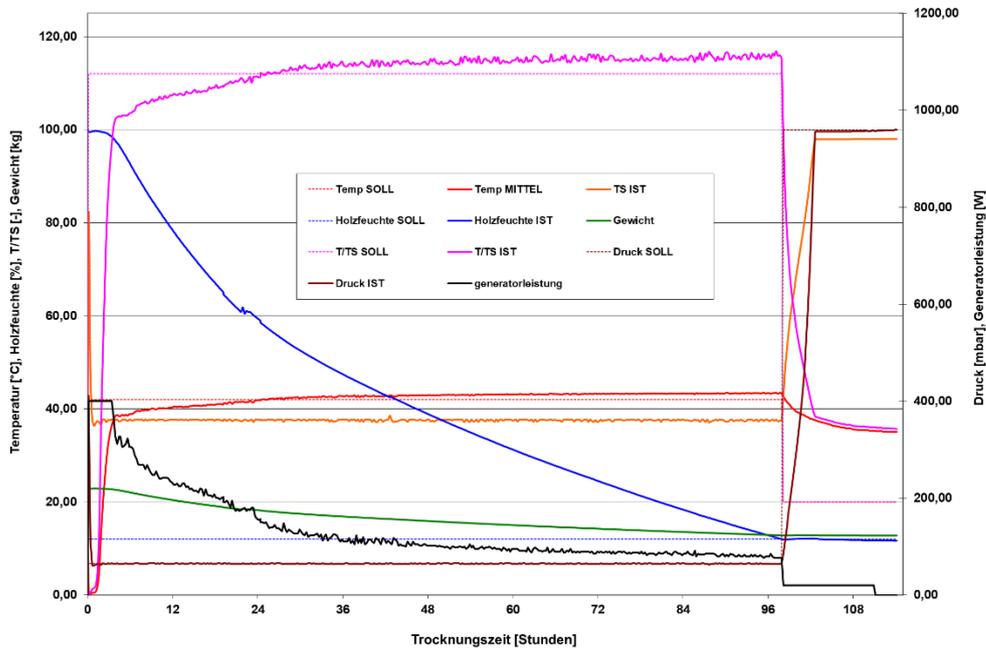


Abbildung 44: Diagramm des ersten Trocknungs-Verlaufs

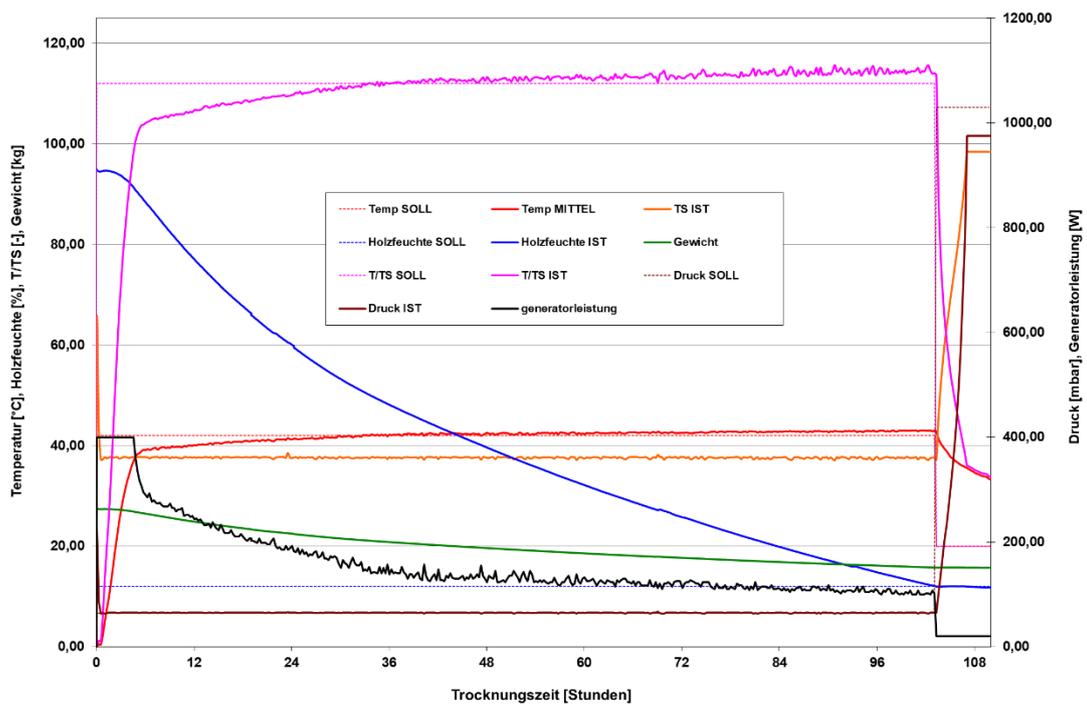


Abbildung 45: Diagramm des zweiten Trocknungs-Verlaufs

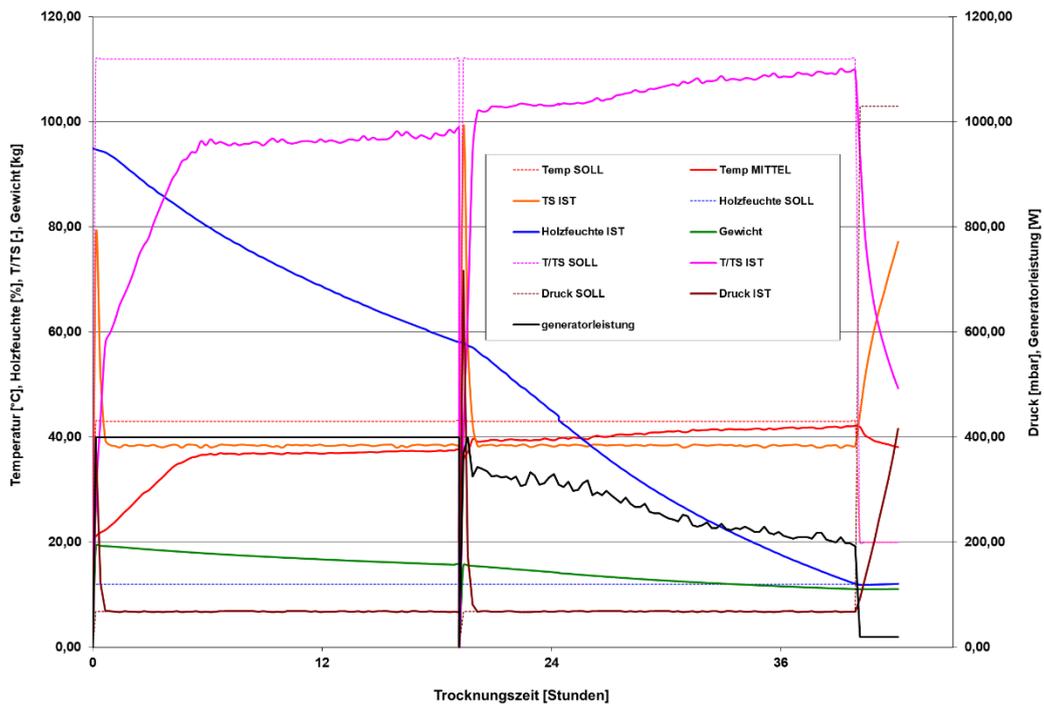


Abbildung 46: Diagramm des dritten Trocknungs-Verlaufs