

# Prüftechnische Bestimmung des orthotropen Elastizitätsverhaltens von Fichtenholz



M-4-09/2018

**Markus Tripolt**

Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



Markus Tripolt, BSc

# **Prüftechnische Bestimmung des orthotropen Elastizitätsverhaltens von Fichtenholz**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer, BSc  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, September 2018

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

Auf diesem Weg möchte ich mich bei all jenen bedanken, die direkt aber auch indirekt zu dieser Masterarbeit beigetragen und mich während meiner Studienzeit unterstützt haben.

Allen voran danke ich Herrn Professor Schickhofer und allen seinen Mitarbeitern des Instituts für Holzbau und Holztechnologie. Durch seine spannenden Vorlesungen und Beiträge ist meine Freude am Holzbau erneut entfacht. Außerdem konnte ich mich in meinen Zeiten als Praktikant und studentische Mitarbeiter am Institut voll entfalten.

Auch meinem Betreuer, Herrn Andreas Ringhofer, möchte ich für dieses spannende Thema und die gute Zusammenarbeit danken. Vor allem weil du, lieber Andreas, mich schon durch meine Bachelorarbeit begleitet hast und meine erste Ansprechperson am Institut gewesen bist. Tulln wird in ewiger Erinnerung bleiben.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn Priv.-Doz. Müller vom Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe der Universität für Bodenkultur Wien und seinen Mitarbeitern bedanken. Erst durch die Möglichkeit das Labor der BOKU mit der gesamten Messtechnik zu nutzen, hat diese Arbeit zugelassen. Im speziellen bedanke ich mich auch bei Herrn Cedou Kumpenza für die Unterstützung im Labor.

Natürlich möchte ich mich auch bei Herrn Manfred Augustin und allen Mitarbeitern der holz.bau forschungs GmbH Graz bedanken. Es war eine sehr schöne und lehrreiche Zeit und ich fand ich immer ein offenes Ohr für Fragen aller Art.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Bernd Heissenberger, unserem Tischlermeister, bedanken. Auch wenn er nicht aktiv an dieser Arbeit beteiligt war, ist er mir immer mit einem guten Rat zur Seite gestanden.

Der größte Dank gebührt allerdings meiner Familie und allen voran meinen Eltern. Ihr habt alle meine Lebensentscheidungen mitgetragen und mich, wo es nur möglich war, unterstützt. Ohne euch wäre ich nicht zu dem Menschen geworden, der ich heute bin. Natürlich haben auch meine Geschwister – Richard mit Familie, Thomas und Kerstin – Ihren Teil dazu beigetragen.

Natürlich gilt auch all meinen Freunden und Studienkollegen in Graz, dem „Berg-Elite-Team“, sowie dem Wasserbauzeichensaal großer Dank für die schöne Zeit an der Uni und den atemberaubenden Momenten in den Bergen.

## Kurzfassung

Trotz steigender Beliebtheit des Baustoffes Holz sind noch viele Fragestellungen zu dessen orthotropen Materialverhalten ungelöst. Speziell für komplexe numerische Berechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) von lokalen, hochbeanspruchten Bereichen, z.B. Verbindungsknoten, ist eine möglichst genaue Kenntnis der betreffenden mechanischen Materialkennwerte in Form der Elastizitäts- oder Nachgiebigkeitsmatrix von Nöten.

Aus diesem Anlass beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Bestimmung eines Teils dieser sogenannten Ingenieurkonstanten, welche sich aus den Elastizitätsmoduln und Querdehnzahlen zusammensetzen. Für das dabei angewandte, experimentelle Vorgehen werden merkmalfreie Kleinproben der Holzart Fichte (*Picea Abies*) verwendet. Ziel ist es nicht nur, die jeweilige Größenordnung dieser Kennwerte zu erfassen, sondern auch deren Zusammenhänge untereinander sowie mit anderen Einflussparametern wie etwa der Rohdichte oder der Belastungsrichtung (Zug vs. Druck) festzustellen. Nachdem dieselbe Ausgangsware bereits für die Bestimmung der drei Schubmoduln  $G_{RL}$ ,  $G_{TL}$  und  $G_{RT}$  mittels sog. Arcan Shear Tests verwendet worden ist, dienen die hier vorgestellten Ergebnisse auch der Vervollständigung der Nachgiebigkeitsmatrix für das vorliegende Material.

Für die Untersuchungen der in drei Jahrringgruppen unterteilten und in Abhängigkeit der in den drei orthotropen Hauptrichtungen (Tangential, T; Longitudinal, L und Radial, R) orientierten Proben werden diese auf Zug belastet und die dabei auftretenden Längs- und Querdehnungen mittels eines optischen Messsystems (ESPI) erfasst. Die Ergebnisse werden statistisch aufbereitet und auf die oben genannten Zusammenhänge untersucht.

Eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit jenen aus der betreffenden Literatur zeigt eine weitgehende Übereinstimmung auf. Somit kann das angewandte Messverfahren als prinzipiell geeignet für die Bestimmung der Dehnungen von normalkraftbeanspruchten Kleinproben in Holz befunden werden. Die einzige Ausnahme ist die Bestimmung der Querdehnungen in L-Richtung, welche sich im Bereich der Messgenauigkeit befinden und dementsprechend zu hinterfragen sind. Ferner zeigt die Auswertung eine starke Variation der Höhe der Korrelationen zwischen den einzelnen Prüfserien. Ausgeprägte Zusammenhänge der Kennwerte E-Modul, Querdehnzahl und Rohdichte konnten nur für die Prüfserien TR und TL festgestellt werden. Der Vergleich zwischen Zug- und Druckbelastung hat gezeigt, dass die Belastungsrichtung keinen ausgeprägten Einfluss auf das elastische Materialverhalten hat.

## Abstract

Wood as a building material gets more and more popular over the last decades. Nevertheless, there are still many pending questions about the orthotropic material behaviour. Especially for complex numerical simulations by use of Finite-Element-Method (FEM) for local, highly stressed areas it is necessary to have a profound knowledge about the mechanical characteristics of the material.

For this reason, this thesis is focused on the determination of the three Young's moduli and six Poisson's ratios as well as the correlation between them and other parameters, like the density and direction of the applied loads (tension vs. compression). For these investigation, spruce (*Picea Abies*) was used as test material. In a previous work specimen of the same origin were used to determine the modulus of rigidity ( $G_{RL}$ ,  $G_{TL}$  und  $G_{RT}$ ) by Arcan Shear Tests. With the results of this work, it should be possible to describe the complete compliance matrix of the investigated material.

The specimens were manufactured according to the three orthotropic main directions (tangential T, longitudinally L and radial R). To determine the elastic parameters, tensile tests were performed using a mechanical universal testing machine. During the tests, the strains were measured using ESPI cameras (electronic speckle pattern interferometry). After a statistical evaluation, the results are presented and compared with properties found in literature.

In most cases the results of this thesis coincide with literature. This indicates, that the used measurement system (ESPI) is in principle an appropriate tool to determine strains of normal force loaded clear wood specimens. One exception is the determination of transverse strains in L direction, because their result in the measurements are within the accuracy of the ESPI cameras. Further the result show a strong variation of the correlation between the single test series. Distinct correlations of the parameters Young moduli, Poisson ratio and density were found for the test series TR and TL. The elastic material behaviour is not significant influenced when loaded in tension or compression.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT .....	1
1-2 AUFBAU DER ARBEIT .....	2
<b>KAPITEL 2: GRUNDLAGEN UND HISTORISCHES .....</b>	<b>3</b>
2-1 ANATOMIE DES HOLZES .....	3
2-1.1 Allgemein .....	3
2-1.2 Beschreibung der Strukturebenen.....	4
2-1.2.1 Molekulare Ebene.....	4
2-1.2.2 Nanoebene .....	5
2-1.2.3 Mikroebene.....	7
2-1.2.4 Makroebene .....	9
2-1.2.5 Stammebene .....	10
2-1.3 Hauptrichtungen des Holzes.....	12
2-2 MATERIALVERHALTEN UND MESSCHANISCHE KENNWERTE .....	14
2-2.1 Elastizität .....	14
2-2.2 Steifigkeits- und Nachgiebigkeitstensor für den Allgemeinen anisotropen Fall .....	15
2-2.3 Orthotropie .....	17
2-2.3.1 Materialsymmetrie.....	17
2-2.4 Querdehnzahl $\nu$ .....	20
2-2.5 Unterschied zwischen der Materialprüfung und der Bauteilprüfung.....	21
2-2.5.1 Clear Wood.....	22
2-2.5.2 Full-scale specimen .....	22
2-2.5.3 Gegenüberstellung von Kleinproben und Proben in Bauteilgröße und Ursachen der Differenz zwischen ihnen .....	22
2-3 STAND DER HOLZFORSCHUNG .....	23
2-4 MESSVERFARHEN.....	27
2-4.1 Einführung in die Kohärenzoptik .....	27
2-4.2 Kohärenz und Interferenz .....	27
2-4.3 Michelson Interferometer .....	28
2-4.4 Speckle Interferometrie .....	29
2-4.4.1 Verschiebungsmessung mittels Speckle-Interferometrie .....	31
2-4.4.2 Fehlerquellen bei ESPI-Messungen.....	36
<b>KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>41</b>
3-1 PRÜFSERIEN UND ZIEL .....	41
3-2 GRUNDMATERIAL .....	42
3-2.1 Ausgangsmaterial .....	42
3-2.2 Probekörper .....	42

3-2.2.1	Rohdichtemessung .....	45
3-2.2.2	Klimatisierung .....	45
3-2.2.3	Prüfkörper für die longitudinale (L) Belastungsrichtung.....	45
3-2.2.4	Prüfkörper für die tangentielle (T) Belastungsrichtung .....	46
3-2.2.5	Prüfkörper für die radiale (R) Belastungsrichtung.....	47
3-2.2.6	Verklebung.....	48
3-2.2.7	Fräsarbeiten.....	49
3-3	PRÜFAUFBAU .....	51
3-3.1	Belastungseinrichtung.....	51
3-3.2	Messeinrichtung.....	52
3-3.3	Prüfablauf.....	54
3-3.3.1	Vorbereitung der Probekörper .....	54
3-3.3.2	Vorbereitung der Speckle-Kameras bzw. ISTRASoftware .....	55
3-3.3.3	Vorbereitung der Universalprüfmaschine.....	56
3-4	AUSWERTUNG DER SPECKLE-INTERFEROMETRIE .....	58
3-5	AUSWERTUNG DES E-MODULS UND DER QUERDEHNZAHLEN .....	59
3-6	STATISTISCHE AUSWERTUNG .....	61
3-6.1	Datenerhebung.....	61
3-6.2	Bestimmte Statistische Kenngrößen .....	61
3-6.3	Ausreißeridentifikation .....	63
3-6.4	Regressionsanalyse .....	64
<b>KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>		<b>67</b>
4-1	ERGEBNISDISKUSSION NACH PRÜFSERIE.....	67
4-1.1	Zugversuche der Prüfserie TR .....	67
4-1.2	Zugversuche der Prüfserie TL .....	70
4-1.3	Zugversuche der Prüfserie LT .....	75
4-1.4	Zugversuche der Prüfserie LR .....	79
4-1.5	Zugversuche der Prüfserie RL .....	81
4-1.6	Zugversuche der Prüfserie RT .....	84
4-2	VERHALTEN DER E-MODUL .....	88
4-2.1	E-Modul $E_T$ in tangentialer Hauptrichtung .....	88
4-2.2	E-Modul $E_L$ in longitudinaler Hauptrichtung.....	89
4-2.3	E-Modul $E_R$ in radialer Hauptrichtung.....	91
4-3	ZUSAMMENFASSUNG DER ELASTIZITÄTSZAHLEN.....	92
4-4	ZUG- / DRUCKVERGLEICH .....	96
4-4.1	Belastung in tangentialer Hauptrichtung.....	96
4-4.1.1	Prüfserie TL .....	97
4-4.1.2	Prüfserie TR.....	98
4-4.2	Belastung in longitudinaler Hauptrichtung .....	99

4-4.2.1	Prüfserie LT.....	100
4-4.2.2	Prüfserie LR.....	101
4-4.3	Belastung in radialer Hauptrichtung.....	102
4-4.3.1	Prüfserie RT.....	103
4-4.3.2	Prüfserie RL.....	104
<b>KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG, RESÜMEE UND AUSBLICK.....</b>		<b>106</b>
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE .....</b>		<b>I</b>
A-1	LITERATURVERZEICHNIS.....	I
A-2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	III
A-3	TABELLENVERZEICHNIS .....	VI
<b>ANHANG B EINZELERGEBNISSE .....</b>		<b>VIII</b>
B-1	ERGEBNISSE AUS DEN ZUGVERSUCHEN.....	VIII
B-1.1	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR .....	VIII
B-1.2	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL.....	IX
B-1.3	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT.....	X
B-1.4	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR .....	XI
B-1.5	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL .....	XII
B-1.6	Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT .....	XIII
B-2	ERGEBNISSE AUS DEN DRUCKVERSUCHEN.....	XIV
B-2.1	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung TR.....	XIV
B-2.2	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung TL .....	XIV
B-2.3	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung LR.....	XV
B-2.4	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung LT .....	XV
B-2.5	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung RT .....	XVI
B-2.6	Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung RL.....	XVI



# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

---

Auch wenn das Bauen mit Holz sich nach wie vor einer zunehmenden Beliebtheit erfreut, sind viele Fragestellungen zu dessen Materialverhalten, welches vereinfacht als orthotrop beschrieben werden kann, noch immer ungelöst. Insbesondere für komplexe numerische Simulationen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) von lokalen, hoch beanspruchten Bereichen ist eine möglichst genaue Kenntnis der mechanischen Kennwerte von merkmalfreien Kleinproben („Clear Wood“) in Form der Elastizitäts- oder Nachgiebigkeitsmatrix sowie deren Zusammenhänge untereinander und mit anderen Einflussparametern wie etwa der Rohdichte oder Jahrringbreite von Nöten. Aufgrund der speziellen Materialstruktur von Holz mit insg. neun unabhängigen Materialkonstanten ist hierfür eine Vielzahl von Messungen und Daten notwendig. Der Großteil an wissenschaftlichen Arbeiten zu dieser Themenstellung (vgl. z.B. [1–5]) liegt teilweise schon mehr als 70 Jahre zurück. Die dabei durchgeführten Untersuchungen sind mit Kleinproben, welche meist aus Rundholzscheiben entnommen wurden, durchgeführt worden. Die Messung der Dehnungen wurde größtenteils mit mechanischen, bzw. elektro-mechanischen Messgeräten vollzogen, mit welchen man naturgemäß nicht in der Lage ist, den vermutlich nicht unerheblichen Einfluss spezifischer Charakteristika einer Probe, wie etwa deren Jahrringstruktur, exakt zu erfassen. Abgesehen von der Holzfeuchte, welche vor allem von Neuhaus [3] systematisch variiert wurde, liegen zudem kaum Informationen über die Zusammenhänge der Elastizitätszahlen mit anderen Materialparametern – hier sei insbesondere die Rohdichte hervorzuheben – vor.

Diese Arbeit dient daher im Wesentlichen der Erweiterung des bestehenden Grundlagenwissens hinsichtlich der Größe und dem Verhalten dieser Elastizitätszahlen zufolge einer Variation ausgesuchter Einflussparameter und soll dabei vor allem etwaige Abhängigkeiten und Zusammenhänge der Elastizitätszahlen mit der Rohdichte und der Jahrringbreite des untersuchten Materials aufzeigen. Im Rahmen der dafür durchgeführten, experimentellen Untersuchungen wurden Proben der Holzart Fichte (*Picea Abies*) verwendet, da diese insbesondere im deutschsprachigen Raum den größten Stellenwert für den Holzbau aufweist. Nachdem dieselbe Ausgangsware für die hier gezeigten Untersuchungen bereits für die Bestimmung der drei Schubmoduln  $G_{RL}$ ,  $G_{TL}$ ,  $G_{RT}$  mittels sog. Arcan Shear Tests (siehe Müller et al. [6]) verwendet worden ist, dienen die hier vorgestellten Ergebnisse auch zur Vervollständigung der Nachgiebigkeitsmatrix für das vorliegende Material. Wie oben angeführt, wurden die Probekörper als merkmalfreie Kleinproben ausgeführt, um das ungestörte Materialverhalten, ohne Einfluss von Strukturmerkmalen, wie z.B. Ästen oder Schrägfasern, untersuchen zu können. Die zweidimensionale Messung der Verformungen erfolgte dabei mit einem optischen Verfahren (electronic speckle pattern interferometrie – ESPI), welches in der Lage ist, den Einfluss der zuvor erwähnten Jahrringstruktur auf die zu bestimmenden Kennwerte zu erfassen. Neben dem zuvor definierten Primärziel dieser Arbeit soll auch noch die Frage beantwortet werden, welchen Einfluss die Belastungsart (Zug- oder Druckbeanspruchung) auf das elastische Materialverhalten des orthotropen Werkstoffs Holz hat.

## **1-2 AUFBAU DER ARBEIT**

---

Die Arbeit gliedert sich in vier weitere, inhaltliche Kapitel, welche im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

### **Kapitel 2 – Grundlagen und Historisches**

In Kapitel 2 wird der organische Aufbau des Holzes dargestellt und dessen mechanische und physikalische Kennwerte beschrieben. Ein weiterer Punkt in diesem Kapitel ist eine Übersicht über die Literatur zu diesem Thema, welche als Grundlage dieser Arbeit dient. Des Weiteren werden die Grundlagen des elastischen Materialverhaltens, sowie jene der zum Einsatz kommenden Messtechnik erläutert.

### **Kapitel 3 – Material und Methoden**

Dieses Kapitel zeigt eine Übersicht des verwendeten Prüfmaterials und die Entwicklung der Prüfgeometrie sowie der Herstellung der Prüfkörper. Des Weiteren werden der Prüfablauf und die Prüfkfiguration vorgestellt. Außerdem werden die verwendeten Berechnungsgrundlagen und Auswertemethoden besprochen.

### **Kapitel 4 – Ergebnisse und Diskussion**

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Prüfungen grafisch dargestellt und besprochen. Des Weiteren wird auf Probleme hingewiesen und die Resultate interpretiert.

### **Kapitel 5 – Resümee und Ausblick**

Kapitel 5 zeigt eine zusammenfassende Betrachtung der durchgeführten Arbeit, sowie einen Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten, die in diesem Gebiet noch notwendig sind.

# KAPITEL 2: GRUNDLAGEN UND HISTORISCHES

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und die zu dieser Themenstellung in der Literatur gefundenen Untersuchungen, auf welche die vorliegende Arbeit aufbaut, zusammengefasst. Zuerst wird ein Einblick in den organischen Aufbau des Baustoffes Holz dargestellt und dessen mechanischen und physikalischen Eigenschaften beschrieben. Des Weiteren werden die mechanischen Grundlagen von Elastizität und anisotropen bzw. orthotropen Materialverhalten beschrieben. Darauf folgt eine Übersicht über den Stand der Forschung, sowie die Grundlagen des optischen ESPI-Messsystems, womit Verformungs- und Schwingungsmessungen mittels Laser-Interferometrie durchgeführt werden.

## 2-1 ANATOMIE DES HOLZES

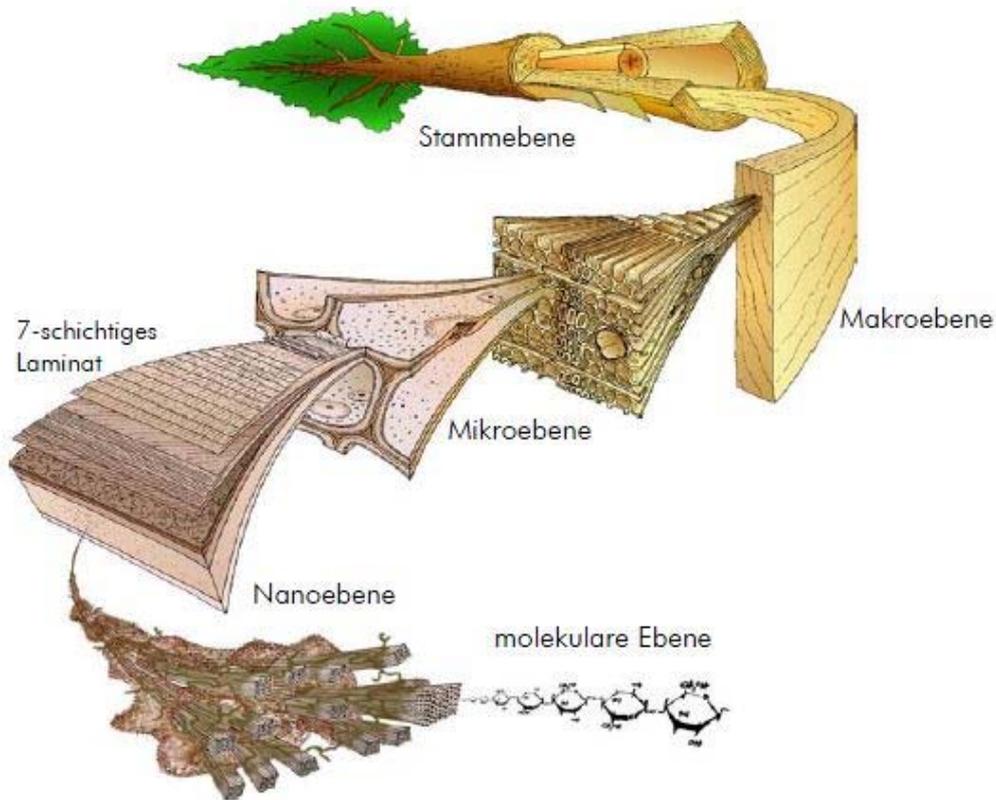
---

### 2-1.1 ALLGEMEIN

Holz ist das Baumaterial der Bäume. Es dient neben der Lastabtragung, Standsicherheit und Speicherung bzw. Transport von Nährstoffen auch zu deren Festigung. Je nach Umwelteinflüssen und Standortanforderungen kann der Baum die Eigenschaften des Holzes anpassen. Der grundsätzliche Aufbau des Holzes bleibt jedoch gleich, es ändern sich lediglich die Anteile und Ausprägungen der einzelnen Komponenten. [7]

Holz kann in fünf Strukturebenen unterteilt werden. Diese sind, wie in Abbildung 2-1 dargestellt:

- die molekulare Ebene,
- die Nanoebene,
- die Mikroebene,
- die Makroebene und
- die Stammebene.



**Abbildung 2-1:** Schematischer Überblick über die Strukturebenen des Holzes [8]

Maßgebend für die Eigenschaften des Holzes ist der Aufbau der chemischen Grundsubstanzen in der Mikro- und Makroebene. [7]

## 2-1.2 BESCHREIBUNG DER STRUKTUREBENEN

### 2-1.2.1 Molekulare Ebene

Die wesentlichen Bestandteile von Holz sind ca. 50 % Kohlenstoff (C), 44 % Sauerstoff (O) und 6 % Wasserstoff (H). Der Aschegehalt beträgt ca. 0,2 % bis 0,3 % und der Stickstoffgehalt liegt unter 0,1 %. Die genaue Zusammensetzung variiert aber zwischen den Baumarten und auch innerhalb des Stammes. [7]

Holz ist ein Verbundwerkstoff aus den makromolekularen Zellwandkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Diese kommen in großen Mengen im Holz vor. Ihre Aufgaben werden in Tabelle 2-1 zusammengefasst. [7]

**Tabelle 2-1:** Übersicht der chemischen Bestandteile des Holzes [7]

	<b>Komponenten Anteil an der Holzmenge</b>	<b>Hauptfunktion</b>
<b>Hauptbestandteile</b>	<b>Cellulose:</b> langkettiges, unverzweigtes Makromolekül 41 % - 51 %	Aufnahme der mechanische Kräfte, vor allem der Zugkräfte Gerüstsubstanz der Zellwand
	<b>Hemicellulose (Polyosen):</b> kurzkettiges, verzweigtes Makromolekül 25 % - 30 % in Nadelholz, 27 % - 40 % in Laubholz	Kittsubstanz und Flexibilisatoren Gerüstsubstanz der Zellwand
	<b>Lignin:</b> dreidimensionales Makromolekül 28 % - 41 % in Nadelholz 18 % - 25 % in Laubholz	Kittsubstanz im Cellulosegrundgerüst → Verholzung der Zellwände, Aufnahme von Druckkräften
	<b>Pektine</b> (fast ausschließlich in der Mittellamelle): dreidimensionales Makromolekül 0,5 % im Nadelholz 1 % bis 2 % im Laubholz	Kittsubstanz, hält die Zellen im Gewebeverband zusammen
<b>in geringen Mengen</b>	niedermolekular <sup>1)</sup> , 1 % - 10 % in Hölzern der gemäßigten Zonen 2 % - 30 % in tropischen Hölzern	beeinflussen die chemischen und physikalischen Holzeigenschaften, z. B. Lichtbeständigkeit, Brennbarkeit, Dauerhaftigkeit, Geruch,...

<sup>1)</sup> sehr kleine Moleküle mit einer Molekülmasse < 800 g/m<sup>1</sup>

## 2-1.2.2 Nanoebene

### Allgemeines

Die Zellwand umhüllt die pflanzliche Zelle. Sie entsteht während des Dickenwachstums bei der Zellteilung. Im Wesentlichen besteht die Zellwand aus drei Wandschichten, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Diese sind [7]:

- Mittellamelle,
- mehrschichtige Sekundärwand und
- Primärwand.

Zwei aneinandergrenzenden Nadelholztracheiden oder Laubholz-Libriformfasern (vgl. Kapitel 2-1.2.3) werden durch die Mittellamelle (M) verbunden. Beidseitig schließt sich für jede Zelle eine sehr dünne Primärwand (P) an. Darauf folgt die mehrschichtige Sekundärwand (S1, S2 und S3). Abbildung 2-2 zeigt den schematischen Aufbau einer Zelle. Die Schichten der Sekundärwand sind verschieden orientiert. Die Zellwand, die zwei Zellen miteinander verbindet, ist also aus einer ungeraden Anzahl aus orientierten Schichten aufgebaut. Dieser Aufbau wird als Laminat bezeichnet. Die hohe mechanische Leistungsfähigkeit dieses Laminats ist durch das Zusammenwirken der verschiedenen Schichten gegeben.[7]

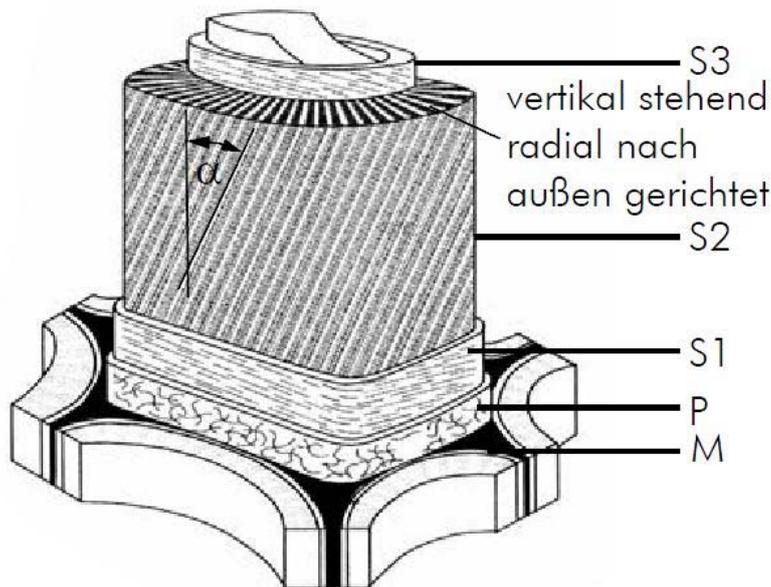


Abbildung 2-2: "Neues" Zellwandmodell nach [9]

### Mittellamelle:

Die Bildung der Mittellamelle findet schon während der Zellteilung statt. Zwei sich teilende Zellen besitzen eine gemeinsame Mittellamelle. In weitere Folge werden alle anderen Zellwandschichten auf dieser Mittellamelle aufgelagert. Sie ist eine isotrope, homogene Schicht aus einer amorphen Matrix aus Pektin und Hemicellulose. Die Lignifizierung beginnt in der Mittellamelle und breitet sich auf die anderen Schichten aus. Nach der Verholzung weist die Mittellamelle einen Ligningehalt von bis zu 90 % auf. Dies ist für die hohe Druckfestigkeit verantwortlich [7].

### Primärwand (P)

Da sie mikroskopisch schwer zu unterscheiden sind, werden die Primärwand und die Mittellamelle häufig zur „Mittelschicht“ zusammengefasst. Noch während der Zellteilung wird die Primärwand an der Mittellamelle angelagert. In der Primärwand liegen submikroskopische Cellulose-Mikrofibrillen (→ Gerüstsubstanz) wahllos in der Matrix aus Lignin, Pektin und Hemicellulose. Die Abstände der Cellulosefibrillen sind aufgrund der Streutextur sehr groß, wodurch der Celluloseanteil sehr gering ist (ca. 2,5 % bis 14 %). Die Dicke der Primärwand beträgt ca. 0,1 mm – 2 µm. [7]

### Sekundärwand (S)

Die Sekundärwand nimmt den größten Anteil der Zellwand ein. Sie besitzt einen lamellaren Schichtaufbau mit paralleler Fibrillenorientierung („Paralleltextur“) in den einzelnen Schichten. Der Celluloseanteil beträgt bis zu 94 %. Der Mikrofibrillenwinkel gibt den Winkel zwischen der Orientierung der Cellulosefibrillen und der Längsrichtung der Holzzelle an. Im Allgemeinen werden innerhalb der Sekundärwand drei Schichten hinsichtlich ihrer Dicke, dem Cellulosegehalt und der Orientierung der Cellulosefibrillen unterschieden:

- Die **äußere Sekundärwand (S1)** liegt direkt auf der Primärwand und ist 0,2 µm bis 0,3 µm dick. Sie gliedert sich in 3 bis 6 Mikrolamellen und weist eine schwache Paralleltextur mit einem Fibrillenwinkel von 50 ° bis 80 ° auf zur Zellenlängsachse auf. [7]
- Die **zentrale Sekundärwand (S2)** ist mit fast 30 Mikrolamellen im Frühholz bzw. 150 Mikrolamellen im Spätholz mit einer Dicke von 1 µm bis 10 µm die stärkste Wandschicht und

macht etwa 75 % bis 85 % der gesamten Zellwand aus. Wegen ihrer Mächtigkeit ist die S2-Schicht maßgebend für viele Holzeigenschaften wie z. B. Festigkeit und Steifigkeit. Der Fibrillenwinkel von ca. 10 ° bis 30 ° zur Zellenlängsachse ist sehr klein gegenüber der S1- und S3-Schicht. [7]

- Die **innere Sekundärwand (S3)**, auch Tertiärwand (T) genannt ist etwa 0,5 µm bis 1,0 µm dick und setzt sich aus 6 Mikrolamellen bei einer strangartigen Paralleltexur und schwachen Streuungstexur der Mikrofibrillen zusammen. Der Winkel zur Zellenlängsachse beträgt etwa 60 ° bis 90 °. [7]

### 2-1.2.3 Mikroebene

Es gibt im Holz Millionen von Zellen von Unterschiedlicher Art, Größe, Form und Aufgaben. Gleichartige Zellen bilden gruppenartige Gebilde. Diese Gruppen nennt man Gewebe. Nach den drei Hauptaufgaben, Festigung, Leitung und Speicherung, gibt es drei Hauptgewebearten. Diese sind:

- Festigungsgewebe,
- Leitungsgewebe und
- Speichergewebe.

Darüber hinaus gibt es noch Nebengewebe:

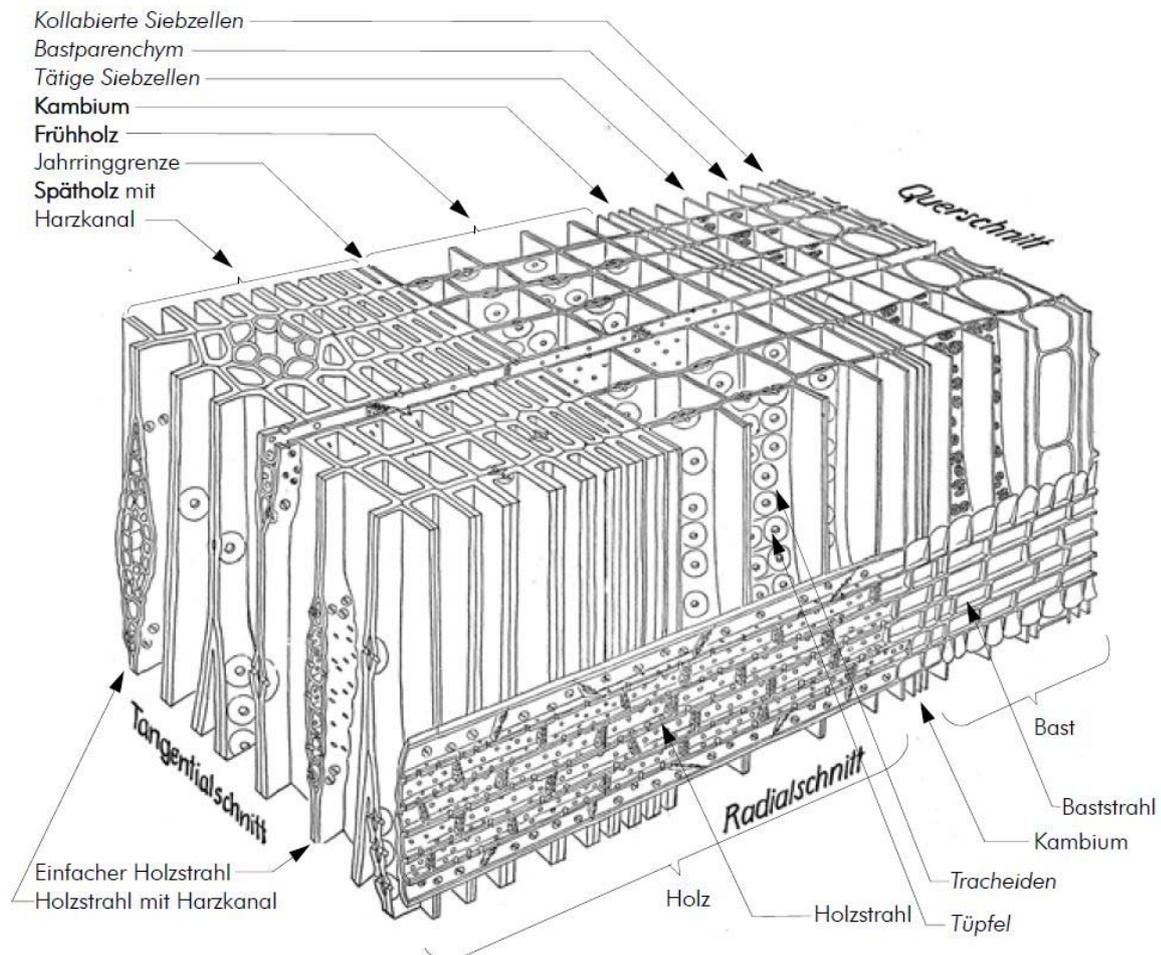
- Exkretgewebe (Harzkanäle) und
- Sondergewebe (z.B. Wundholz, Reaktionsholz). [7]

Hauptsächlich verlaufen die Zellen parallel zur Stammachse. Ein kleiner Teil liegt rechtwinklig orientiert, also waagrecht im Stamm. Dies sind die Holzstrahlen, die für den radialen Transport und die Speicherung von organischen Stoffen aus der Rinde zuständig sind. Tabelle 2-2 zeigt einen Überblick der Zellen, differenziert nach Nadel- und Laubholz. In Abbildung 2-3 wird der Aufbau des Holzgewebes schematisch dargestellt. [7]

**Tabelle 2-2:** Übersicht Holzgewebe und Holzzellen

Gewebetyp	Nadelholz	Laubholz
<b>Leitgewebe</b>	Frühholztracheiden (dünnwandig)	Gefäße (=Tracheen)
<b>Speichergewebe</b>	Parenchymzellen	Parenchymzellen
<b>Festigungsgewebe</b>	Spätholztracheiden (dickwandig)	(Holz-)Fasern (Libriformfasern, tlw. Fasertracheiden)
<b>Exkretgewebe</b>	Epithelzellen	Epithelzellen
<b>Sondergewebe z. B. Reaktionsholz</b>	Druckholztracheiden	Zugholzfaseren

## Aufbau Nadelholz



**Abbildung 2-3:** Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche) [10]

Gegenüber den Laubbäumen ist das Holz der Nadelbäume entwicklungsgeschichtlich älter, und daher im Aufbau verhältnismäßig einfacher und regelmäßiger. Das Gewebe der Nadelhölzer setzt sich aus nur zwei Zellarten zusammen: Tracheiden und Parenchymzellen. Die Zellen bilden im Stamm zwei in sich kreuzende Systeme, daher wird bei den Tracheiden zwischen Längs- und Quertracheiden sowie beim Parenchym zwischen Längs- und Strahlparenchym unterschieden. Epithelzellen sind parenchymatische Exkretzellen, welche die Harzkanäle auskleiden. Anordnung, Form und Funktion der Nadelholzzellen sind in Tabelle 2-3 zusammengestellt.

**Tabelle 2-3:** Übersicht der Zellarten und deren Funktion des Nadelholzes [11]

	<b>Zellarten</b>	<b>Form<sup>1)</sup></b>	<b>Hauptfunktion</b>
<b>axial ausgerichtet</b>	Längstracheiden Frühholztracheiden Spätholztracheiden	prosenchymatisch prosenchymatisch	Wasserleitung Festigung
	Längsparenchym Epithelzellen der vertikalen Harzkanäle	parenchymatisch parenchymatisch	Speicherung Harzausscheidung
<b>radial ausgerichtet (Holzstrahlen)</b>	Quertracheiden (Holzstrahltracheiden) Strahlparenchym Epithelzellen der horizontalen Harzkanäle	prosenchymatisch parenchymatisch parenchymatisch	Wasserleitung Speicherung Harzausscheidung
	<sup>1)</sup> Als Prosenchymzellen werden langgestreckte Zellen mit spitz zulaufenden Enden bezeichnet; Parenchym stellt Gewebe aus backsteinförmigen oder isodiametrischen Zellen dar.		

Nähere Informationen können in [7, 11–13] nachgeschlagen werden.

## 2-1.2.4 Makroebene

### Allgemeines

Im Gegensatz zur Mikroebene, die nur unter Zuhilfenahme von Mikroskopen erkennbar ist, sind die ganzen Zellverbände und Gewebestrukturen der Makroebene für das freie Auge sichtbar. Aufbau, Anordnung, Form und Größe dieser Strukturen schaffen das „Aussehen“ (Textur, Zeichnung) der einzelnen Holzarten. [7]

### Jahrringe bzw. Zuwachszonen

Zuwachszonen entstehen durch Vegetationspausen aufgrund z.B. klimatischer Verhältnisse. Dies sind z.B. Winter/Sommer Wechsel in Gebieten mit winterlichen Vegetationsruhen, oder Regen- /Trockenphasen in tropischen und subtropischen Gebieten. Bei periodischen Wechsel, wie bei Winter und Sommer, weisen die Zuwachszonen eine ringförmige Anordnung auf und lassen im unteren Baumabschnitt auf das Baumalter schließen und werden daher auch Jahrringe genannt. Bäume in immergrünen Gebieten zeigen keine Zuwachszonen. [7]

Sichtbar werden die Jahrringe dadurch, dass zu Anfang und Ende der Vegetationsperiode Zellen von unterschiedlicher Art, Größe, Anzahl und Verteilung angelegt werden. Daher wird innerhalb der Jahrringe zwischen Früh- und Spätholz unterschieden. Das Frühholz ist für den raschen Wassertransport zu Beginn der Wachstumsperiode verantwortlich. Das Spätholz hingegen ist für die Stabilität und Festigung zuständig und wird im Sommer angelegt. [7]

Aufgrund der verschiedenen Aufgaben herrschen zwischen Früh- und Spätholz erhebliche Unterschiede in den mechanischen und physikalischen Kennwerten. So hat Spätholz gegenüber Frühholz eine höhere Rohdichte und Festigkeit, sowie höhere Quell- und Schwindwerte. Im Frühholz von Nadelhölzern sind die Zellen weitlumig und dünnwandig, im Spätholz hingegen englumig und dickwandig (Lumen = innerer Durchmesser eines röhrenförmigen, hohlen Organs). Dieser Unterschied in der Zellwanddicke führt zu dem charakteristischen Farb- und Härteunterschied innerhalb des Jahrringes. [7]

### Holzstrahlen

Holzstrahlen, oder auch Markstrahlen kommen in allen Hölzern vor, wobei die Größe, Häufigkeit und Zusammensetzung von Holzart zu Holzart variiert. Sie verlaufen senkrecht zur Stammachse und sind für die Leitung und Speicherung von organischen Stoffen, sowie der Festigung in radialer Richtung

verantwortlich. Da sie makroskopisch erkennbar sind, beeinflussen sie das Holzbild und sind somit ein Bestimmungsmerkmal. [7]

### Harzkanäle

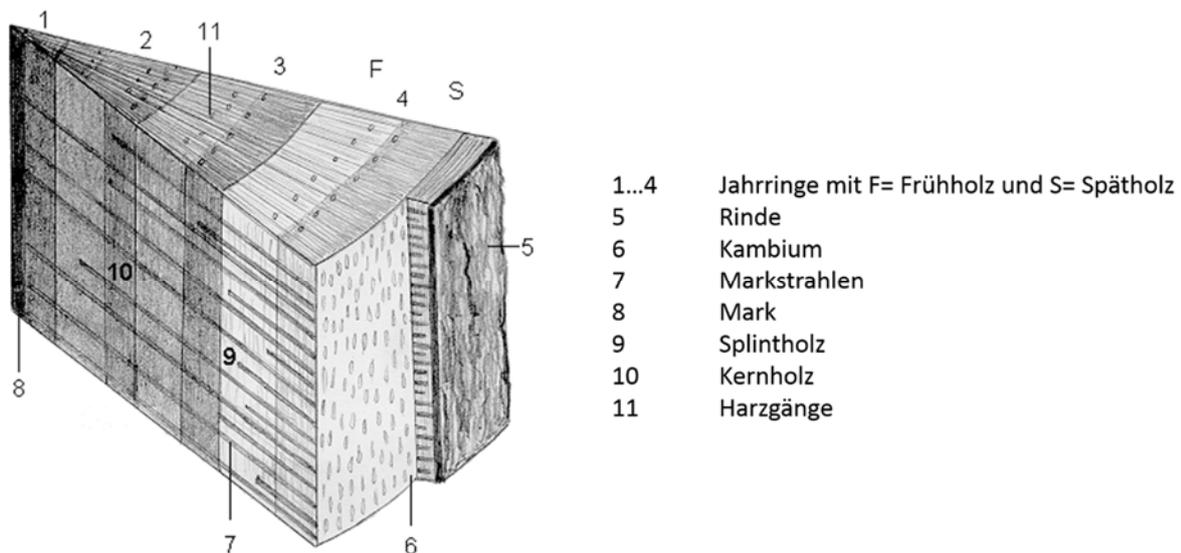
Harzkanäle erscheinen als helle oder dunkle Punkte vorwiegend im Spätholz einiger Nadelhölzer (z. B. Fichte, Kiefer, Lärche, Douglasie) und beeinflussen die Be- und Verarbeitbarkeit des Holzes. [7]

### 2-1.2.5 Stammebene

Im Querschnitt eines Stammes können je nach Holzart mit bloßem Auge folgende Bereiche unterschieden werden:

- Rinde (bestehend aus Bast und Borke),
- Kambium (nur mikroskopisch sichtbar),
- Splintholz,
- Kernholz,
- Mark.

Zwischen Rinde und Holz liegt das Kambium, das nur mikroskopisch erkennbar ist. Dieser Aufbau ist in Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 dargestellt.



**Abbildung 2-4:** Holzkeil einer vierjährigen Kiefer mit den charakteristischen makroskopischen Erkennungsmerkmalen [14]



**Abbildung 2-5:** Stammquerschnitt einer Lärche (links) und einer Fichte (rechts) [7]

### **Juveniles und adultes Holz**

Rund um die Markröhre liegt das juvenile Holz. Dies wird in den ersten Wachstumsjahren gebildet. Die Eigenschaften des juvenilen Holzes ändern sich stark von Jahrring zu Jahrring. Die Holzeigenschaften verbessern sich zwischen dem fünften und 20. Wachstumsjahr und werden im adulten Holz, ab dem 20. Wachstumsjahr relativ konstant. Kennzeichen des juvenilen Holzes sind in der Regel breite Jahrringe und es besitzt im Allgemeinen bei Nadelholz eine geringere Zelllänge, eine geringere Zellwanddicke, einen geringeren Cellulose-, aber höheren Ligningehalt. Außerdem hat juveniles Holz einen höheren Mikrofibrillenwinkel, einen geringeren Frühholzanteil, mehr Druckholz und mehr Drehwuchs. Daraus entsteht eine geringere Quer-, aber höhere Längsschwindung, eine geringere Rohdichte und letztlich eine um 50 % bis 70 % geringere Steifigkeit und Festigkeit[7]. Abbildung 2-6 zeigt eine Übersicht über den Verlauf der Eigenschaften über den Querschnitt.



**Abbildung 2-6:** Eigenschaften von juvenilen und adulten Nadelholz [7] (in Anlehnung an [15])

## **Kern- und Splintholz**

Mit fortschreitendem Alter teilt sich das Holz in Splint und Kernholz. Das Splintholz besitzt lebende, physiologisch aktive Holzzellen. Es dient zur Wasserleit- und Speicherfunktion. Die Splintholzbreite ist je nach Lage im Baum, Alter, Stellung im Bestand und Standort abhängig. [7, 11]

Das Kernholz umfasst den inneren Bereich des Stammes und besitzt im Allgemeinen keine lebenden Zellen. Grundvorgang der Verkernung ist das Absterben der parenchymatischen Zellen und der Auflösung ihres Stärkedepots. Dieser Vorgang wird häufig von der Einlagerung spezifischer, oft gefärbter Kernstoffe, Änderungen im Gas- und Wassergehalt, Verschluss der Hoftüpfel und Verkrustung ihrer Membranen sowie Bildung von Thyllen begleitet. Das Kernholz weist gegenüber dem Splintholz andere mechanisch-physikalische Eigenschaften auf. Dies sind unter anderem: dunklere Färbung, geringerer Wassergehalt, größere Rohdichte, größere Härte und bessere Dauerhaftigkeit. Das Kernholz erfüllt nur noch die Festigkeitsfunktion und sorgt für die Standsicherheit des Baumes. [7, 11]

## **Anatomie der Sondergewebe**

Sondergewebe unterscheiden sich von dem bisher beschriebenen Normalholz und werden nur nach Bedarf nach Umwelteinflüssen gebildet. Sondergewebe sind sekundäre Strukturveränderungen, wie Reaktionsholz, Wund- und Wulstholz.

**Reaktionsholz** ist für die Formerhaltung der Bäume zuständig. Bei z.B. schiefstehenden Bäumen, oder untypischen Astwinkeln wird durch vermehrtes Dickenwachstum versucht den Baum wieder in Normalstellung zu bringen. Bei Laubholz wird das Reaktionsholz an der Stamm- oder Astoberseite gebildet und wirkt auf Zug (Zugholz). Bei Nadelholz erfolgt die Reaktionsholzbildung an der Stamm- oder Astunterseite und wirkt auf Druck (Druckholz). [7]

**Wundholz** wird neben Verletzungen am Baum gebildet, an denen das Kambium zerstört wurde. Es dient zum Schutz des noch gesunden Gewebes. [7]

## **2-1.3 HAUPTRICHTUNGEN DES HOLZES**

Die Anordnung von Zellen und Gewebe gibt dem Holz drei anatomische Hauptschnitte vor, da dieses Gebilde in jede Richtung ein anderes Aussehen aufweist. In Abbildung 2-7 werden die Hauptschnittrichtungen an einem Stamm dargestellt. [7]

Diese Schnitte sind:

- Tangentialschnitt (Fladerschnitt),
- Querschnitt (Hirnschnitt) und
- Radialschnitt (Spiegelschnitt).



*Abbildung 2-7: Darstellung der drei anatomischen Hauptschnittrichtungen*

Aus diesen Schnitten folgen die drei Hauptrichtungen, welche für die Ermittlung der mechanischen Kenngrößen benötigt werden (vgl. Abbildung 2-8).

Die Hauptrichtungen sind:

- Tangentialrichtung (T oder 1),
- Longitudinalrichtung (L oder 2) und
- Radialrichtung (R oder 3).

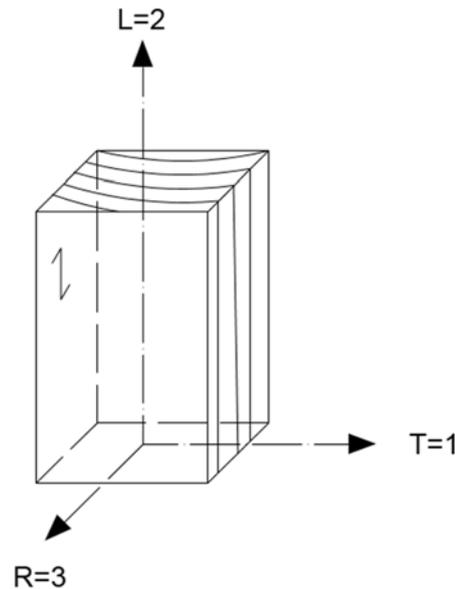


Abbildung 2-8: Bezeichnung der Hauptrichtungen

## 2-2 MATERIALVERHALTEN UND MESCHANISCHE KENNWERTE

### 2-2.1 ELASTIZITÄT

Die Elastizität beschreibt die Formänderung von festen Stoffen bei geringer Beanspruchung und den Rückgang in den Urzustand nach Wegnahme der Beanspruchung. Die elastischen Eigenschaften gelten als Kennzeichen fester Körper unterhalb eines Grenzpunktes. Wird dieser Punkt überschritten, bleiben plastische Verformungen zurück, oder aber der Körper bricht. Die Elastizitätsgrenze bei Holz kann nicht eindeutig definiert werden, da sie von vielen Faktoren abhängig ist. Die wichtigsten sind [12]:

- Holzart,
- Rohdichte,
- Feuchte,
- Belastungsrichtung bzw. Orientierung,

Von großer Wichtigkeit ist der Zusammenhang zwischen elastischer Dehnungen mit den Spannungen innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen, welcher im linearen Fall als Hook'sche Gerade bezeichnet wird. Nach C. Bach und W. Schüle gilt für alle Baustoffe mit Ausnahme von Marmor und Gummi das Potenzgesetz (Bach-Schüle Potenzgesetz) [12]:

$$e = S * \sigma \quad (2.1)$$

mit:

$$e = \frac{\Delta l}{l} \text{ Dehnung [-]}$$

$$\sigma = \text{Spannung [N/mm}^2\text{]}$$

$$S = \text{Elastizitätszahl } \frac{1}{E} \text{ [mm}^2\text{/N]}$$

Die Elastizitätszahl  $S$  bezieht die Änderung einer Längeneinheit eines Stabes pro Einheit der Spannung innerhalb des elastischen Bereichs (Hook'sches Gesetz). In Gleichung (2.1) wird dies für den einfachsten eindimensionalen Fall dargestellt. Abbildung 2-9 zeigt den proportionalen Zusammenhang der Spannungen und Dehnungen bei faserparalleler Zug- und Druckbeanspruchung. So wie die Wärmedehnzahl  $\alpha_w$  oder die Quellungszahlen  $\alpha$ , ist die Elastizitätszahl  $S$  ein Erfahrungswert, der aus Versuchen hervorgeht. In der heutigen technischen Literatur wird aber hauptsächlich der Elastizitätsmodul  $E = S^{-1}$  [N/mm<sup>2</sup>] verwendet, da dieser für Berechnungen einfacher zu handhaben ist. Die E-Moduln für Zug, Druck und Biegung liegen zahlenmäßig eng zusammen, jedoch die Orientierung des Holzes zur Lastrichtung hat großen Einfluss auf die Größe der Elastizitätszahl bzw. des E-Moduls. Die Bestimmung der E-Moduln erfolgt üblicherweise gemäß ÖNORM EN 408 [16] und wird in Kapitel 3-5 erläutert.

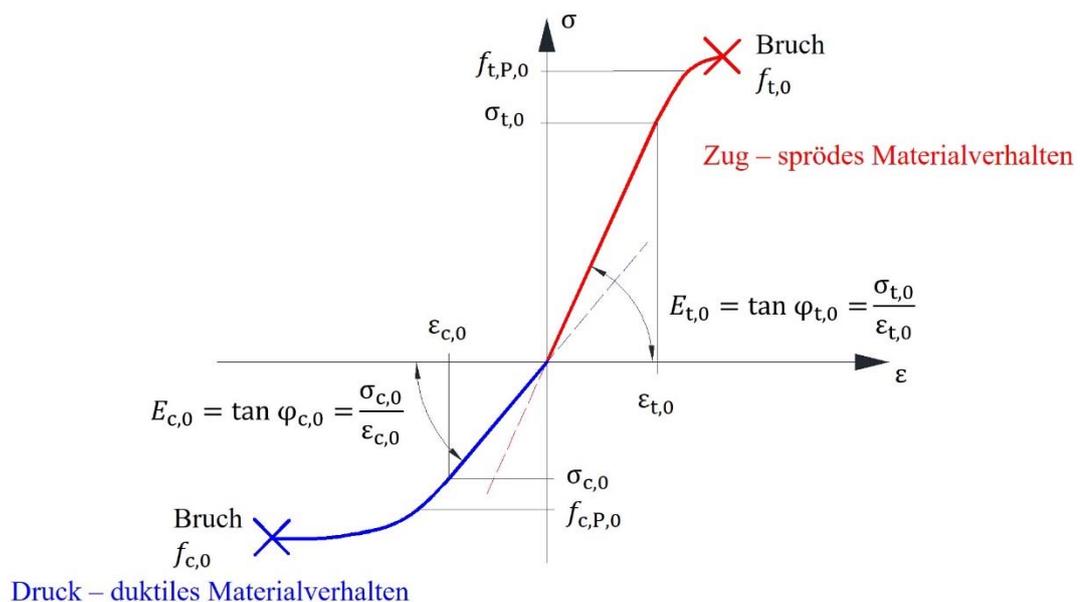


Abbildung 2-9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für fehlerfreies Holz (in Anlehnung an [7])

## 2-2.2 STEIFIGKEITS- UND NACHGIEBIGKEITSTENSOR FÜR DEN ALLGEMEINEN ANISOTROPEN FALL

Im Allgemeinen anisotropen Fall verknüpft das Hook'sche Gesetz alle Verzerrungskomponenten mit den Spannungskomponenten. Dabei gilt die Annahme, dass die Beziehung der Verzerrungen zu den Spannungen linear ist. Dieses Gesetz wird anhand zweier Schreibweisen zusammengefasst. [17]

Zum einen über die Steifigkeit:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (2.2)$$

mit:

$\sigma_{ij}$  = Spannungskomponenten (Normal- und Schubspannungen)

$e_{kl}$  = Verzerrungskomponenten (Normal- und Schubverzerrungen)

$C_{ijkl}$  = Steifigkeitstensor

$i, j, k, l$  = Koordinatenindex, können unabhängig voneinander die Werte 1, 2 oder 3 annehmen

Zum anderen über die Nachgiebigkeit:

$$e_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.3)$$

Wobei  $S_{ijkl}$  als Nachgiebigkeitstensor bezeichnet wird.

Bei Betrachtung der Gleichungen (2.2) und (2.3) wird offensichtlich, dass zwischen  $C$  und  $S$  der Zusammenhang  $C = S^{-1}$  gilt. [18]

Nach der Einstein'schen Summenkonvention, wird über doppelte Indizes summiert; zum Beispiel,

$$e_{12} = S_{1211}\sigma_{11} + S_{1212}\sigma_{12} + S_{1213}\sigma_{13} + S_{1221}\sigma_{21} + S_{1222}\sigma_{22} + S_{1223}\sigma_{23} + S_{1231}\sigma_{31} + S_{1232}\sigma_{32} + S_{1233}\sigma_{33} \quad (2.4)$$

Somit entstehen 9 Gleichungen und es werden 81 Elastizitätsparameter benötigt, um alle Verzerrungs- und Spannungskomponenten miteinander zu verknüpfen. [17] Aufgrund der Gegenseitigkeit der Schubspannungen (Boltzmann-Kontinuum) sind beide Tensoren symmetrisch. Dadurch wird an den Materialtensor die Symmetriebedingung gestellt, dass die Komponenten innerhalb des ersten oder innerhalb des zweiten Indexpaares gleich sein müssen. [18]

$$S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk} = S_{jilk} \quad (2.5)$$

Eine weitere Annahme ist das Vorhandensein eines elastischen Potentials, daraus ergibt sich zusätzlich die Vertauschbarkeit der Indexpaare untereinander:

$$S_{ijkl} = S_{klij} \quad (2.6)$$

Aufgrund dieser Symmetriebedingungen verbleiben von den ursprünglich 81 Komponenten nur 21, die voneinander unabhängig sind. Daraus lässt sich die Gleichung (2.3) auch in der Voigt'schen Matrixschreibweise anschreiben [18]:

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

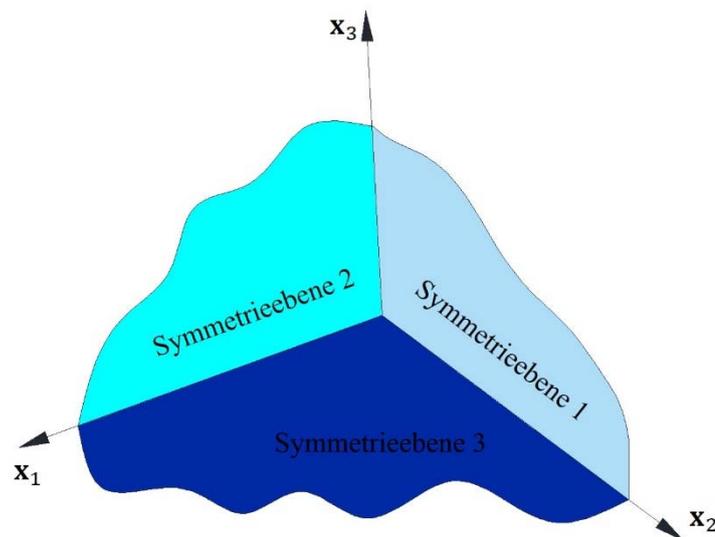
## 2-2.3 ORTHOTROPIE

Durch Aufspannen dreier Symmetrieebenen (vgl. Abbildung 2-11), die senkrecht aufeinander stehen, wird eine Sonderform der allgemeinen Materialbeschreibung erreicht. Diese wird als orthotrope Materialbeschreibung bezeichnet. Das orthotrope Materialverhalten ist nur im Kreuzungspunkt dieser drei Ebenen exakt. Aufgrund der Mikrostruktur von Holz bilden die drei Hauptschnitttrichtungen genau diese Symmetrieebenen (vgl. Abschnitt 2-1.3).

Dies bedeutet, dass Normalspannungen, in Richtung der Haupt- oder Symmetrieachsen wirkend, keine Schubverzerrungen erzeugen. Genauso verursachen Schubspannungen in Richtung der Symmetrieachsen keine Normalverzerrungen. Da die Elastizitätsmatrix (Gleichung (2.7)) symmetrisch ist, folgt:  $S_{ij} = S_{ji}$ . [7, 17, 18]

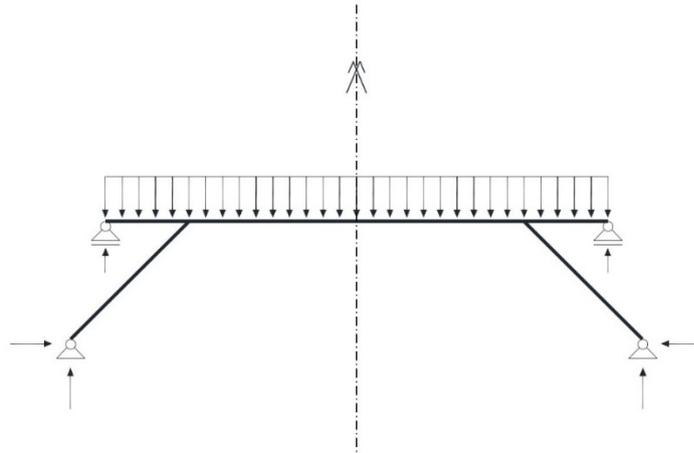
### 2-2.3.1 Materialsymmetrie

Die in Abbildung 2-10 dargestellten Symmetrieebenen in einem Materialpunkt entstehen nur dann, wenn auch die Spannungen und Verzerrungen symmetrisch zu diesen Symmetrieebenen sind. Die Symmetrie der Spannungen und Verzerrungen ist nicht zwingend, und im Allgemeinen auch nicht vorhanden. Die Materialeigenschaften lassen sich aber für diesen Sonderfall sehr anschaulich ableiten. [7]



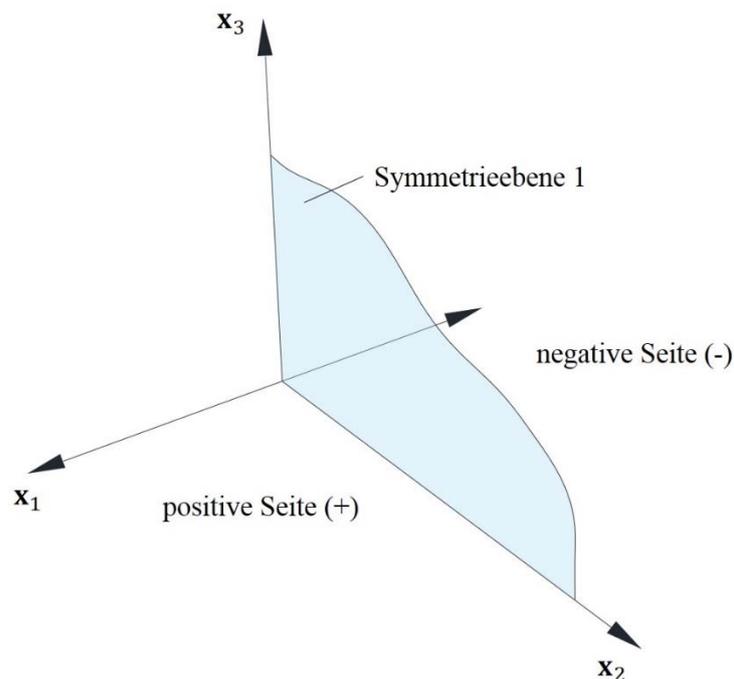
**Abbildung 2-10:** Symmetrieebenen, aufgespannt durch die Normalvektoren  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  (in Anlehnung an [7])

Ähnlich wie bei einem symmetrischen Stabsystem in der Baustatik (vgl. Abbildung 2-11), lassen sich Symmetrieeigenschaften von Spannungen, Verzerrungen und Material darstellen (vgl. Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14). Erst bei Vorliegen eines symmetrischen Systems, einer symmetrischen Belastung und einer symmetrischen Steifigkeitsverteilung (vollkommenen Symmetrie) sind wesentliche symmetriebedingte Vereinfachungen möglich. [7]



**Abbildung 2-11:** *symmetrisches System aus der Baustatik (entnommen aus [7])*

Im Weiteren werden die Auswirkungen einer Symmetrieebene auf die Spannungen und Verzerrungen gezeigt. Diese symmetrischen Spannungen und Verzerrungen ermöglichen Ableitungen zum Materialverhalten. Abbildung 2-12 zeigt beispielhaft die Symmetrieebene 1, welche durch die Einheitsvektoren  $\mathbf{x}_2$  und  $\mathbf{x}_3$  aufgespannt wird.  $\mathbf{x}_1$  stellt dabei den Normalvektor der Symmetrieebenen dar und mit  $-\mathbf{x}_1$  wird die negative Richtung gekennzeichnet. [7]



**Abbildung 2-12:** *Vorzeichendefinition von Symmetrieebene 1 (in Anlehnung an [7])*

### **Vorzeichenregel für Normalverzerrungen**

Abbildung 2-12 zeigt die Vorzeichensituation der Normalverzerrungen bei Annäherung an die Symmetrieebene von der positiven bzw. negativen Seite. [7]

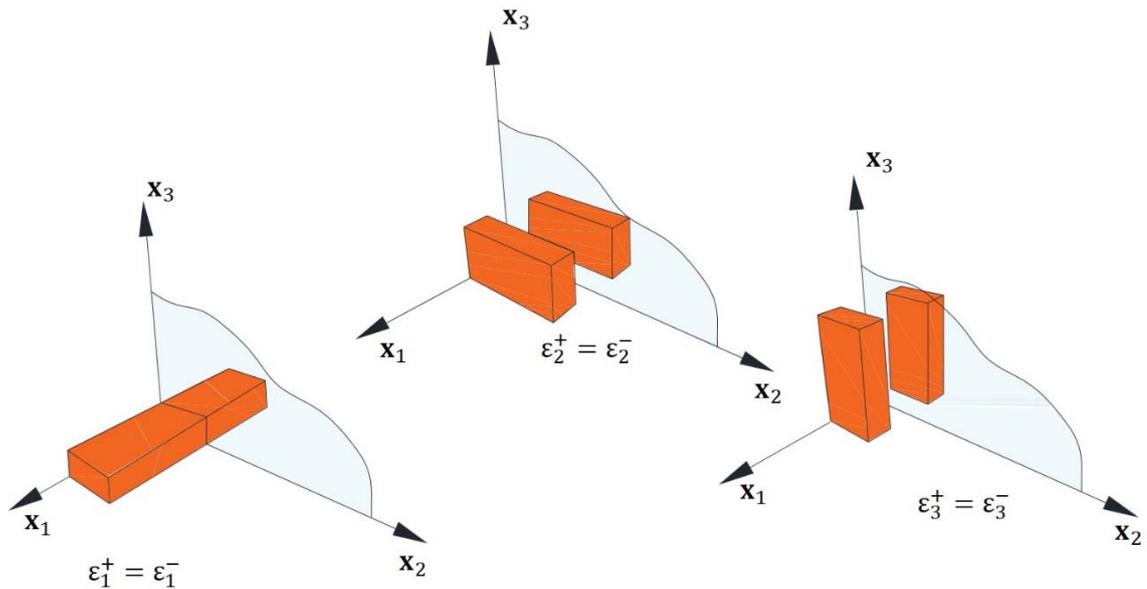


Abbildung 2-13: Vorzeichendefinition der Normalverzerrungen (in Anlehnung an [7])

**Vorzeichenregel für Schubverzerrungen**

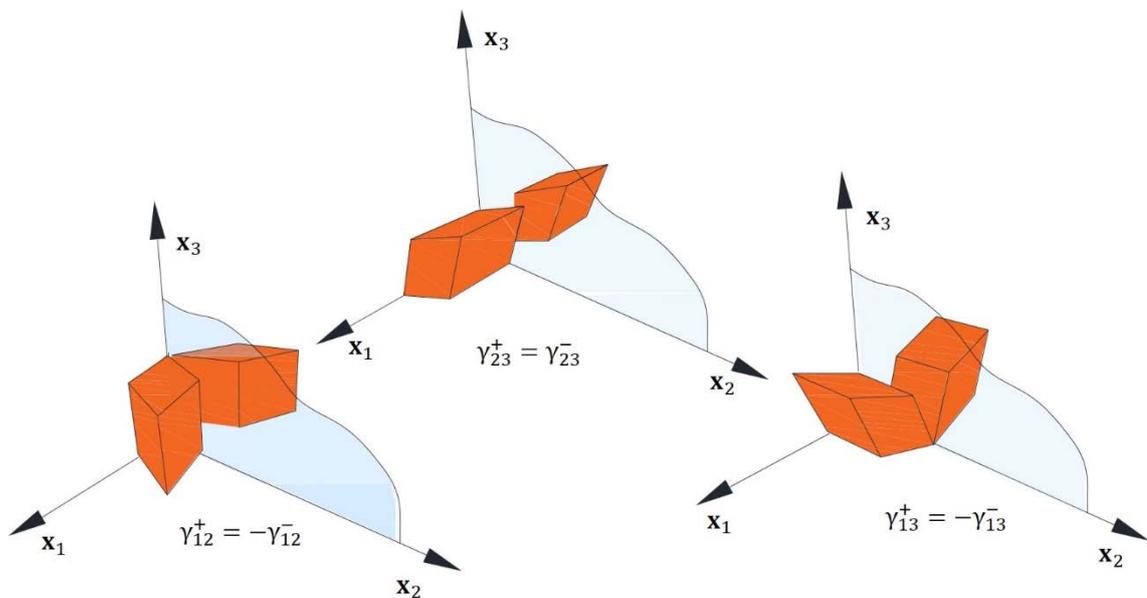


Abbildung 2-14: Vorzeichendefinition der Schubverzerrungen (in Anlehnung an [7])

In Abbildung 2-13 ist die Vorzeichensituation für Schubverzerrungen bei Annäherung an die Symmetrieebene von der positiven bzw. negativen Seite dargestellt. [7]

Durch diese orthotropen Eigenschaften, vereinfacht sich die Gleichung (2.7) zu: [17, 18]

$$\begin{pmatrix} \epsilon_T \\ \epsilon_L \\ \epsilon_R \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \\ \tau_{TL} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Die noch übrigen Einträge der Matrix werden auch Ingenieurkonstanten genannt, mit diesen das Materialverhalten von Holz vereinfacht beschrieben werden kann. Diese sind:

Die Elastizitätsmoduln  $E$  ( $E_T$ ,  $E_L$ ,  $E_R$ ), Schubmoduln  $G$  ( $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$ ,  $G_{RT}$ ) und die sechs Querdehnzahlen  $\nu$  ( $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{TR}$ ,  $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{LT}$ ,  $\nu_{RL}$ ,  $\nu_{RT}$ ). Diese werden wie folgt berechnet:

$$E_T = 1/s_{11}; \quad G_{LR} = 1/s_{44}; \quad \nu_{TL} = -s_{21}/s_{11} \quad (2.9)$$

Durch zyklisches Vertauschen der Indizes erhält man aus Gleichung (2.9) die übrigen Parameter. Bei der Übernahme von Literaturwerten ist auf die richtige Bezeichnung der Indizes Acht zu geben, da Last- und Querkontraktionsrichtung manchmal vertauscht angegeben werden. Bei den Querdehnzahlen  $\nu_{ij}$  dürfen im Gegensatz zu den Elastizitätszahlen  $s_{ij}$  die Indizes nicht vertauscht werden ( $s_{ij} = s_{ji}$  aber  $\nu_{ij} \neq \nu_{ji}$ ) [18]

Von diesen 12 Materialkonstanten sind nur neun unabhängig. Es bestehen die Beziehungen:

$$\begin{aligned} \frac{\nu_{LR}}{E_L} &= \frac{\nu_{RL}}{E_R} \\ \frac{\nu_{LT}}{E_L} &= \frac{\nu_{TL}}{E_T} \\ \frac{\nu_{RT}}{E_R} &= \frac{\nu_{TR}}{E_T} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Somit müssen nur neun Konstanten gemessen werden, und die übrigen drei lassen sich aus den Gleichungen (2.10) berechnen. Dies bringt große Vorteile, da die Querdehnungen der Orientierungen  $\nu_{TL}$  und  $\nu_{RL}$  sehr klein sind und dadurch vergleichsweise schwer messbar. Nach [19] werden diese wie folgt berechnet:

$$\nu_{RL} = \nu_{LR} \frac{E_R}{E_L}; \quad \nu_{TL} = \nu_{LT} \frac{E_T}{E_L} \quad (2.11)$$

Weitere Anforderungen an die Elastizitätsmatrix sind:

- sie muss positiv definit sein, d.h. ihre Determinante muss größer Null sein [18]

$$\det S = (s_{11}s_{22}s_{33} + 2s_{12}s_{13}s_{23} - s_{12}^2s_{33} - s_{13}^2s_{22} - s_{23}^2s_{11})s_{44}s_{55}s_{66} > 0 \quad (2.12)$$

- sie muss die Kompressibilitätsbedingungen erfüllen. Das bedeutet, dass der Werkstoff bei hydrostatischem Druck sein Volumen beibehalten, oder verringern, jedoch nicht vergrößern kann. Daraus folgt: [18]

$$s_{11} + s_{22} + s_{33} + 2(s_{12} + s_{13} + s_{23}) > 0 \quad (2.13)$$

- analog zu isotropen Werkstoffen kann man eine Poisson'sche Konstante  $\mu_k$  definieren und aus Gleichung (2.13) folgende Forderung ableiten: [18]

$$\mu_k := -\frac{s_{12} + s_{13} + s_{23}}{s_{11} + s_{22} + s_{33}} < \frac{1}{2} \quad (2.14)$$

## 2-2.4 QUERDEHNZAHL $\nu$

Die dimensionslose Querdehnzahl oder auch Poisson-Zahl  $\nu$  (in der Literatur oft auch  $\mu$ ), beschreibt das Verhältnis der Querdehnung zur Längsdehnung eines Materials bei einachsiger Zug- oder Druckbeanspruchung (vgl. Abbildung 2-15).

$$\nu = -\frac{e_d}{e_l} = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.15)$$

Die Querdehnzahl ist vom Widerstand eines Materials gegen Volumenänderung abhängig. Abbildung 2-15 zeigt die schematische Darstellung der Dehnungen am Beispiel eines axial beanspruchten Rundstabes mit isotropen, homogenen Materialverhalten.

Dabei ist  $l$  die Länge des Stabes und  $d$  sein Durchmesser,  $\Delta l$  und  $\Delta d$  sind die Dehnungen bzw. Einschnürungen des Stabes. Eine Querdehnzahl von  $\nu = 0$  bedeutet eine maximal mögliche Volumenänderung und  $\nu = 0,5$  bedeutet keine Volumenänderung [20]

Bei stark anisotropen Hölzern, wie z.B. Fichte, kann es vorkommen, dass einzelne Querdehnzahlen größer als 0,5 sind. Dies stellt nach [1] kein Problem dar, solange Gleichung (2.14) erfüllt ist.

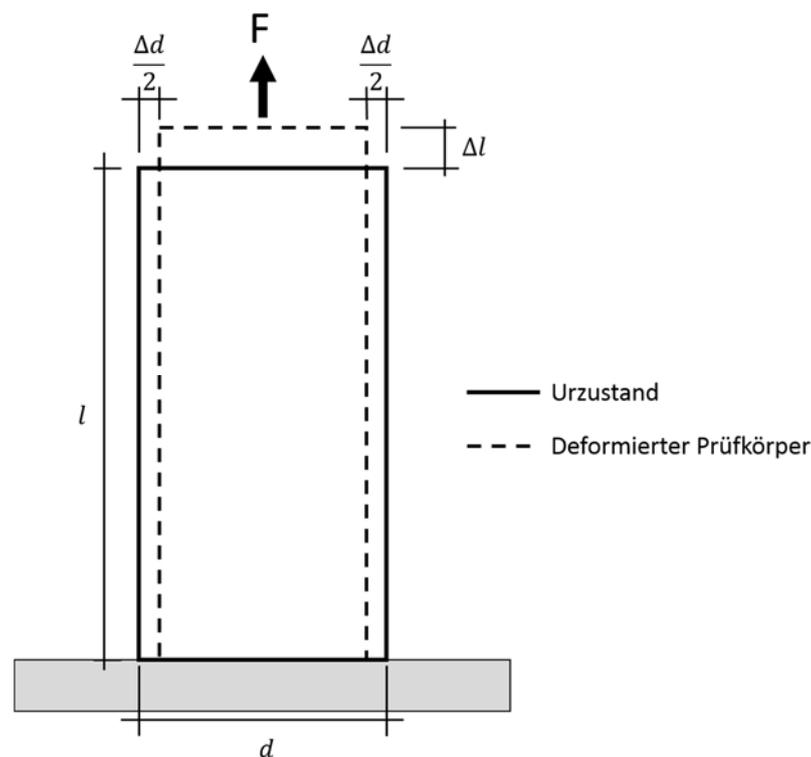
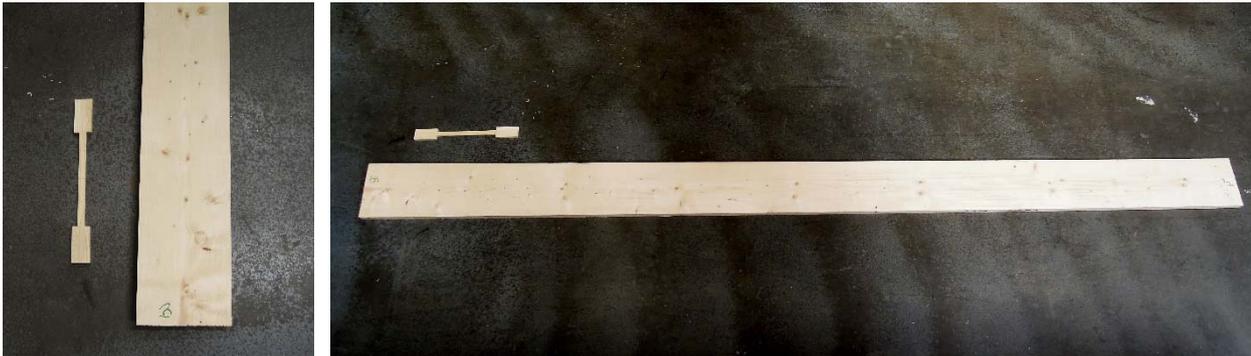


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung der Dehnungen bei einaxialem Zug (in Anlehnung an [21])

## 2-2.5 UNTERSCHIED ZWISCHEN DER MATERIALPRÜFUNG UND DER BAUTEILPRÜFUNG

Da Holz nicht gleich Holz ist, muss bei der Prüfung von Holz und Holzprodukten klar zwischen den verschiedenen Größenordnungen (Strukturebenen) des Holzes oder gar einzelner Bestandteile des Holzes unterschieden werden. So kann z. B. eine einzelne Cellulosefaser eine Zugfestigkeit von rund 8.000 N/mm<sup>2</sup> aufweisen, „fehlerfreies“ Holz bis zu 100 N/mm<sup>2</sup> und Holz in Bauteilgröße ca. 10 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 2-16 bzw. Abschnitt 2-2.5.1 und 2-2.5.2). Dies begründet sich dadurch, dass mit steigenden Abmessungen auch die Häufigkeit von Strukturstörungen und die dadurch verursachten Streuungen anwachsen und somit auch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden.



**Abbildung 2-16:** Gegenüberstellung von Kleinstproben (Normzugprobe) und Proben in Bauteilgröße

Unter Strukturstörungen versteht man z. B. Äste, Harzgallen, schrägverlaufende Faserorientierung, und andere Fehlstellen. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde intensiv an einer Homogenisierung von Holz gearbeitet. Durch diesen Schritt entstanden „Engineered Wood Products“, also Holzwerkstoffe mit verbesserten, oder besser genutzten mechanischen Eigenschaften für die technische Nutzung. Erst durch diesen Schritt gelang es, Holz nicht nur als stabförmiges Bauteil, sondern auch als Flächenelement zu nutzen. Trotzdem sollte darauf geachtet werden, die Lastabtragung nach der natürlichen Struktur, also in Faserlängsrichtung, anzuwenden, um das natürliche Potential auch nutzen zu können. [7]

### 2-2.5.1 Clear Wood

Unter „Clear Wood“ versteht man fehlerfreie Kleinproben. Die Abmessungen für den Biegeversuch betragen in Anlehnung an [22]:  $b = h = 20 \pm 1$  mm und für den Zugversuch nach [23]:  $b = 20$  mm und  $h = 6$  mm (vgl. Abbildung 2-16 kleine Zugprobe). Nach [24] haben die würfelförmigen Proben für den Druckversuch eine Seitenlänge von  $a = 20$  mm.

### 2-2.5.2 Full-scale specimen

Mit „full-scale specimen“ werden Prüfkörper in Bauteilgröße bezeichnet. Für deren Abmessungen gibt es in den Prüfnormen keine definierten Vorgaben, wohl aber über Verhältnismaße für die Prüfkfiguration. Die charakteristischen Werte der Biege-, Zug- und Druckprüfungen sind bei Vollholz auf eine Referenzhöhe  $h = 150$  mm bzw. Referenzbreite  $b = 150$  mm zu beziehen. Bei Brettschichtholz gilt eine Referenzhöhe von  $h = 600$  mm und eine Referenzbreite von  $b = 150$  mm. [7]

### 2-2.5.3 Gegenüberstellung von Kleinproben und Proben in Bauteilgröße und Ursachen der Differenz zwischen ihnen

Tabelle 2-4 zeigt eine Gegenüberstellung von Festigkeitswerten von Kleinproben und Proben in Bauteilgröße. Man kann erkennen, dass die Kennwerte, die aus fehlerfreiem Holz ermittelt wurden, nicht zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Holzbauprodukten geeignet sind. Als Ursache für diese Abweichungen sind sogenannte Strukturstörungen (Wuchsmerkmale) sowie Verarbeitungsmerkmale zu nennen. [7]

## **Strukturstörungen und Wuchsmerkmale**

Unter Strukturstörungen versteht man z. B.

- Astigkeit,
- Schrägfasrigkeit,
- Reaktionsholz,
- Jahrringstellung,
- Splint und Kern,
- Harzstellen und Harzgallen,
- Risse,
- Pilze,
- usw.

**Tabelle 2-4:** Gegenüberstellung von Festigkeitswerten von Kleinproben und Proben in Bauteilgröße [25, 26]

Kennwert (Mittelwerte)		Kleinproben	Proben in Bauteilgröße	Differenz (bezogen auf Kleinproben)
<b>Biegefestigkeit</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	68	35	49 %
<b>Zugfestigkeit parallel zur Faser</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	80	24	70 %
<b>Druckfestigkeit parallel zur Faser</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	40	32	20 %

## **Produktionsbedingte Merkmale**

Diese entstehen vor allem durch den Einschnitt des natürlich optimierten Baustammes in prismatische Körper. Dadurch werden Holzfasern angeschnitten, was speziell bei Ästen zu großen Festigkeitsverlusten führt. Daraus resultiert eine Senkung der Festigkeitskenngrößen um bis zu 50 %, außerdem steigt die Streuung der mechanischen Kenngrößen bei Schnittholz deutlich an. [7]

## **2-3 STAND DER HOLZFORSCHUNG**

Seit Voigt [27] im Jahr 1928 mit seinem Werk „Lehrbuch der Kristallphysik“ die elementaren Grundlagen und Werkzeuge zur Untersuchung anisotroper Festkörper lieferte, befassten sich vor allem Physiker wie Horig [1, 28, 29], der in Deutschland wichtige Publikationen zwischen 1935 und 1943 veröffentlichte, mit dem allgemeinen, elastischen Materialverhalten und benutzte für seine Versuche vorwiegend Holz. Im Folgenden werden die Literaturwerke, welche für die Vergleiche herangezogen wurden, chronologisch vorgestellt.

Horig hat die Ergebnisse von Stamer [5] ausgewertet und auf anisotropes bzw. orthotropes Materialverhalten untersucht. Die Untersuchungen von Stamer [5] waren hauptsächlich am Elastizitätsverhalten verschiedener Holzarten, sowie am Zusammenhang von Elastizitätsmodul ( $E$ ) und Drillungsmodul ( $G$ , andere Bezeichnung für den Schubmodul) interessiert. Seine Arbeit umfasste mehrere Holzarten, doch sind nur die Kennwerte der Versuche mit Fichtenholz für die hier vorliegende Arbeit herangezogen worden. Stamer führte Druckversuche an prismatischen Probekörpern mit den Abmessungen von ca.  $l \times b \times h = 150 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$  durch. Die Prüfkörper waren nach den drei Hauptachsen orientiert und wiesen eine Feuchte von rund  $u = 10 \%$  auf. Die Rohdichte ist mit  $\rho_L = 463 \text{ kg/m}^3$  für Prüfkörper in Längsrichtung,  $\rho_R = 423 \text{ kg/m}^3$  für radiale und  $\rho_T = 458 \text{ kg/m}^3$  für tangentielle Prüfkörper als Mittelwert angegeben. Über die Anzahl an Versuchen gibt es in der vorliegenden Literatur keine Angaben. Die Messung der Stauchung wurde mit Martensschen Spiegelapparaten vollzogen. Für die Messung der Querdehnungen hat sich Stamer den Messapparaten von H. Sieglerschmidt [30] bedient. Nach den Druckversuchen hat Stamer die Probekörper zylindrisch abgedreht und mittels des Torsionsversuches den Drillungsmodul bestimmt. Das Abdrehen war wegen der einfacheren Auswertung des Kreisquerschnittes von Torsionsversuchen notwendig. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2-5 abgebildet.

1960 veröffentlichte Krabbe [2] seine Dissertation, in der er Untersuchungen zu Gleit- und Dehnungszahlen von Fichtenholz anstellte. Für die Prüfung kamen Probekörper aus Fichten- und Buchenholz zum Einsatz. Weiter wird nur auf die Ergebnisse der Fichtenholzprüfungen näher eingegangen. Für die Herstellung der Probekörper wurden ca. 35 cm lange Stammscheiben aufgespalten und aus den Schalenstücken Würfel mit einem Format von ca.  $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$  gefertigt. Diese Würfel wurden aneinander geklebt um die Prüfkörper für die jeweilige Orientierung zu erhalten. Die Fichtenprüfkörper wiesen im Mittel eine Rohdichte von  $\rho = 425 \text{ kg/m}^3$  und eine Feuchte von ca.  $u = 12 \%$  auf. Die Prüfkörper wurden Torsionsbelastungen (14 Stk. je Orientierung) und Biegebelastungen (5 Stk. mit radialer Hauptrichtung, 4 Stk. mit longitudinaler Hauptrichtung und 4 Stk. mit tangentialer Hauptrichtung) unterworfen, wobei keine direkte Messung der Querdehnzahlen durchgeführt wurde. Stattdessen hat Krabbe versucht eine von Voigt [27] für die Kristallphysik entwickelte Rechenmethode auf die Messungen seiner Holzprüfkörper anzuwenden. Diese wurden aber aufgrund zu großer Streuung der Ergebnisse verworfen. Daher sind nur die Elastizitätszahlen  $s_{11}$ ,  $s_{22}$  und  $s_{33}$  in Tabelle 2-5 dargestellt.

Die Probekörper der Untersuchungen von Wommelsdorff [4] wurden, ähnlich wie bei Krabbe, aus Stammscheiben entnommen. Die Probekörper wurde auf eine endgültige Dimension von  $20 \times 20 \times 80 \text{ mm}^3$  formatiert und es wurden an ihnen Lasteinleitungshölzer angeklebt. Die Gesamtlänge betrug 200 mm Es wurden zehn Probekörper pro Belastungsrichtung (T, L, R) für die Holzart Fichte hergestellt, wovon sechs geprüft wurden. Obwohl alle Prüfkörper vom selben Stamm entnommen wurden, waren Schwankungen der Jahrringbreite von  $a_{w, \min} = 0,8 \text{ mm}$  bis  $a_{w, \max} = 2,2 \text{ mm}$  festzustellen. Weitere Angaben über die Rohdichte sind der Arbeit von Wommelsdorff nicht zu entnehmen. Die Probekörper wurden nacheinander zuerst auf Zug und danach auf Biegung auf selbst gebauten Prüfgeräten belastet. Da auch der Einfluss der Holzfeuchte untersucht werden sollte, wurden dieselben Probekörper mit Holzfeuchten von 8,5 %, 13,7 % und 19,2 % geprüft. Für den Literaturvergleich dieser Arbeit wurden die Ergebnisse der Feuchteklasse 13,7 % herangezogen. Die Dehnungsmessung erfolgte mit induktiven Wegmessern. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-5 dargestellt.

Die von Neuhaus [3] 1981 getätigte Arbeit beschäftigte sich ebenfalls mit dem Einfluss der Holzfeuchte auf die Elastizitätszahlen. Er untersuchte acht Feuchtegruppen  $u_1 = 1 \%$ ,  $u_3 = 3 \%$ ,  $u_6 = 6 \%$ ,  $u_{11} = 11 \%$ ,  $u_{14} = 14 \%$ ,  $u_{17} = 17 \%$ ,  $u_{22} = 22 \%$  und  $u_{27} = 27 \%$ . Seine Prüfkörper haben, ähnlich derer Wommelsdorff, eine prismatische Form mit den Abmessungen  $20 \times 20 \times 210 \text{ mm}^3$ . Die Prüfkörper in Längsrichtung wurden aus einem Stück gefertigt, die Prüfkörper für Radial- und Tangentialbelastung wurden wieder aus kleinen Teilstücken, mit einer Länge von ca. 24 mm, verklebt. So entstanden insgesamt 51 Prüfkörper. Davon entfielen 14 Stk für Prüfungen in tangentialer Belastungsrichtung mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_T = 417 \text{ kg/m}^3$ , 20 Stk. in longitudinaler Belastungsrichtung mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_L = 417 \text{ kg/m}^3$  und 17 Stk. in radialer Belastungsrichtung mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_R = 417 \text{ kg/m}^3$ . Die Prüfungen erfolgten auf Zug und auf Torsion. Die Dehnungen wurden mittels induktiver Wegnehmung gemessen. Die Ergebnisse für eine Holzfeuchte von  $u = 12 \%$  sind in Tabelle 2-5 angegeben.

Das Standardwerk von Bodig & Jane [17] aus 1993 beinhaltet die Werte für Elastizitätszahlen aus der Arbeit von Goodman & Bodig [31]. In dieser Arbeit wurden Untersuchungen an den Elastizitätszahlen mit unterschiedlichen Winkeln der Faserrichtung zur Belastungsrichtung durchgeführt. Die Versuche wurden als Druck- und Torsionsversuche ausgeführt. Die Prüfkörper für die Druckprüfungen hatten die Abmessungen von ca.  $127 \times 44,5 \times 44,5 \text{ mm}^3$  und wurden während der Prüfung mit neun elektrischen Wegmessern bestückt. Die Torsionsscheiben hatten die Abmessungen von ca.  $305 \times 305 \times 13 \text{ mm}^3$ . Die Darrdichte (Gewicht der trockenen Darrprobe / Volumen der feuchten Probe) wurde mit einem Mittelwert von  $\rho_{u=0\%} = 322 \text{ kg/m}^3$  für Engelmann Spruce angegeben. Für diese Holzart wurden 147 Druckversuche und 36 Torsionsversuche mit verschiedenen Faserwinkeln durchgeführt. Die gleichen Prüfungen wurden auch noch für Douglasie, Eiche und Espe durchgeführt. Die Werte in Tabelle 2-5 dienen nur zur Vollständigkeit, für die Mittelwerte zum direkten Vergleich mit den Messungen aus der hier vorliegenden Arbeit wurden diese Werte nicht herangezogen, da sich diese Holzsorten zu sehr von der Europäischen Fichte unterscheiden.

Niemz und Caduff [32] führten 2007 Messungen an Fichtenholz durch. Sie bestimmten die E-Moduln in den drei Hauptrichtungen (tangential, längs und radial) und die sechs Querdehnzahlen. Die Geometrie der

Prüfkörper hatte eine Hundeknochenform und der Querschnitt im Messbereich betrug bei den Versuchen in Längsrichtung  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  und bei den Versuchen in Tangential- bzw. Radialrichtung  $20 \times 10 \text{ mm}^2$ . Dabei wiesen die longitudinal Probekörper eine Längen von 220 mm und die tangential bzw. radial Probekörper eine Länge von 55 mm auf. Die Rohdichte wurde als Mittelwert mit  $\rho_T = 415 \text{ kg/m}^3$  für tangentielle Prüfkörper,  $\rho_L = 435 \text{ kg/m}^3$  für longitudinale Prüfkörper und  $\rho_R = 486 \text{ kg/m}^3$  für radiale Prüfkörper mit einer mittleren Feuchte von  $u = 12,1 \%$  angegeben. Die Arbeit umfasst 20 Prüfkörper je Variante, welche auf Zug geprüft wurden. Die Wegmessung erfolgte mit elektronischen, inkrementellen Wegaufnehmern der Firma Zwick in Längsrichtung und mit Tauchankern mit einer Messgenauigkeit von  $0,0015 \text{ mm}$  senkrecht zur Belastungsrichtung. Die Messungen wurden bis zu einer Maximallast von ca.  $30 \%$  der erwarteten Bruchlast durchgeführt. Nach den elastischen Messungen wurde die Zugfestigkeit der Prüfkörper bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 2-5 abgebildet.

Keunecke [33] führte 2007 Versuche an Eiben- und Fichtenholz durch. Die Probekörper hatten an allen vier Seiten, parallel zur Belastungsrichtung, Hundeknochengestalt. Für jede Holzart wurden 45 Prüfkörper, 15 je Hauptrichtung, angefertigt. Danach mussten noch einige aufgrund von Strukturfehlern ausgeschlossen werden. Somit standen 10 Prüfkörper mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_L = 470 \text{ kg/m}^3$  für Messungen in Längsrichtung, 13 Probekörper mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_R = 480 \text{ kg/m}^3$  in radialer Richtung und 11 Prüfkörper mit einer mittleren Rohdichte von  $\rho_T = 460 \text{ kg/m}^3$  in tangentialer Richtung zur Verfügung. Der Feuchtegehalt wurde mit einem Mittelwert von  $u = 12 \%$  angegeben. Der Querschnitt im Messbereich betrug  $14 \times 14 \text{ mm}^2$  und die Messfläche  $14 \times 11 \text{ mm}^2$ . Die Dehnungen während der Zugversuche wurden mit CCD Kameras (Speckle-pattern-Prinzip) durchgeführt. Da nur ein Messsystem zur Verfügung stand, wurde zuerst an einer Seite zwei Belastungszyklen durchgeführt und gemessen und danach wurde die gegenüberliegende Seite ebenfalls zwei Belastungszyklen unterworfen und vermessen. In Tabelle 2-5 sind die Ergebnisse dieser Versuche dargestellt.

Außerdem sind in Tabelle 2-5 Ergebnisse von Kumpenza [34] dargestellt. Diese Arbeit wurde noch nicht veröffentlicht, dennoch hat mir der Autor seine Ergebnisse in Form von Mittelwerten für Vergleichszwecke überlassen.

Im Folgenden werden noch auf weitere Arbeiten zum elastischen Materialverhalten hingewiesen, welche aber keine Vergleichswerte für die hier vorliegende Arbeit beigetragen haben. Diese sind unter anderem:

Die Untersuchungen von Schlüter [35] zum elastischen Verhalten von Fichtenholz. Er führte diese Versuche unter Betreuung von Hörig unter physikalischen Gesichtspunkten durch.

Hearmon [36–38] hat sich ebenfalls mit anisotropen Materialverhalten beschäftigt und hat die angeführten Arbeiten zwischen 1953 und 1964 in England publiziert. Dazu hat er sich am Holz als Prüfmaterial für theoretische als auch experimentelle Untersuchungen bedient. Keylwerth [39] schaffte in seiner Arbeit einen guten Überblick in gesammelter Form.

Besonders zu erwähnen sind die Arbeiten von Kollmann in Form von [12, 40, 41], und noch viele weitere, in denen er sich auf den verschiedensten Teilgebieten der Holzforschung betätigt hat. Auch als Herausgeber der Zeitschrift „Holz als Roh- und Werkstoff“ hat er die Holzforschung vorangebracht.

Weiter haben Lekhnitskii [42] in Russland, Persson [43] in Schweden und Grimsel [18] in Deutschland an der Materialbeschreibung und Parameterstudien gearbeitet.

Als Standardliteratur in der Holzforschung und im Ingenieurholzbau gelten vor allem die Werke von Kollmann [12, 40], Bodig und Jayne [17], Wagenführ [13, 44], und Niemz [26]

Aus der Literaturrecherche geht hervor, dass es nur wenige Untersuchungen zum elastischen Materialverhalten von Fichtenholz gibt und die meisten davon über 70 Jahre zurückliegen. Auch die Messmethodik beruht in den meisten Fällen auf mechanische bzw. elektromechanische Messinstrumente. Daher soll in dieser Arbeit unter anderem der Fragestellung nach der Eignung des ESPI Messsystems für die Bestimmung der Querdehnungen von normalkraftbeanspruchten Kleinproben in Holz nachgegangen werden.

**Tabelle 2-5:** Zusammenfassung der Literaturwerte laut Autoren, Rohdichte- und Feuchtwerte sind Mittelwerte; Zum Vergleich mit den eigenen Messungen sind in der Zeile „Mittelwert“ die Mittelwerte der hier angeführten Literaturwerte abgebildet

Autor	Rohdichte	Feuchte	S <sub>11</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>33</sub>	-S <sub>12</sub>	-S <sub>13</sub>	-S <sub>21</sub>	-S <sub>23</sub>	-S <sub>31</sub>	-S <sub>32</sub>	V <sub>RL</sub>	V <sub>RT</sub>	V <sub>LT</sub>	V <sub>LR</sub>	V <sub>TR</sub>	V <sub>TL</sub>
	[kg/m <sup>3</sup> ]	%	[mm <sup>2</sup> /N]	[mm <sup>2</sup> /N]	[mm <sup>2</sup> /N]	-	-	-	-	-	-						
Bodig and Jane <sup>1)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0410	0,470	0,420	0,370	0,350	0,0330
Keunecke, Niemz	$\rho_T = 460$ $\rho_L = 470$ $\rho_R = 480$	12%	0,00252	0,0000780	0,00160	0,0000350	0,000768	0,0000350	0,0000280	0,000528	0,0000280	0,0175	0,480	0,449	0,359	0,210	0,0139
Niemz, Caduff	$\rho_T = 415$ $\rho_L = 435$ $\rho_R = 486$	12%	0,00221	0,0000870	0,000910	0,0000365	0,000582	0,0000332	0,0000200	0,000741	0,0000327	0,0220	0,640	0,420	0,376	0,335	0,0150
Hörig (Auswertung der Messungen von Stamer)	$\rho_T = 458$ $\rho_L = 465$ $\rho_R = 423$	10%	0,00250	0,0000616	0,00143	0,0000330	0,000600	0,0000330	0,0000270	0,000600	0,0000270	0,0189	0,420	0,532	0,435	0,240	0,0132
Krabbe	-	12%	0,00233	0,0000880	0,000902	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Neuhaus	$\rho = 417$	12%	0,00238	0,0000830	0,00122	0,0000460	0,000732	0,0000840	0,0000680	0,000740	0,0000370	0,0556	0,598	0,554	0,446	0,311	0,0353
Wommelsdorf	-	14%	0,00233	0,0000890	0,00102	0,0000500	0,000598	0,0000650	0,0000500	0,000606	0,0000400	0,0490	0,586	0,561	0,449	0,260	0,0279
Kumpenza <sup>2)</sup>	$\rho_T = 442$ $\rho_L = 473$ $\rho_R = 478$	12%	0,00356	0,0000683	0,000963	0,0000471	0,000656	0,000117	0,000116	0,00246	0,0000482	0,120	0,681	0,690	0,706	0,690	0,0330
Kumpenza <sup>3)</sup>	$\rho_T = 442$ $\rho_L = 473$ $\rho_R = 478$	12%	0,00341	-	0,00103	-	0,000676	0,000140	0,000113	0,00252	-	0,110	0,656	-	-	0,739	0,0410
<b>Mittelwert</b>		12%	0,00266	0,0000793	0,00113	0,00004	0,000659	0,0000725	0,0000603	0,00117	0,0000355	0,0561	0,580	0,534	0,462	0,398	0,0256
<b>Eigene Messungen</b>	$\rho_T = 414$ $\rho_L = 417$ $\rho_R = 409$	12%	0,00206	0,0000749	0,00131	0,00003	0,000971	0,000266	0,000153	0,000851	0,0000424	0,117	0,740	0,458	0,565	0,412	0,129
<sup>1)</sup> Wird bei den Literaturmittelwerten nicht berücksichtigt, dies keine speziellen Werte für Fichte sind <sup>2)</sup> Ergebnisse aus Laserextensometer Messungen in Kombination mit Videoextensometer Messungen <sup>3)</sup> Ergebnisse aus ESPI Messungen <sup>4)</sup> Berechnet nach Bodig und Jayne									0,0000282 <sup>4)</sup>	0,0000518 <sup>4)</sup>		0,0395 <sup>4)</sup>				0,0137 <sup>4)</sup>	

## 2-4 MESSVERFARHEN

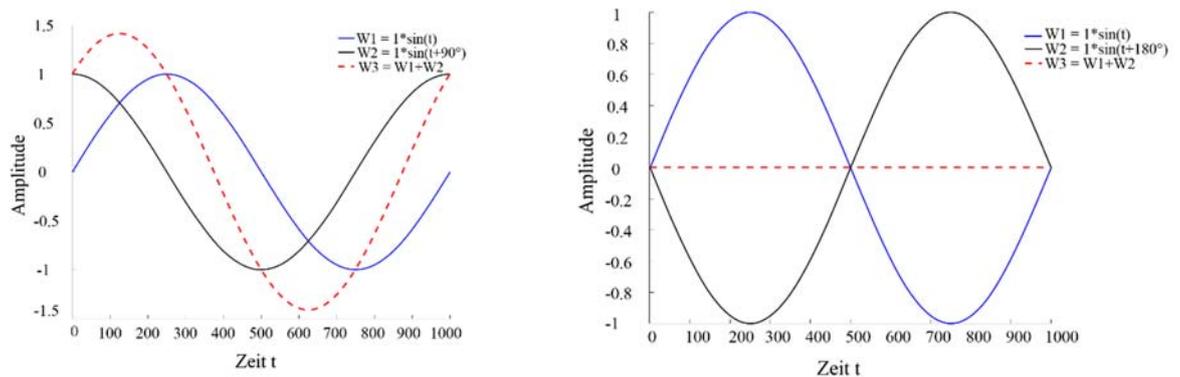
Die Dehnungsmessung der Versuche in diese Arbeit erfolgt mit dem ESPI (electronic speckle pattern interferometry) Messsystem. Dabei werden die von der Messoberfläche reflektierten Lichtwellen eines Laserstrahls interferiert und somit die Verschiebung einzelner Punkte der Messoberfläche gemessen. Die Grundlagen dieses Messsystems werden im folgenden Abschnitt kurz erklärt.

### 2-4.1 EINFÜHRUNG IN DIE KOHÄRENZOPTIK

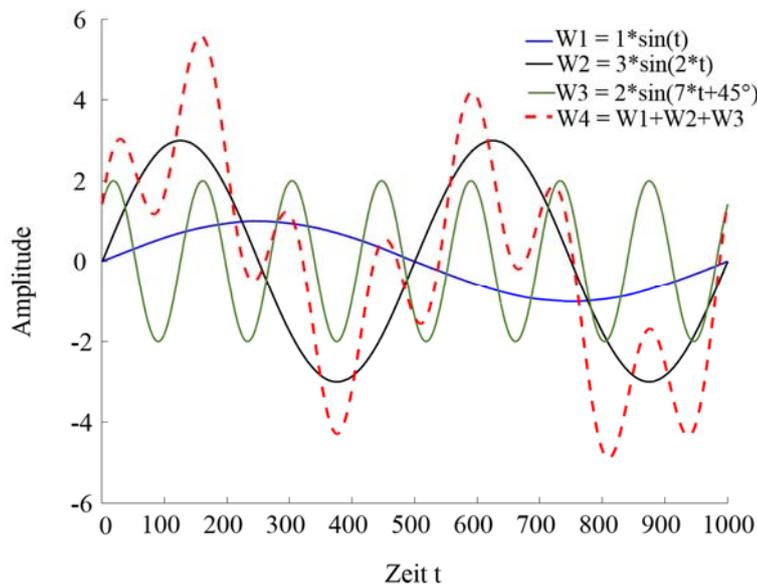
In der Interferometrie werden Informationen über die Konturen eines Objektes in der Phase einer daran gestreuten Lichtwelle gespeichert. Diese Phaseninformation wird durch den Mechanismus der Interferenz zweier Wellen zur Intensitätsinformation transformiert. Eine Kohärenz der beiden Wellen ist Voraussetzung dafür [45].

### 2-4.2 KOHÄRENZ UND INTERFERENZ

Um die Kohärenz einer Lichtquelle zu erklären, muss zuerst der Begriff Interferenz erläutert werden. Unter Interferenz versteht man die Überlagerung oder Superpositionen von Wellen unter Berücksichtigung ihrer Amplituden, Frequenzen und Phasen. Aus den Maxwell'schen Gleichungen geht hervor, dass für Lichtwellen das Prinzip der linearen Superposition gilt. Dies bedeutet, dass sich Lichtwellen unabhängig von weiteren Wellen ausbreiten und man somit das resultierende Wellenfeld durch Vektoraddition der Einzelfelder erhält. Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 zeigen schematisch das Superpositionsprinzip von Wellen. Je nach Vorzeichen der einzelnen Amplituden kann die Addition dieser konstruktiv oder destruktiv sein und somit kann die resultierende Welle größer werden (Addition zweier positiver Wellen (vgl. Abbildung 2-17 links)), oder ausgelöscht werden (eine positive Welle addiert mit einer negativen Welle (vgl. Abbildung 2-17 rechts)).



**Abbildung 2-17:** Superposition von Wellen; links: Addition von Wellen mit unterschiedlichen Phasen (konstruktive Überlagerung); rechts: Auslöschung durch Addition von zwei Wellen, die genau um  $180^\circ$  verschoben sind (destruktive Überlagerung)



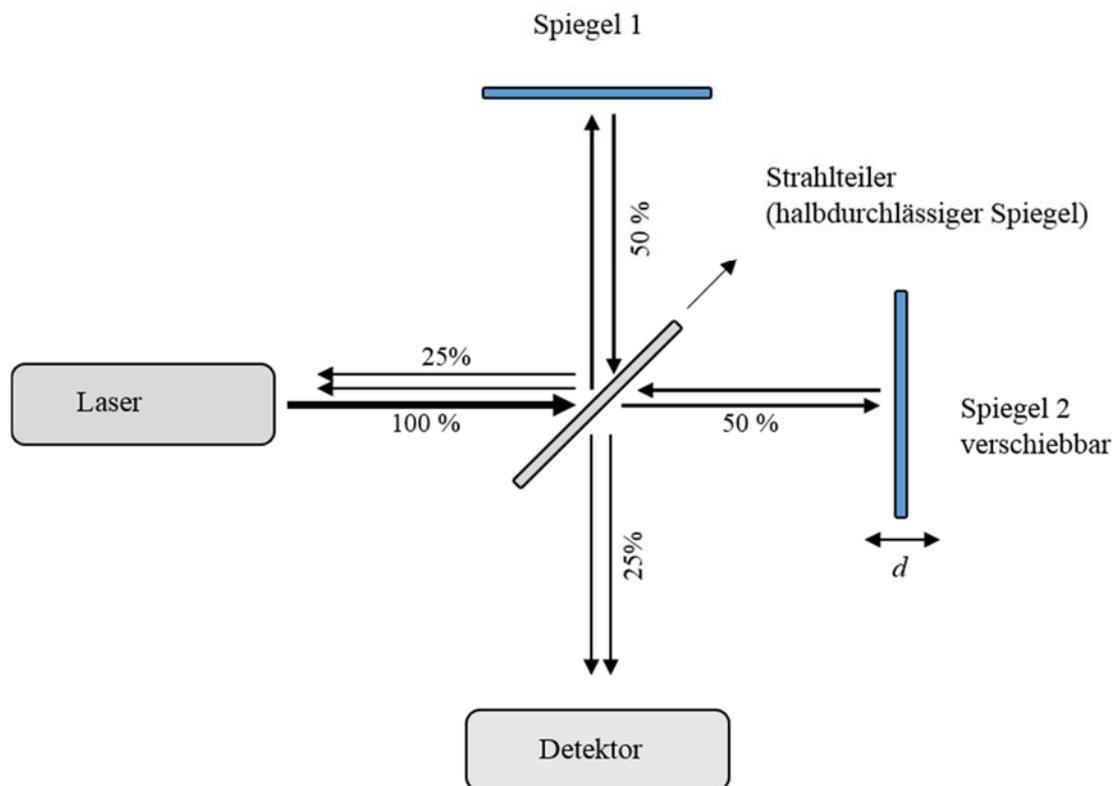
**Abbildung 2-18:** Addition von Wellen mit verschiedenen Amplituden, Frequenzen und Phasen

Unter Kohärenz versteht man eine zeitliche konstante Phasendifferenz. Licht, das von einer völlig monochromatischen Lichtquelle (= einfarbiges, sichtbares Licht) abgegeben wird, entspricht einer unendlich langen Sinuswelle. Laser kommen solchen Lichtquellen am nächsten. Dagegen besteht Licht, z.B. aus Gasentladungsröhren, aus Wellenpaketen, die nur einige Millionen Wellenlängen enthalten, welche ungefähr gleich lang sind. Die Länge eines solchen Wellenpaketes nennt man Kohärenzlänge, und die Zeitspanne, in der es einen bestimmten Raumpunkt durchschreitet, heißt Kohärenzzeit. Die Kohärenzlänge einer solchen Gaslampe beträgt nur einige Millimeter. Stabile Laser, so wie sie in der Forschung und Industrie eingesetzt werden, haben dagegen Kohärenzlängen von mehreren Kilometern. [21]

### 2-4.3 MICHELSON INTERFEROMETER

Das Michelson Interferometer gilt als Grundlage der Speckle – Messungen. Der schematische Aufbau sieht wie folgt aus (vgl. Abbildung 2-19):

- monochromatisches Licht (= Licht mit nur einer Wellenlänge → Laser),
- zwei vollständig reflektierende Spiegel,
- ein halbdurchlässiger Spiegel und
- ein Detektor

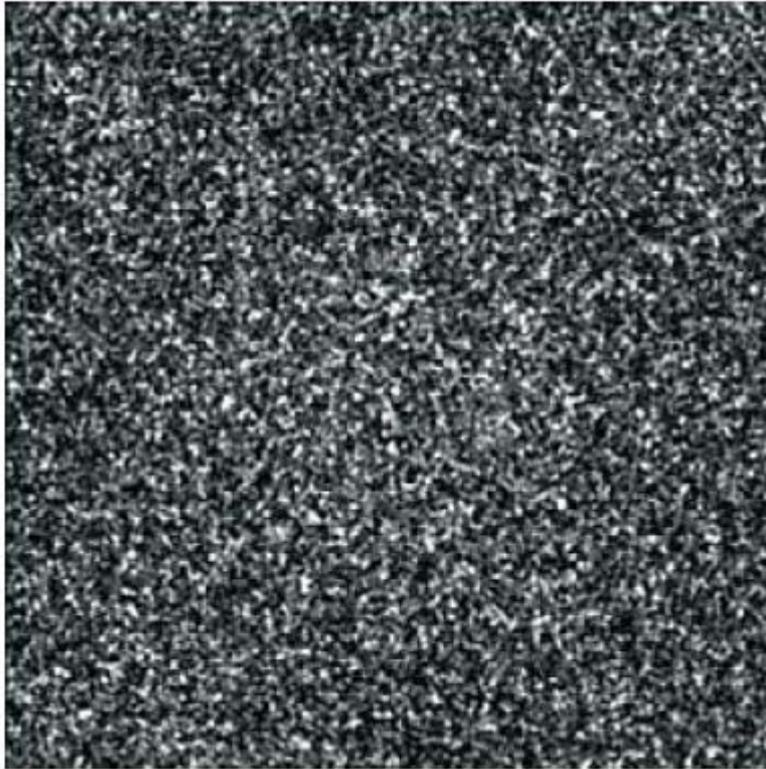


**Abbildung 2-19:** schematische Darstellung eines Michelson – Interferometers (in Anlehnung an [45])

Das Licht eines Lasers fällt auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Dort wird der Lichtstrahl geteilt und wird zu 50 % an Spiegel 1 abgeleitet und zu 50 % zu Spiegel 2 durchgelassen. Die zwei Spiegel reflektieren die Lichtstrahlen komplett und führen sie wieder zum Strahlteiler. Dort wird wieder jeder Lichtstrahl geteilt. Eine Hälfte jedes Strahls wird in die freie Umgebung geleitet und die andere Hälfte in den Detektor. Wenn die Wege vom Strahlteiler zu beiden Spiegeln exakt gleich sind, entsteht bei der Interferenz im Detektor ein Maximum. Durch Verschieben eines Spiegels um die Länge  $d$  wechselt das Interferenzmuster zwischen Maximum und Minimum. Der Phasenunterschied zwischen diesen Zuständen ist genau eine Wellenlänge  $\lambda$ . Damit ergibt sich der Verschiebeweg  $d$  von  $\lambda/2$  (aufgrund von Hin- und Rückweg des Lichtstrahles). [45]

## 2-4.4 SPECKLE INTERFEROMETRIE

Bei der Speckle Interferometrie handelt es sich um ein optisches Messverfahren, das die optische Rauheit von Oberflächen nutzt. Eine Fläche wird als optisch rau bezeichnet, wenn die Unebenheiten die Größe einer Wellenlänge aufweisen oder noch größer sind. Das heißt, dass für gebräuchliche Laser mit einer Wellenlänge von einigen hundert Nanometern muss die Rauigkeit ca. einen Mikrometer oder mehr betragen. Kohärentes Licht, das auf die Oberfläche gestrahlt wird, wird an den einzelnen unebenen Objektelementen gestreut, interferiert im Raum und bildet Speckle-Muster. Diese Muster weisen ein granulartiges Aussehen auf und sind mit freiem Auge sichtbar. Abbildung 2-20 zeigt ein solches Speckle Bild. Die meisten natürlichen oder mit Werkzeugen behandelten Festkörperoberflächen erfüllen die Anforderungen einer Speckle – Messung. [46]



*Abbildung 2-20: Speckle Bild [47]*

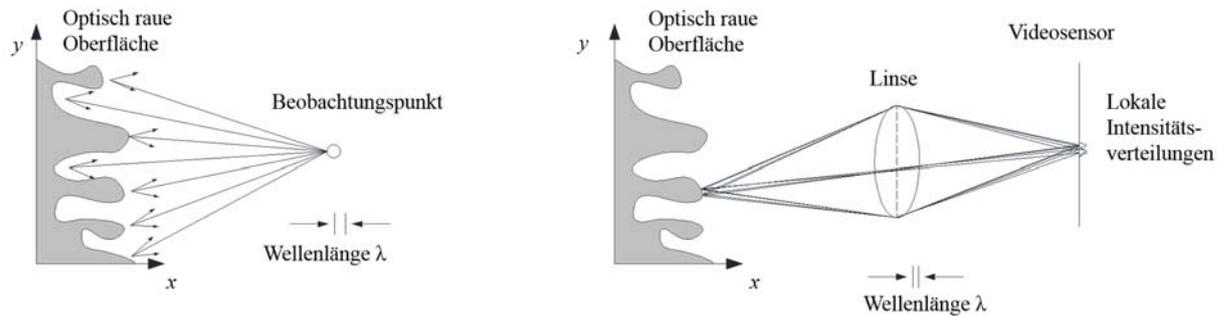
Die Grundlage dieser Messung ist das zuvor genannte Michelson-Interferometer (vgl. Abschnitt 2-4.3 und Abbildung 2-19). Dabei wird der verschiebbliche Spiegel durch das Messobjekt ersetzt. Dies führt zu zwei grundlegende Eigenschaften dieses Messverfahrens. Diese sind die große Messempfindlichkeit und die Moduliertheit der Messinformation. Verschiebungen können daher nur bis auf ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge bestimmt werden. [48, 49]

$$d = \frac{\lambda}{2} m \quad m \in \mathbb{N} \quad (2.16)$$

Durch die Entwicklung von Kleinrechnern mit hoher Rechenleistung hat die Speckle-Interferometrie vor allem in der Industrie an Bedeutung gewonnen. So können nicht nur Deformationen mit einer Genauigkeit von bis zu 10 nm erzielt, sondern auch die Messung von Schwingungen realisiert werden. Dennoch sind noch einige Probleme dieses Systems zu lösen. Dies sind unter anderem der Kontrast und die Qualität der Interferenzstreifen, sowie die Filterung und Auswertung der Streifenmuster. [48, 49]

Im messtechnischen Verfahren wird der subjektive Speckle – Effekt ausgenutzt. Dieser entsteht bei der fokussierten optischen Abbildung einer kohärent beleuchteten, optisch rauen Oberfläche. Beim objektiven Speckle-Muster tragen die Streuzentren des gesamten Messbereichs zur Interferenz in jedem einzelnen Bildpunkt bei. Dies wird schematisch in Abbildung 2-21 (links) dargestellt.

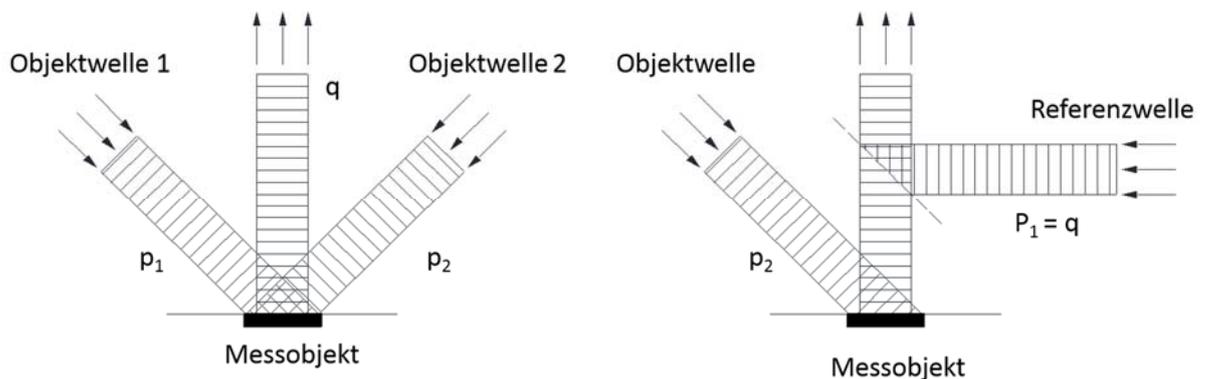
Zum subjektiven Speckle-Effekt liefern nur die in unmittelbarer Nähe des Objektpunktes liegenden Streuzentren einen Beitrag zur Interferenz im zugeordneten Bildpunkt (vgl. Abbildung 2-21, rechts). [48]



**Abbildung 2-21:** Entstehungsprinzip des Speckle-Effekts; links: objektiver Speckle-Effekt; rechts: subjektiver Speckle-Effekt (in Anlehnung an [46])

### 2-4.4.1 Verschiebungsmessung mittels Speckle-Interferometrie

Mittels des Michelson - Interferometer wurde gezeigt, dass zwei kohärente monochromatische Lichtwellen für die Verschiebungsmessung interferiert werden müssen. Es werden bei der Speckle Messung zwei Verfahren unterschieden. Zum einen das „Out of plane“ Verfahren (zur räumlichen Messung (vgl. Abbildung 2-23 rechts)), bei dem eine Objektwelle mit einer Referenzwelle interferiert wird und zum anderen das „In plane“ Verfahren (zur Messung in der Ebene, vgl. Abbildung 2-23, links), bei dem zwei vom Messobjekt diffus reflektierte Wellen überlagert werden.



**Abbildung 2-22:** Grundprinzip der Beleuchtungssituation; links: In-plane-Verfahren; rechts: out-of-plane-Verfahren (in Anlehnung an [46])

In Abbildung 2-23 stellen  $p_i$ ,  $i = 1, 2$ ; Einheitsvektoren der Beleuchtungsrichtung und  $q$  einen Einheitsvektor der Beobachtungsrichtung dar. Für den Fall einer in-plane-Messung zeigt Abbildung 2-24 für die Verschiebung  $u$  eines Messpunktes  $P$  nach  $P'$  die Phasenänderung einer einzelnen Lichtwelle:

$$\delta_i = \phi'_i - \phi_i = (l'_i - l_i)k \quad i = 1, 2 \quad (2.17)$$

In Gleichung (2.17) bedeuten  $\phi'_i$  bzw.  $\phi_i$  die Phase der  $i$ -ten Welle im Beobachtungspunkt  $Q$  und  $l'_i$  bzw.  $l_i$  den zurückgelegten Lichtweg nach bzw. vor der Verschiebung. Die Kreiswellenzahl ist definiert mit  $k = 2\pi/\lambda$ . Die Änderung des Lichtweges einer einzelnen Lichtwelle  $i$ , hervorgerufen durch die Verschiebung  $u$ , ergibt sich entsprechend Abbildung 2-23 als Summe zweier Teilstrecken – der beiden Projektionen von  $u$  in die Richtung  $p_i$  und  $q$  – zu:

$$l'_i - l_i = \mathbf{u} p_i + (-\mathbf{u} q) = (\mathbf{p}_i - \mathbf{q}) \mathbf{u} \quad i = 1, 2 \quad (2.18)$$

Am Beobachtungspunkt Q stellt man aufgrund der Verschiebung  $\mathbf{u}$  eine Änderung der Interferenzphase  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2 = \Delta\phi' - \Delta\phi$  der beiden interferierenden Lichtwellen fest. Durch Einsetzen der Gleichung (2.18) in Gleichung (2.17) erhält man die Interferenzphase mit:

$$\Delta\delta = k(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)\mathbf{u} \quad (2.19)$$

Mit der im Allgemeinen nicht ganzzahligen Interferenzordnung

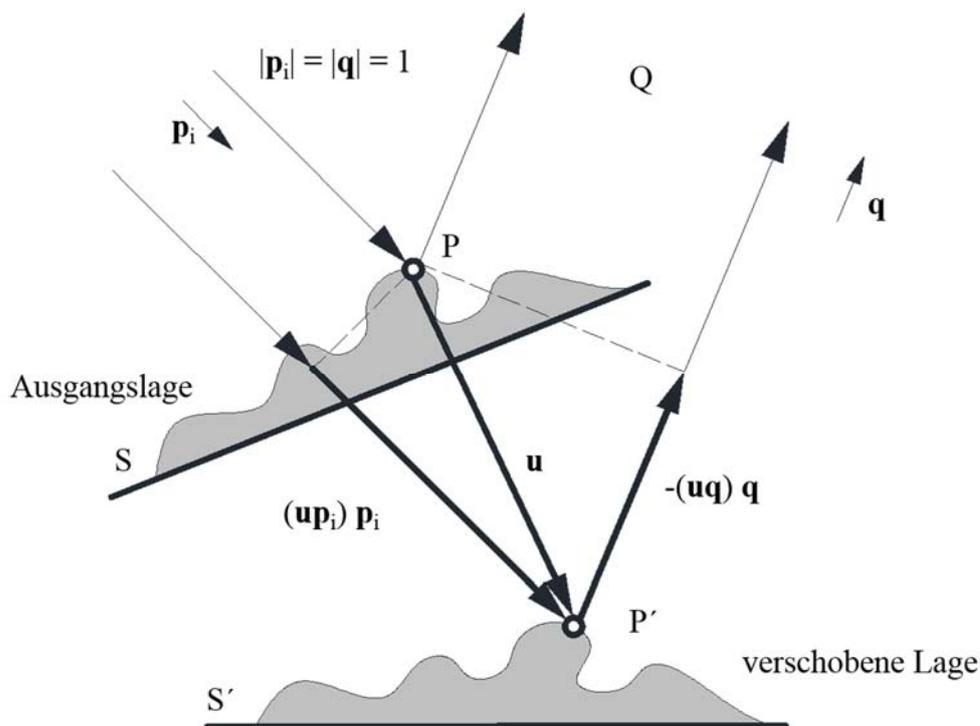
$$N = \frac{\Delta\delta}{2\pi} \quad (2.20)$$

und der Definition des Sensitivitätsvektors  $\mathbf{s}$  zu

$$\mathbf{s} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2 \quad (2.21)$$

ergibt sich die Gleichung der Speckle-Interferometrie unter Berücksichtigung von  $2\pi/k = \lambda$  zu

$$N\lambda = \mathbf{s}\mathbf{u} \quad (2.22)$$



**Abbildung 2-23:** Änderung des Lichtweges aufgrund einer Verschiebung  $\mathbf{u}$  (in Anlehnung an [46])

Gleichung(2.22) zeigt die Komponente des Verschiebungsvektors  $\mathbf{u}$  in Richtung des Sensitivitätsvektors  $\mathbf{s}$  als Vielfaches der Lichtwellenlänge  $\lambda$ . Obwohl hier die Gleichung (2.22) für das in-plane Verfahren hergeleitet wurde, gilt diese auch für das out-of-plane Verfahren, wenn man  $\mathbf{p}_1 = \mathbf{q}$  setzt.

Wie in Gleichung (2.21) zu sehen ist, ist die durch den Sensitivitätsvektor  $\mathbf{s}$  gegebene Messrichtung eines optischen Messaufbaus durch die Beobachtungsrichtung  $\mathbf{q}$  bzw. den Beleuchtungsrichtungen  $\mathbf{p}_1$  und  $\mathbf{p}_2$  vorgeben.

Um die räumliche Verschiebung einer Oberfläche eines Messobjektes berührungslos zu bestimmen, benötigt es mindestens drei Messungen mit linear unabhängigen Sensitivitätsvektoren  $\mathbf{s}_j, j=1, 2, 3$ .

Bei realen Messungen, wo ein aufgeweiteter Lichtstrahl das Messobjekt beleuchtet und  $\mathbf{s}_j$  somit vom Messpunkt  $\mathbf{P}(\mathbf{r})$  abhängig ist, tritt bei dreidimensionalen Verschiebungsmessungen [46, 48]

$$N_j \lambda = \mathbf{s}_j(\mathbf{r}) \mathbf{u}(\mathbf{r}) \quad j = 1, 2, 3 \quad (2.23)$$

anstelle von Gleichung (2.22).



**Abbildung 2-24:** Sensitivitätsvektor; links: in-plane Verfahren; rechts: out-of-plane Verfahren (in Anlehnung an [46])

### **Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI)**

Die primäre Messaufgabe besteht in der punktwisen Messung der Änderung der Interferenzphase  $\Delta\delta$  bzw. der Streifenordnung  $N_j$ . Die Specklekamera liefert digital aufgelöste Intensitätsverteilungen. Aus diesen Interferogrammen lassen sich die gesuchten Verteilungen der Änderungen der Interferenzphasen  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  bestimmen. Mit den Grundlagen der Wellenlehre, Amplitude, Phasenwinkel und Intensität, werden die Grundlagen des Phasenschiebverfahrens zur computergestützten quantitativen Berechnung der Interferenzphase aus Intensitätsmessungen erklärt. [46, 48]

Zwei linear polarisierte elektromagnetische Wellen mit den Amplituden

$$a_i(\mathbf{r}, t) = a_i^{(0)}(\mathbf{r}) \sin[\omega t + \phi_i(\mathbf{r})], \quad i = 1, 2 \quad (2.24)$$

und der Kreisfrequenz  $\omega$  interferieren am Ort  $\mathbf{r}$ . Die Amplitude der Interferenzwelle erhält man durch Addition zu

$$a(\mathbf{r}, t) = a_1(\mathbf{r}, t) + a_2(\mathbf{r}, t). \quad (2.25)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (2.25) in den Ausdruck für die Intensität

$$\bar{I}(\mathbf{r}) = |a(\mathbf{r}, t)|^2 \quad (2.26)$$

erhält man nach Einführung der so genannten Interferenzphase

$$\Delta\phi(\mathbf{r}) = \phi_2(\mathbf{r}) - \phi_1(\mathbf{r}) \quad (2.27)$$

die grundlegende Beziehung zwischen der Intensität  $\bar{I}$  und der zu bestimmenden Interferenzphase  $\Delta\phi$  am Ort  $\mathbf{r}$  zu

$$\bar{I}(\mathbf{r}) = H(\mathbf{r}) [1 + V(\mathbf{r}) \cos(\Delta\phi(\mathbf{r}))]. \quad (2.28)$$

In Gleichung (2.28) bezeichnen  $H(\mathbf{r})$  und  $V(\mathbf{r})$  die so genannte Hintergrundaussleuchtung und die Kontrastvariation am Ort  $\mathbf{r}$  einer Intensitätsverteilung. Die Definitionen dieser erstmals Unbekannten Größen lauten:

$$\begin{aligned}
 H(\mathbf{r}) &= [a_1^{(0)}(\mathbf{r})]^2 + [a_2^{(0)}(\mathbf{r})]^2, \\
 V(\mathbf{r}) &= \frac{2a_1^{(0)}(\mathbf{r})a_2^{(0)}(\mathbf{r})}{[a_1^{(0)}(\mathbf{r})]^2 + [a_2^{(0)}(\mathbf{r})]^2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Im Allgemeinen weisen Intensitätsmessungen einen elektronischen Rauschanteil  $R_E(\mathbf{r})$  und einen durch den Speckle-Effekt selbst verursachten Rauschanteil  $R_S(\mathbf{r})$  auf. Mit

$$I(\mathbf{r}) = R_E(\mathbf{r}) + R_S(\mathbf{r})\bar{I}(\mathbf{r}) \tag{2.30}$$

lassen sich die Störungen als Definition für die an einem Intensitätssensor gemessene Intensitätsverteilung berücksichtigen. Durch Einsetzen des Ausdrucks aus Gleichung (2.28) für die von der Interferenzerscheinung herrührende Intensitätsverteilung in Gleichung (2.30) resultiert

$$I(\mathbf{r}) = R_E(\mathbf{r}) + R_S(\mathbf{r})H(\mathbf{r})[1 + V(\mathbf{r})\cos(\Delta\phi(\mathbf{r}))]. \tag{2.31}$$

Durch Zusammenfassen der additiven Terme aus Gleichung (2.31) folgt

$$a(\mathbf{r}) = R_E(\mathbf{r}) + R_S(\mathbf{r})H(\mathbf{r}) \tag{2.32}$$

und der multiplikativen

$$b(\mathbf{r}) = R_S(\mathbf{r})H(\mathbf{r})V(\mathbf{r}). \tag{2.33}$$

Dann kann die gemessene Intensität in Abhängigkeit von den unbekanntem  $a(\mathbf{r})$  und  $b(\mathbf{r})$  und der gesuchten Interferenzphase  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  mit

$$I(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) + b(\mathbf{r})\cos(\Delta\phi(\mathbf{r})) \tag{2.34}$$

dargestellt werden.

Die Interferenzphase  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  ist aus Gleichung (2.34) auf Grund der Mehrdeutigkeit der Kosinusfunktion

$$\cos[\Delta\phi(\mathbf{r})] = \cos[\pm\Delta\phi + 2\pi m], \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots, \tag{2.35}$$

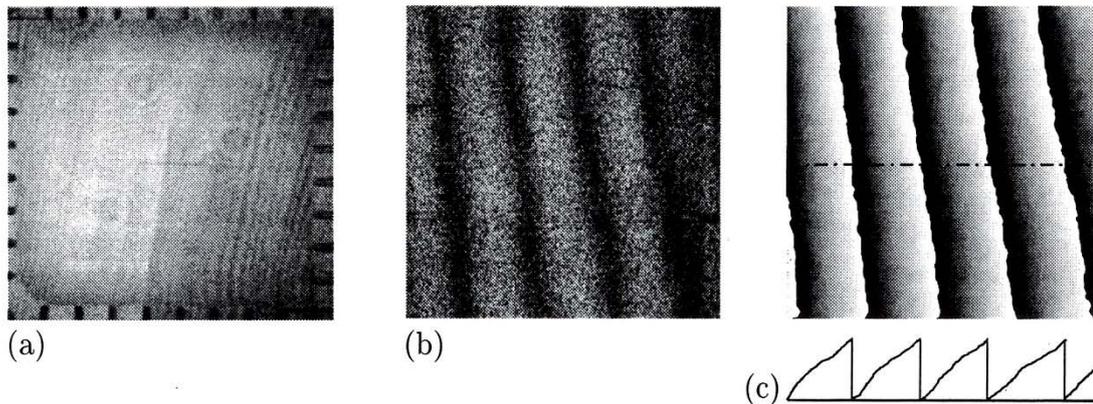
nur bis auf ein additives ganzzahliges Vielfaches von  $2\pi$  und bis auf das Vorzeichen bestimmbar. Man erhält sie zu

$$\Delta\phi^*(\mathbf{r}) = \Delta\phi(\mathbf{r}) \bmod(2\pi) = \arccos\left[\pm \frac{I(\mathbf{r}) - a(\mathbf{r})}{b(\mathbf{r})}\right]. \tag{2.36}$$

Abgesehen von dieser Moduliertheit der Messinformation ist die durch Verschiebung eines betrachteten Punktes  $\mathbf{u}$  verursachte Änderung der Interferenzphase (siehe Abbildung 2-25, b))

$$\Delta\delta^*(\mathbf{r}) = \Delta\delta(\mathbf{r}) \bmod(2\pi) = \Delta\phi'(\mathbf{r}) - \Delta\phi(\mathbf{r}) \tag{2.37}$$

und damit die Streifenordnung  $N_j$  entsprechend der Gleichung (2.20) bestimmbar. [46, 48]



**Abbildung 2-25:** Messfeld ( $140 \times 140 \text{ mm}^2$ ) eines Holzprobekörpers (entnommen aus Eberhardsteiner [48]); a): Speckle-Interferogramm, b): Interferenzstreifen c): moduliertes Phasenbild

### Phasenschiebeverfahren

Um die Mehrdeutigkeit bei der Bestimmung der Interferenzphase zu beseitigen und den Einfluss von Störungen während der Messung zu verhindern, bedient man sich der Methode von wiederholten Messungen mit bestimmt veränderten Parametern. Durch beliebige, aber bekannte zusätzliche Änderungen  $\alpha_1$  der Interferenzphase  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  vor den einzelnen Intensitätsmessungen  $l = 1, 2, \dots, L$ , wird dies beim so genannten Phasenschiebeverfahren erreicht. Die Phasenänderungen  $\alpha_1$  werden durch piezoelektrisch geführte Spiegel erreicht. Die folgende mathematische Beschreibung dieses Vorganges entstammt aus den Arbeiten von Gingerl und Eberhardsteiner [48].

Für jeden Verschiebungszustand misst man  $L$  Intensitätsverteilungen. Diese lauten entsprechend Gleichung (2.34)

$$I_1(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) + b(\mathbf{r}) \cos(\Delta\phi(\mathbf{r}) + \alpha_1), \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (2.38)$$

Auf diese Art erhält man für jeden Messpunkt  $P(\mathbf{r})$  ein aus  $L$  algebraischen Gleichungen bestehendes nichtlineares Gleichungssystem. Mit den Substitutionen

$$u(\mathbf{r}) = b(\mathbf{r}) \cos(\Delta\phi(\mathbf{r})) \quad \text{und} \quad v(\mathbf{r}) = -b \sin(\Delta\phi(\mathbf{r})) \quad (2.39)$$

lässt sich das in Gleichung (2.38) genannte Gleichungssystem auch zu

$$I_1(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) + u(\mathbf{r}) \cos(\alpha_1) + v(\mathbf{r}) \sin(\alpha_1) \quad (2.40)$$

anschreiben. Um die gesuchten Größen  $u(\mathbf{r})$ ,  $v(\mathbf{r})$  und damit Interferenzphase  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  zu bestimmen, benötigt man mindestens drei Messungen mit bekannten zusätzlichen Phasenverschiebungen  $\alpha_1$ . Somit ist  $L > 3$ .

Für höhere Auswertegenauigkeiten bei nicht idealen Messbedingungen ist die Wahl von  $L = 4$  oder  $L = 5$  von Vorteil. Die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems (2.40) wird mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch Bestimmung des Minimums der Funktion

$$q[a(\mathbf{r}), u(\mathbf{r}), v(\mathbf{r})] = \sum_{l=1}^L [a(\mathbf{r}) + u(\mathbf{r}) \cos(\alpha_l) + v(\mathbf{r}) \sin(\alpha_l) - I_l(\mathbf{r})]^2, \quad L \geq 3 \quad (2.41)$$

vollzogen. Nullsetzen der partiellen Ableitungen von  $q$  nach  $a(\mathbf{r})$ ,  $u(\mathbf{r})$ ,  $v(\mathbf{r})$

$$\frac{\partial q(a,u,v)}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial q(a,u,v)}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial q(a,u,v)}{\partial v} = 0 \quad (2.42)$$

liefert drei Bestimmungsgleichungen für die unbekanntenen Größen  $a(\mathbf{r})$ ,  $u(\mathbf{r})$ ,  $v(\mathbf{r})$ . Mit der Gleichung (2.39) bekommt man die Interferenzphase  $\Delta\phi(\mathbf{r})$  bis auf ganzzahlige Vielfache von  $2\pi$  zu

$$\Delta\phi^*(\mathbf{r}) = \Delta\phi(\mathbf{r}) \bmod(2\pi) = -\arctan \frac{v(\mathbf{r})}{u(\mathbf{r})}. \quad (2.43)$$

Wie zuvor besprochen, spricht man hier von modulierter Messinformation.

$\Delta\phi^*(\mathbf{r})$  erhält man z.B. für  $L = 3$  ( $l=1, 2, 3$ ) und Wahl von  $\alpha_1 = (1-1)\pi/2$  zu

$$\Delta\phi^*(\mathbf{r}) = \arctan \frac{I_1(\mathbf{r}) - I_3(\mathbf{r})}{I_1(\mathbf{r}) - 2I_2(\mathbf{r}) + I_3(\mathbf{r})} \quad (2.44)$$

oder für  $L = 5$  ( $l=1, 2, 3, 4, 5$ ) und Wahl von  $\alpha_1 = (21-1)\pi/4$

$$\Delta\phi^*(\mathbf{r}) = \arctan \frac{4I_1(\mathbf{r}) - I_2(\mathbf{r}) - 6I_3(\mathbf{r}) - I_4(\mathbf{r}) - 4I_5(\mathbf{r})}{7I_4(\mathbf{r}) - 7I_2(\mathbf{r})} \quad (2.45)$$

Die Änderung der gesuchten, von der Verschiebung  $\mathbf{u}$  verursachten, Interferenzphase erhält man zu:

$$\Delta\delta^*(\mathbf{r}) = \Delta\delta(\mathbf{r}) \bmod(2\pi) = \Delta\phi'(\mathbf{r}) - \Delta\phi(\mathbf{r}). \quad (2.46)$$

In Abbildung 2-25, c) ist ein typisches Ergebnis einer ESPI-Messung nach dem Phasenschiebepverfahren ( $L=5$ ) zu sehen. Durch punktweise Anwendung der Gleichungen (2.43) und (2.46) entsteht das dargestellte Phasenbild. Das Sägezahnmuster der Intensitätsverteilung im Schnitt durch das Phasenbild ist ein Indikator für ein qualitativ gutes Auswertergebnis.

### 2-4.4.2 Fehlerquellen bei ESPI-Messungen

Mit dem ESPI-Messsystem lassen sich kontaktlos Verschiebungen und Dehnungen im Mikrometerbereich messen. Die Messempfindlichkeit dieses Systems liegt in der Größenordnung eines Bruchteils der verwendeten Lichtwellenlänge. Die tatsächliche Messgenauigkeit für die räumliche Deformationsanalyse ist jedoch wesentlich geringer. Dafür sind mehrere verschiedenartige Einflüsse verantwortlich. Einige davon sind unvermeidbar, andere können dagegen bis zu einem bestimmten Ausmaß verringert bzw. bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt werden. Somit soll eine Verfälschung der Messergebnisse vermieden werden [46, 48].

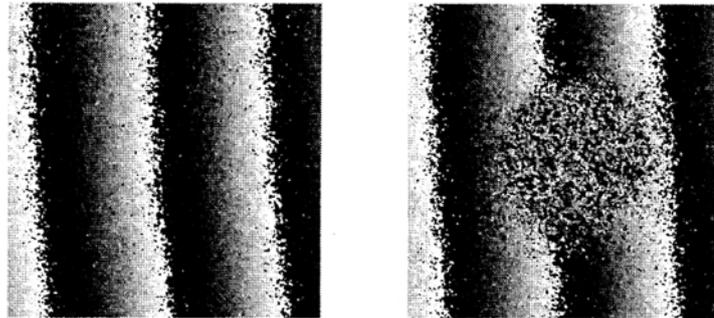
#### Fehlereinflüsse und Störungen während einer Messung

Wie Gingerl in [46] ausführlich beschreibt, können während der Messung eine Vielzahl von zum Teil unvermeidbaren Problemsituationen auftreten. Diese sind zum Teil sehr komplex und nicht genau quantifizierbar. Die wichtigsten Fehler- und Störungsquellen nach [46] werden folgend zusammengefasst:

- **Inkohärenz und gestörte Monochromasie:** Durch zu lange Lichtwege bzw. instabile Laseraufhängung kann die zeitliche und räumliche Kohärenz (vgl. Abschnitt 2-4.2) der Beleuchtungsstrahlen verloren gehen.
- **Depolarisation:** Bei stark glänzenden bzw. spiegelnden Messoberflächen tritt eine teilweise oder vollständige Depolarisation eines Objektstrahls bei der Remission von der Messoberfläche auf. Dies führt durch einen Kontrastverlust zu einer qualitativen Verschlechterung des Messsignals.
- **Rauscheinflüsse:** Aufgrund langer Signalwege bzw. mangelhafter elektrischer Abschirmung der Signalleitungen, können die Messsignale mit einem elektronischen Rauschanteil überlagert

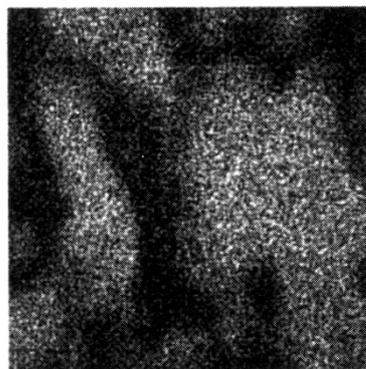
werden. Dies kann zwar mit Filteralgorithmen kompensiert werden, doch stellen diese Filter selbst wiederum Fehlerquellen dar.

- **Speckle-Dekorrelation:** Veränderungen in der Mikrostruktur der Messoberfläche durch chemische, thermische oder mechanische Einwirkung sind Auslöser für eine völlige oder teilweise Speckle-Dekorrelation. Darunter versteht man den Verlust der Vergleichbarkeit übereinstimmender Speckle-Interferogramme vor und nach einem Lastschritt. Häufigste Ursache sind Mikrorisse an der Oberfläche oder das Verdampfen von Lösungsmitteln bzw. lose Partikel von Oberflächenbeschichtungen zur Verbesserung der Remissionseigenschaften dunkler Messflächen. Weiter Ursachen für eine Speckle-Dekorrelation können große Starrkörperbewegungen oder große Verformungen des Messobjektes darstellen.



**Abbildung 2-26:** Modulo- $2\pi$ -Phasenbild; links: ungestörte Aufnahme; rechts: deutlich erkennbare Dekorrelation [46]

- **Schwingungseinflüsse:** Solche Einflüsse können aus Verkehrseinrichtungen, Luftzirkulation, oder Vibrationen der Belastungseinrichtung und dergleichen entstehen und führen zum einen zu Relativbewegungen zwischen dem Messobjekt und der Messeinrichtung und zum anderen zu Vibrationen der strahlführenden optischen Komponenten. Diese Einflüsse können zum völligen Kontrastverlust im Messergebnis führen und sind daher problematisch. Durch geeignete Maßnahmen (z.B. entkoppelte Aufhängung zwischen Mess- und Belastungssystem, schwingungsgedämpfte Lagerung des Messsystems, sowie Erhöhung der Anzahl der Phasenschiebungen für eine Messung von  $L=3$  auf  $L=4$  oder  $L=5$ ) können Schwingungseinflüsse eindämpfen.
- **Luftschlieren durch Wärmekonvektion:** Bei hydraulischen Belastungseinrichtungen können, durch die Wärmeabstrahlung der bis zu  $60\text{ °C}$  heißen Ölleitungen, nicht-stationäre und turbulente Luftströmungen im Bereich des Probekörpers auftreten und Lichtbrechungen verursachen. Diese sind während der Messung durch Auftreten von Schlieren in den Echtzeitbildern bemerkbar. Bei der vorliegenden Arbeit stellte dieses Phänomen keine Probleme dar, da die Belastungseinrichtung mechanisch betrieben und der Versuchsraum klimatisiert war.



**Abbildung 2-27:** Schlierenbildung bedingt durch Wärmekonvektion [46]

- **Inhomogene Beleuchtungsintensität:** Ungleiche Strahlteilung und ungünstige Strahlaufweitung, hervorgerufen durch Beugungseffekte auf Grund verunreinigter optischer Komponenten oder durch lokale Reflexionen, führen zu lokalen Störungen der Homogenität der Beleuchtungsintensität und sind daher zu vermeiden.
- **Phasenschiebefehler:** Fehlfunktionen der Piezospiegeln bzw. Fehler bei der Kalibrierung der Piezospiegeln verursachen Phasenschiebefehler. Dies führt dazu, dass der gleichmäßige Intensitätsverlauf zwischen den Intensitätsmaxima nicht mehr gegeben ist. Das bedeutet den Verlust der Sägezahnstruktur in den demodulierten Streifenbildern und somit eine unmöglich Auswertung.

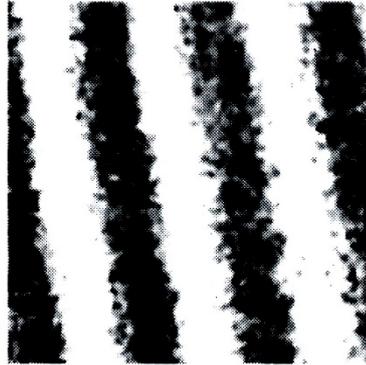


Abbildung 2-28: Phasenschiebefehler in einem Modulo- $2\pi$ -Phasenbild [46]

- **Abbildungsfehler:** Wie auch bei anderen optischen Geräten können bei der fokussierten Abbildung von Messflächen folgende bekannte Fehler auftreten:
  - sphärische Aberration (Öffnungsfehler)
  - Koma,
  - Astigmatismus („Punktlosigkeit“),
  - Bildfeldwölbung (Krümmung der Bildebene),
  - Distorsion (kissen- oder tonnenförmige Verzerrung des Bildes).

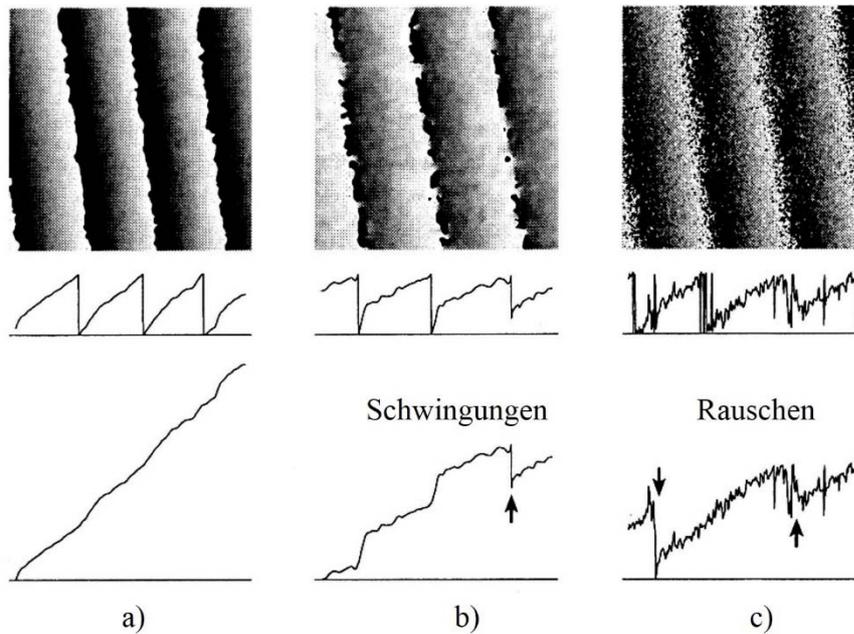
Diese Fehler werden in der Literatur nur sehr wenig behandelt. Dennoch ist klar, dass Abbildungsfehler zu einer entsprechenden geometrischen Verzerrung der flächenhaften Messergebnisse führen.

- **Detektorfehler:** Eine nichtlineare Verarbeitung der Lichtintensität in eine elektrische Spannung durch einen Detektor kann Fehler bei der Evaluierung der Phasenänderung verursachen. Dieser Fehler führt besonders dann zu markanten Problemen, wenn er von Bildpunkt zu Bildpunkt im CCD-Sensor einer Videokamera nicht in derselben Weise auftritt.

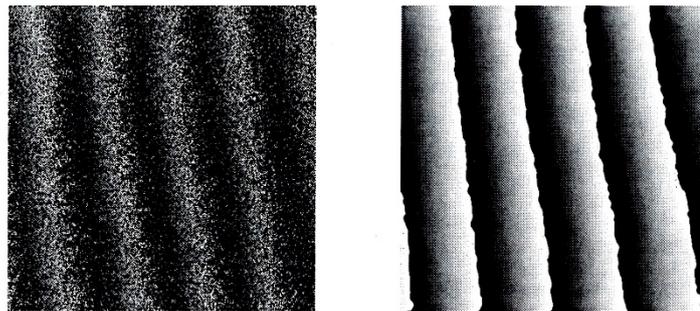
### Fehler und Ungenauigkeiten in der Auswertung

Neben den zuvor behandelten Problemquellen während der Messung, gibt es auch für die automatische Auswertung einige Gesichtspunkte, auf die besonders geachtet werden muss. Diese hat Gingerl in [46] umfassend beschrieben und werden folgend zusammengefasst:

- **Demodulationsfehler:** Die Demodulation der Phasenbilder ist der kritische Teil der automatisierten ESPI-Auswertung (vgl. Abbildung 2-29). Das Hauptproblem liegt in der fehlerfreien algorithmischen Erkennung der Phasensprünge. Abbildung 2-29 (a) zeigt eine sehr gute Streifenstruktur, dagegen sind in Abbildung 2-29 (b) bzw. Abbildung 2-29 (c) fehlerbehaftete Demodulationen, welche zu Messinformationsverlust führen, erkennbar. Hilfestellung bieten geeignete Bildverarbeitungsfilter. Diese verringern einerseits den Rauschanteil und verbessern andererseits durch Hervorheben der Intensitätssprünge die Sägezahnstruktur. Abbildung 2-30 links zeigt ein Phasenbild mit schwacher und Abbildung 2-30 rechts ein Phasenbild mit starker Filterung. Allerdings kann bei zu starkem Einsatz von Filtern die Auswertung beeinflusst und damit das Messergebnis verfälscht werden.

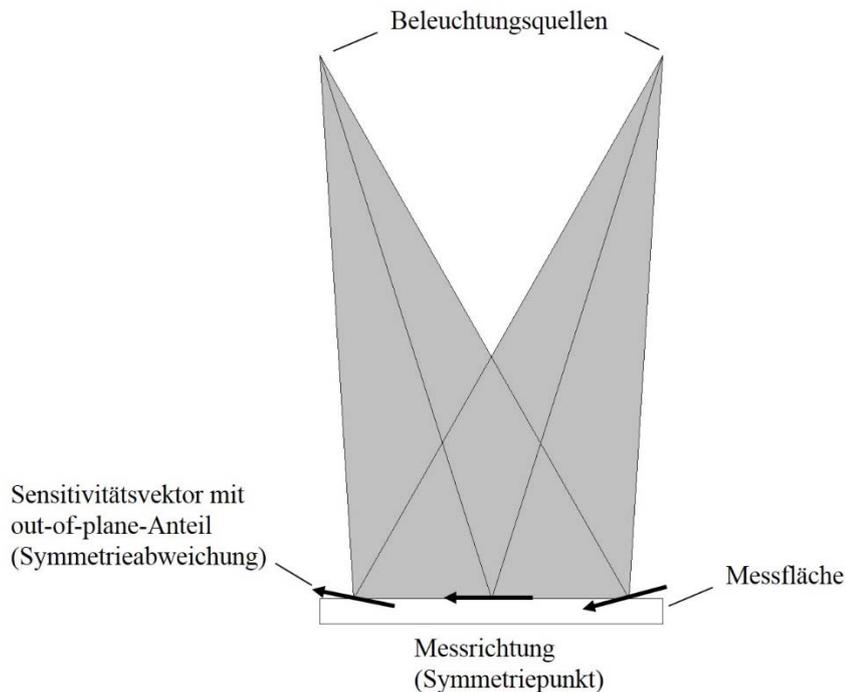


**Abbildung 2-29:** Darstellung einer a) fehlerfreien und b) bzw. c) fehlerhaften Demodulation [46]



**Abbildung 2-30:** Moduliertes Phasenbild; links: schwache Filterung; rechts: starke Filterung [46]

- Systematische Auswertefehler auf Grund vereinfachter Messungen:** Zur exakten Auswertung einer räumlichen Deformation einer Messfläche sind drei unabhängige Messinformationen und die Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der Sensitivitätsvektoren  $s_j(\mathbf{r})$  nötig. Abbildung 2-31 zeigt die schematische Darstellung einer in-plane-Messung in eine Messrichtung und die Richtungsänderung des Sensitivitätsvektors in Abhängigkeit vom Ort auf der Messfläche aufgrund der divergenten Beleuchtung. Dies lässt erkennen, dass bei einer in-plane-Messung speziell die Randbereiche sehr empfindlich gegenüber out-of-plane-Verformungen sind. Eine ausführliche Beschreibung dieses Effekts ist in [46] dargestellt.



**Abbildung 2-31:** *In-plane-Aufbau, Messempfindlichkeit gegenüber der Out-of-plane-Richtung (in Anlehnung an [46])*

- **Geometriefehler:** Darunter versteht man die Einflüsse auf ein Messergebnis, die durch ungenaue Angaben der geometrischen Parameter des Messaufbaus entstehen. Diese Parameter sind unter anderem die Lage der Beleuchtungsquellen und des Beobachtungsortes, sowie die Form und Lage des Messfeldes. Eine ausführliche Erläuterung zu Geometriefehlern ist in [46] dargestellt. Da das Messsystem in dieser Arbeit als „geschlossenes“ System betrachtet werden kann, hat dieser Effekt keine große Bedeutung. Wichtig ist aber, dass der Abstand der Kamera zum Messfeld korrekt angegeben ist, sowie die richtige Eingabe ob kurze oder lange Spiegelarme montiert sind.
- **Differentiationsfehler:** Um die gesuchten Verzerrungen zu erhalten, werden die gemessenen Verschiebungen punktuell abgeleitet. Für eine gute Differentiation ist ein stetiger Verlauf der Verschiebungsverteilung notwendig. Auf Grund der Verrauschtheit und der hohen Störanfälligkeit der ESPI-Messungen ist diese Voraussetzung meist nicht optimal erfüllt. Um Differentiationsfehler zu vermeiden, wird vor dem Differenzieren eine starke Glättung der Verschiebungsverteilung durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass sowohl extreme Verschiebungswerte innerhalb des Auswertebereiches wie auch eventuelle lokal vorhandene Verzerrungen der Messfläche erhalten bleiben.
- **Summationsfehler:** Diese können insbesondere dann bedeutsam werden, wenn bei einer großen Anzahl von Belastungsinkrementen systematische Auswertefehler bei den einzelnen Schritten entstehen. Häufige Fehlerquelle sind fehlerhafte Behandlungen der Randbereiche bei der Anwendung von Maskenfiltern oder bei der numerischen Differentiation der Verschiebungsfelder.

# KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

In diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien und Methoden, die zur Durchführung der Versuche zur Anwendung gekommen sind, vorgestellt. Sämtliche praktische Arbeiten, die zur Herstellung der Probekörper notwendig waren, wurden am Lignum Test Center (LTC) des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz in der Infeldgasse 24 durchgeführt. Die Messungen an den Probekörpern erfolgten am Universitäts- und Forschungszentrum der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) in Tulln.

## 3-1 PRÜFSERIEN UND ZIEL

Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Elastizitätszahlen von Fichtenholz mit moderner Messtechnik, sowie der Vergleich der Ergebnisse mit jenen aus der Literatur. Außerdem soll die Beziehung der Elastizitätszahlen untereinander sowie mit der Rohdichte aufgezeigt werden. Für die letztere Untersuchung war es sinnvoll, die Prüfkörper aus vorsortiertem Grundmaterial herzustellen, welches bereits in drei Rohdichteklassen unterteilt worden war. Diese Klassierung erfolgte durch die Bildung von drei Jahrringgruppen. Unter Berücksichtigung der drei Belastungsrichtungen (tangential, longitudinal, radial) und der eben erwähnten Jahrringgruppierung ergaben sich neun Gruppen von Probekörpern. Je Gruppe wurden acht Probekörper angefertigt. Somit standen 72 Probekörper zur Verfügung. Diese wurden in drei Etappen (März, April und Juli 2018) am Universitäts- und Forschungszentrum der BOKU geprüft. Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht über die Probekörper und das Prüfprogramm. Wie in der Spalte „gemessene Kennwerte“ der Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, wird für jede Orientierung ein E-Modul bestimmt. Für die Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 4: werden die E-Moduln entweder einzeln je Prüfserie (z.B.  $E_{T, TL}$ ) oder gesamtheitlich für eine Belastungsrichtung (z.B.  $E_T = E_{T, TL} \cup E_{T, TR}$ ) besprochen. Die Bildungsvorschrift gilt sinngemäß auf  $E_R$  und  $E_L$ .

Tabelle 3-1: Übersicht Prüfprogramm

Belastungsrichtung	nominale Jahrringbreite	Anzahl Probekörper	Orientierung	gemessene Kennwerte		nominale Jahrringbreite	Anzahl Prüfungen	
T	2	8	TL	$\nu_{TL}$		$\rho_T$	2	8
				$E_{T,TL}$	$E_T$		4	8
							$E_{T,TR}$	6
	4	8	TR	$\nu_{TR}$			2	8
				$\nu_{TR}$	4		8	
					6		8	
L	2	8	LR	$\nu_{LR}$		$\rho_L$	2	8
				$E_{L,LR}$	$E_L$		4	8
							$E_{L,LT}$	6
	4	8	LT	$\nu_{LT}$			2	8
				$\nu_{LT}$	4		8	
					6		8	
R	2	8	RL	$\nu_{RL}$		$\rho_R$	2	8
				$E_{R,RL}$	$E_R$		4	8
							$E_{R,RT}$	6
	4	8	RT	$\nu_{RT}$			2	8
				$\nu_{RT}$	4		8	
					6		8	
<b>Summe Probekörper</b>		<b>72</b>				<b>Summe Prüfungen</b>	<b>144</b>	

## 3-2 GRUNDMATERIAL

### 3-2.1 AUSGANGSMATERIAL

Das Grundmaterial der Probekörper war Fichtenholz (*P. abies*), welches auch für die Arcan Shear Tests aus [6] verwendet wurde. Bei Anlieferung der Pfosten, von der Firma Hasslacher Norica Timber aus Preding, hatten sie die Abmessungen von 180 x 47 x 4000 mm<sup>3</sup>. Bei der Sortierung wurde darauf geachtet, dass der Jahrringverlauf möglichst parallel zur Breitseite der Pfosten verläuft, sowie dass der radiale Jahrringabstand gleichmäßig über alle Jahrringe ist. Daraus wurden drei Gruppen anhand eines nominellen Jahrringabstandes von  $a_w = 2, 4$  und 6 mm gebildet. Mit dem bekannten Zusammenhang einer zunehmenden Rohdichte mit abnehmender Jahrringbreite resultierten somit die drei zuvor erwähnten Rohdichteklassen. Das Holz wurde in der Klimakammer bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % konditioniert, um eine Ausgleichsfeuchte von 12 % zu erreichen.

### 3-2.2 PROBEKÖRPER

Die Pfosten, die bereits seit Beginn 2014 in der Klimakammer lagerten, waren bereits auf eine Länge von 1000 mm formatiert. In Abbildung 3-1 ist eine Auswahl des Rohmaterials für die Prüfkörperherstellung zu sehen.



**Abbildung 3-1:** Auswahl an Rohmaterial zur Prüfkörperherstellung

Aus dem Rohmaterial wurden pro Pfosten je ein Prüfkörper pro Belastungsrichtung T, L und R, gefertigt. Bei der Wahl der Prüfkörpergeometrie mussten folgenden Bedingungen beachtet werden:

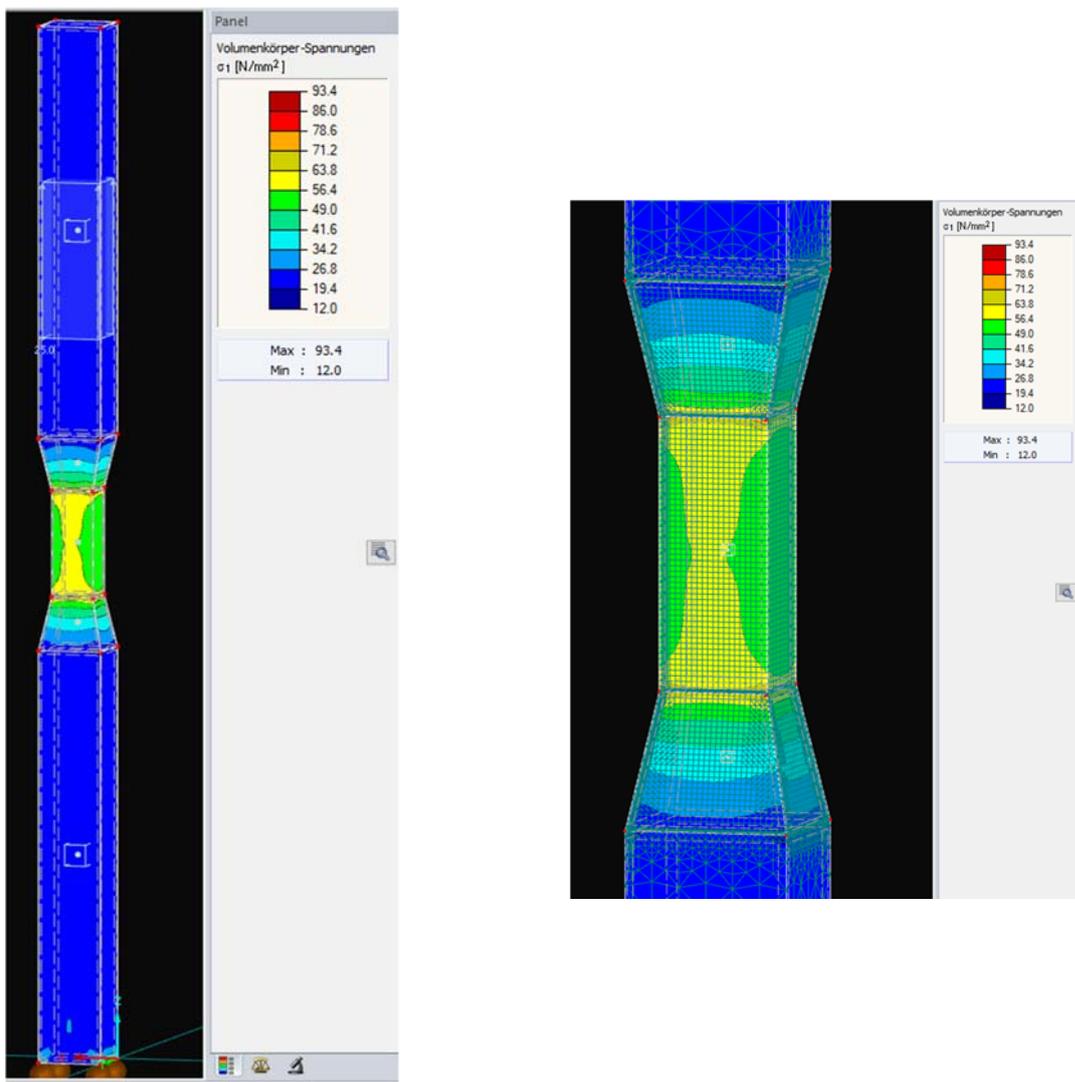
- Verjüngung im freien Bereich zwischen der Lastaufnahme, damit auch dort im Rahmen etwaiger Festigkeitsprüfungen (im Anschluss an diese Arbeit) ein Versagen auftritt,
- genügend großes Prüffeld, mit homogenen Spannungsverlauf über den Querschnitt und
- Herstellbarkeit

Dies führte zu einer abschnittswisen, prismatischen Prüfkörpergeometrie mit quadratischer Grundfläche, die im Bereich des Messfelds beidseitig verjüngt ist. Der Abstand der Ausrundung sollte ferner weit genug vom Prüffeld entfernt sein, um mögliche Spannungsspitzen im betrachteten Prüfkörperausschnitt zu vermeiden. In Abbildung 3-2 (links) ist das Ergebnis der vorangegangenen Finite Elemente Untersuchung mittels der Softwareapplikation RFEM (Version 5.04.0024) dargestellt.

Für das Modell wurde ein 3D Volumenkörper mit vereinfachter Verjüngung erstellt. Die Berechnung erfolgte mit orthotropen, elastischen Materialverhalten. Für die Beschreibung des Materialverhaltens wurden Kennwerte von Niemz [50] (vgl. Tabelle 3-2) herangezogen. Das FE-Netz wurde mit einer angestrebten Länger der Finiten Elemente von 10 mm modelliert. Für eine genauere Berechnung wurde das FE-Netz im verjüngten Bereich auf einen Radius von 1 mm verdichtet (vgl. Abbildung 3-2, rechts). Der Stab wurde an der unteren Stirnfläche mittels Flächenlager gelagert. Die Belastung erfolgte mittels einer Flächenlast von 25 N/mm<sup>2</sup>, was einer Gesamtbelastung von 22,5 kN entspricht. Wie zu sehen ist, stellt sich im Messbereich ein nahezu homogener Spannungszustand ein. Zudem weisen die Spannungen im Messbereich viel höhere Werte auf (ca. um das 2,8-fache höher) als außerhalb der Verjüngung, wodurch ein Bruch des Probekörpers in diesem Bereich zu erwarten ist.

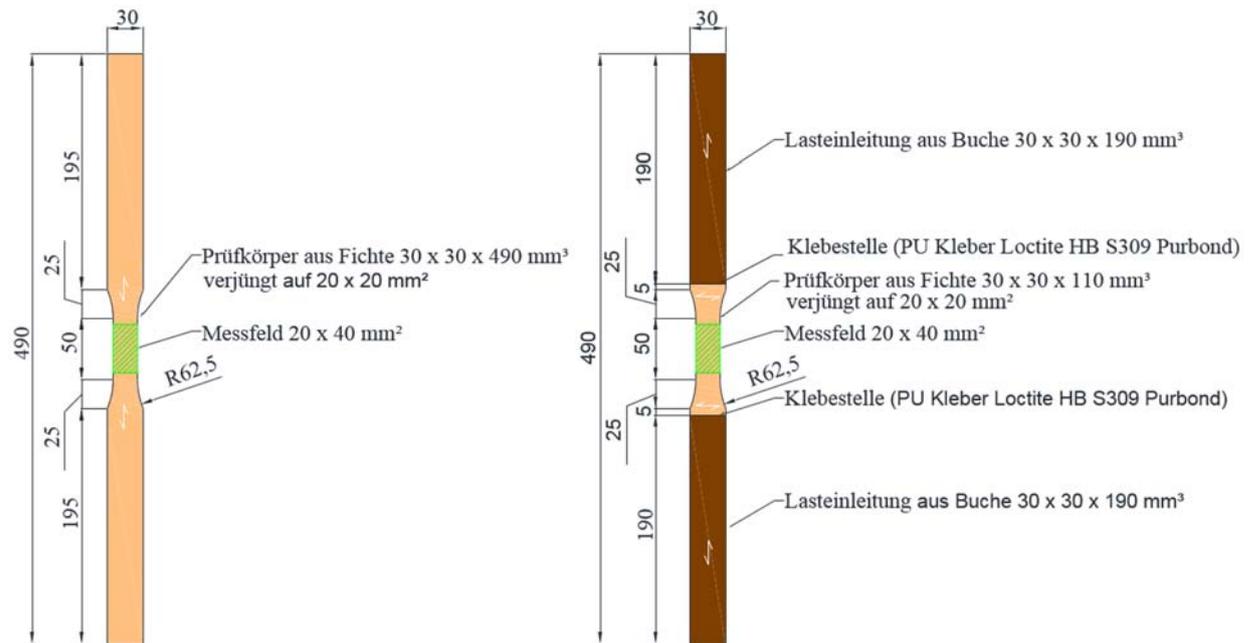
**Tabelle 3-2:** Übersicht der verwendeten Materialkennwerte nach Niemz [50]

Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]			Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]			Querdehnzahl [-]		
E <sub>x</sub>	E <sub>y</sub>	E <sub>z</sub>	G <sub>vz</sub>	G <sub>xz</sub>	G <sub>xy</sub>	ν <sub>vz</sub>	ν <sub>xz</sub>	ν <sub>xy</sub>
420	11990	817	667	602	22	0,376	0,335	0,015



**Abbildung 3-2:** Ergebnis der Spannungsanalyse im R-FEM (Version 5.04.0024) von Dlubal; links: Spannungsverlauf über den Prüfkörper; rechts: Detail des Messbereiches mit FE-Netz

Mit Berücksichtigung der Größe von den verfügbaren Klemmbanken des Labors der BOKU in Tulln, wurde die Geometrie auf  $l \times b \times d = 490 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$  festgelegt. Der Querschnitt im Messbereich beträgt  $b \times d = 20 \times 20 \text{ mm}^2$  und der Radius der Ausrundung beträgt 62,5 mm. Dieser war aufgrund der vorhandenen Maschinen vorgegeben. Abbildung 3-3 zeigt eine Übersicht der Prüfkörpergeometrie der verschiedenen Belastungsrichtungen.



**Abbildung 3-3:** Geometrie der Probekörper; links: Probekörper mit Faserorientierung parallel zur Hauptachse; rechts: Probekörper mit Faserorientierung normal zur Hauptachse

### 3-2.2.1 Rohdichtemessung

Um den Zusammenhang der Elastizitätszahlen mit der Rohdichte zu ermitteln, war es von größter Bedeutung diese möglichst genau zu bestimmen. Die Messung der Rohdichte erfolgte nach dem Formatieren, aber vor dem Verkleben und Fräsen der einzelnen Prüfkörper. Durch die prismatische Form konnte das Volumen leicht bestimmt werden. Die Rohdichtemessung erfolgte in Anlehnung an ÖNORM EN 408 [16]. Die Berechnung der Rohdichte wurde mit der Softwareapplikation Microsoft Excel 2013 (Version 15.0.5059.10000) durchgeführt.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

mit:

- $\rho$  Rohdichte in kg/m<sup>3</sup>
- $M$  = Masse der Probekörper in kg
- $V$  = Volumen der Probekörper in m<sup>3</sup>

### 3-2.2.2 Klimatisierung

Die Klimatisierung der Prüfkörper erfolgte in einer Klimakammer des LTC mit der Normklima nach [16]. Dies bedeutet eine Temperatur von  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und eine relative Luftfeuchte von  $(65 \pm 5)\%$ . Der Prüfkörper gilt als klimatisiert, wenn er die Massenkonstanz erreicht hat. Dies ist der Fall, wenn die Ergebnisse zweier Wägungen innerhalb von 6 h um nicht mehr als 0,1 % der Masse des Prüfkörpers voneinander abweichen.

### 3-2.2.3 Prüfkörper für die longitudinale (L) Belastungsrichtung

Die Prüfkörper für die longitudinale Belastungsrichtung wurden aus einem Stück gefertigt, was in einer vergleichsweise einfachen Herstellung resultierte. Nachdem der Pfosten auf die Ziellänge von 490 mm

abgelängt wurde, wurde er mit der Dickenhobelmaschine auf 35 mm Dicke gehobelt. Danach wurden aus dem Stück Streifen von 35 mm Breite gesägt. Somit entstanden die Rohlinge mit den Abmessungen  $l \times b \times d = 490 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$ .



**Abbildung 3-4:** Rohlinge der Prüfkörper für die longitudinale Belastungsrichtung

### 3-2.2.4 Prüfkörper für die tangentielle (T) Belastungsrichtung

Für die Prüfkörper mit der tangentialen Belastungsrichtung wurde ein Stück von  $l \times b \times d = 110 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$  aus dem Grundmaterial geschnitten. Dabei wurde speziell darauf geachtet, dass der Jahrringverlauf möglichst parallel zur Tangentialrichtung verläuft. Für die Lasteinleitung wurden an beiden Enden Buchenvollholz angeklebt. Dieses wurde zuvor auch auf  $l \times b \times d = 190 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$  formatiert. Die Verklebung erfolgte mittels einer Klebeschablone und Schraubzwingen. In Abbildung 3-5

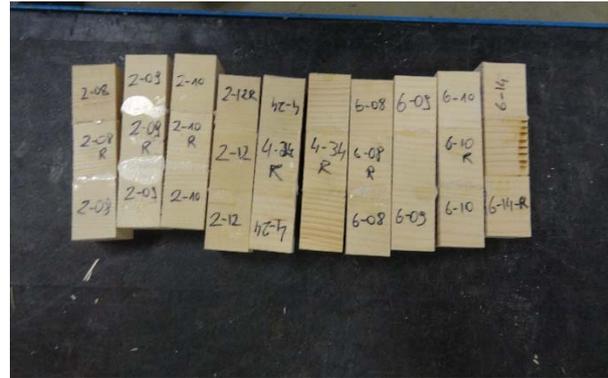
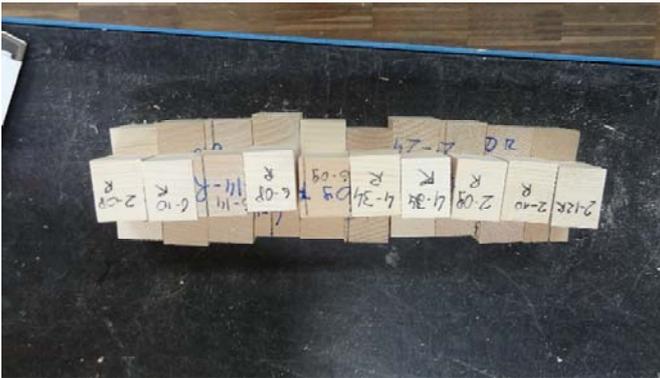
(links) sind die Prüfkörper während des Klebens in der Klebeschablone zu sehen. In Abbildung 3-5 (rechts) sind die fertig verklebten Rohlinge abgebildet.



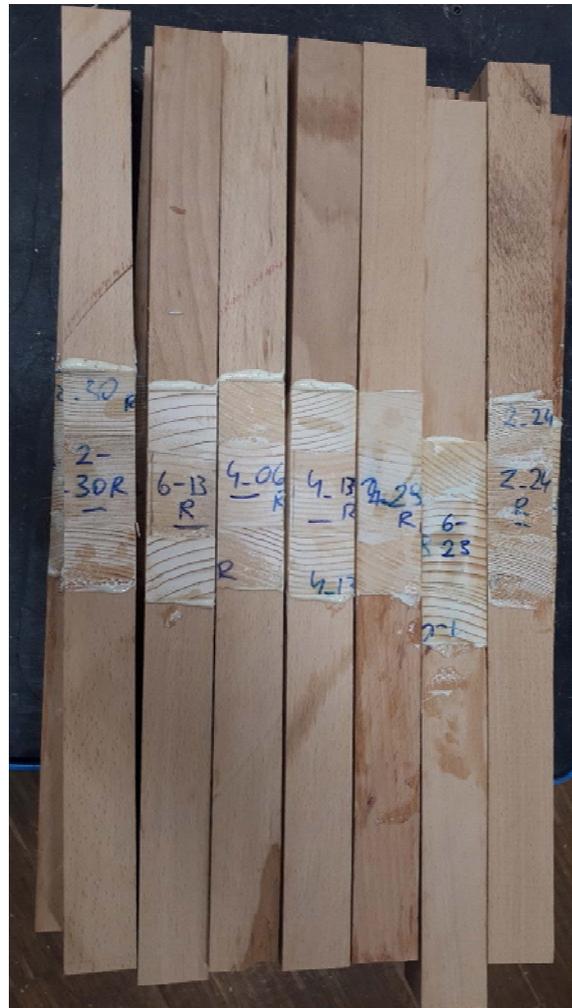
**Abbildung 3-5:** Rohlinge der Prüfkörper für die tangentielle Belastungsrichtung; links: während des Verklebens mit der Lasteinleitung aus Buche; rechts: nach dem Ausspannen

### 3-2.2.5 Prüfkörper für die radiale (R) Belastungsrichtung

Für die radiale Belastungsrichtung bestand der Prüfkörper aus fünf Einzelteilen. Dazu wurde aus dem Fichtenpfosten ein Stück mit den Maßen  $l \times b \times d = 45 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$  geschnitten (siehe Abbildung 3-6, links), daran wurde an jedem Ende ein weiteres Stück aus dem gleichem Querschnitt angeklebt, damit wieder ein prismatischer Prüfkörper mit den Maßen  $l \times b \times d = 110 \times 35 \times 35 \text{ mm}^3$  entsteht (vgl. Abbildung 3-6, rechts). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Klebestellen außerhalb des Messfeldes lagen, damit die Verklebung keinen Einfluss auf die Verformung des Prüfkörpers innerhalb des Messfeldes ausüben kann. Daran wurde wieder die Lasteinleitung aus Buche geklebt (vgl. Abbildung 3-7)



**Abbildung 3-6:** Einzelkomponenten der Prüfkörper mit radialer Belastungsrichtung; links: nach dem Formatieren; rechts: nach dem Verkleben



**Abbildung 3-7:** Weiterverarbeitung zu Prüfkörpern mit radialer Belastungsrichtung; links: während des Verklebens mit der Lasteinleitung; rechts: nach dem Ausspannen

### 3-2.2.6 Verklebung

Die Verklebung der einzelnen Prüfkörperteile der R-Prüfkörper, sowie die der Prüfkörper mit der Lasteinleitung aus Buchenholz (R- und T-Prüfkörper) erfolgte mit dem Einkomponenten-Polyurethanklebstoff HB S309, der Firma Purbond [51]. Dieser Klebstoff bindet mit Luft- und Materialfeuchte ab, so hat das zu verklebende Material eine Mindestfeuchtigkeit von 8 % und eine

Maximalfeuchtigkeit von 18 % aufzuweisen. Gegebenenfalls sind die Klebteile vor der Verklebung zu befeuchten. Die Wartezeit, also die Zeit zwischen Klebstoffauftragung bis zum Verpressen der Teile, beträgt maximal 30 Minuten. Die Mindestpresszeit beträgt 75 Minuten, mit einem empfohlenen Pressdruck von 0,6 N/mm<sup>2</sup> bis 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Nach der Presszeit kann das Bauteil weiterverarbeitet werden. Nach Ablauf der Abbindezeit ist eine Nachlagerung von 4 Stunden bei 20 °C vorgeschrieben.

### 3-2.2.7 Fräsarbeiten

Die Frässchablonen, dargestellt in Abbildung 3-8 (unten), wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und optimiert. Um ein Ausreißen von Fasern bzw. Holzstücken zu verhindern, wird der gesamte Prüfkörper zwischen zwei Siebdruck-Platten mittels drei Torbandschrauben geklemmt. Zur Fixierung des Prüfkörpers in der Schablone wurden am Beginn und Ende der Deckplatten Holzschrauben eingedreht, deren Spitzen sich in den Probekörper pressen und somit ein Ausrutschen verhindern. Pro Fräsgang werden immer zwei Probekörper benötigt. Als Anschlag dient ein Mittelsteg (siehe Abbildung 3-8, oben) der ebenfalls aus einer Siebdruckplatte gefertigt wurde.

Ein Fräszyklus setzt sich aus vier Schritten zusammen:

1. Einspannen der Probekörper in Frässchablone 1 und Fräsen der ersten Seite je Probekörper.
2. Drehen der Probekörper um 90 ° um die Längsachse, somit wird eine neue Kantenlänge von 33 mm erzielt.
3. Die Probekörper werden wieder um 90 ° gedreht und in Frässchablone 2 eingespannt und die jeweils dritte Fläche wird bearbeitet.
4. Ein letztes Wenden der Probekörper um 90 ° vollendet die Fräsarbeit und die Kantenlänge der Lasteinleitung ergibt sich zu 30 mm und der verjüngte Messbereich erhält einen Querschnitt von 20 x 20 mm<sup>2</sup>.

Beim Einspannen der Probekörper war stets darauf zu achten, dass die Probekörper in der Schablone bündig eingespannt waren und dass sie plan am Mittelsteg auflagen.

Gefräst wurde auf einer Tischfräse der Firma Knapp. Zum Einsatz kam dabei ein Falzfräskopf mit einem Durchmesser von 125 mm und einer Höhe von 50 mm. Der Fräskopf wird mit 7800 U/min betrieben. Beim Fräsen wird die Frässchablone am untenliegenden Anlauftring, mit manuellem Vorschub, geführt.

Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 zeigen die Tischfräse und eine Aufnahme während der Fräsarbeit.



**Abbildung 3-8:** Frässchablonen; oben: Grundplatte mit Mittelsteg; unten: Frässchablonen mit Spanndeckel und Spannschrauben



**Abbildung 3-9:** Tischfräse der Firma Knapp



Abbildung 3-10: Aufnahme während der Fräsarbeit

## 3-3 PRÜFAUFBAU

### 3-3.1 BELASTUNGSEINRICHTUNG

Die Prüfungen erfolgten auf der Universalprüfmaschine „Zwick/Roell Z100 Retro Line“. Dabei handelt es sich um eine mechanische Vertikalprüfmaschine, die weg-, oder kraftgesteuert betrieben wird und eine Maximalkraft von 100 kN aufbringt (vgl. Abbildung 3-11). Die Lasteinleitung erfolgte über mechanische Klemmbacken für Prüflasten bis 20 kN, siehe Abbildung 3-13. Die Messung der Dehnungen erfolgte im elastischen Bereich des Materials. In Anlehnung an die ÖNORM EN 408 [16] wird für die Auswertung des E-Moduls 10 % bis 40 % der erwarteten Festigkeit als elastischer Bereich angegeben. Als Richtwerte für die maximale Festigkeit und folglich zur Bestimmung der Bereichsgrenzen wurden Werte von Niemz [50] übernommen. Diese sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-3: Rohdichte, E-Modul und Zugfestigkeit von merkmalfreien Fichtenholz in Abhängigkeit der Schnitttrichtung, nach Niemz [50]

Schnitttrichtung	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
longitudinal	11496 (20) <sup>1</sup>	435	82,6 (24) <sup>1</sup>
radial	1099 (12) <sup>1</sup>	486	4,0 (20) <sup>1</sup>
tangential	452 (13) <sup>1</sup>	415	3,0 (13,3) <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Werte in Klammern stellen den Variationskoeffizienten in % dar.

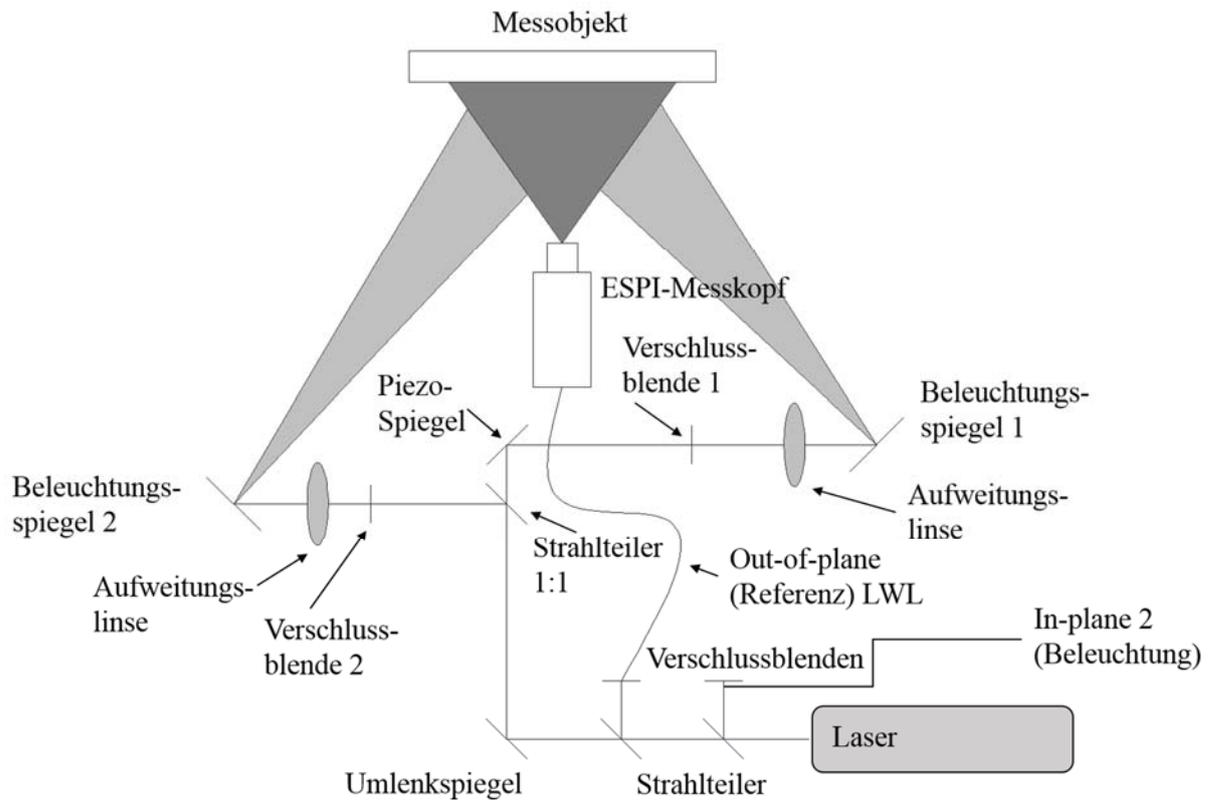


**Abbildung 3-11:** Prüflabor der BOKU mit Universalprüfmaschine, den Speckle-Kameras und den Computern für Steuerung und Auswertung

### 3-3.2 MESSEINRICHTUNG

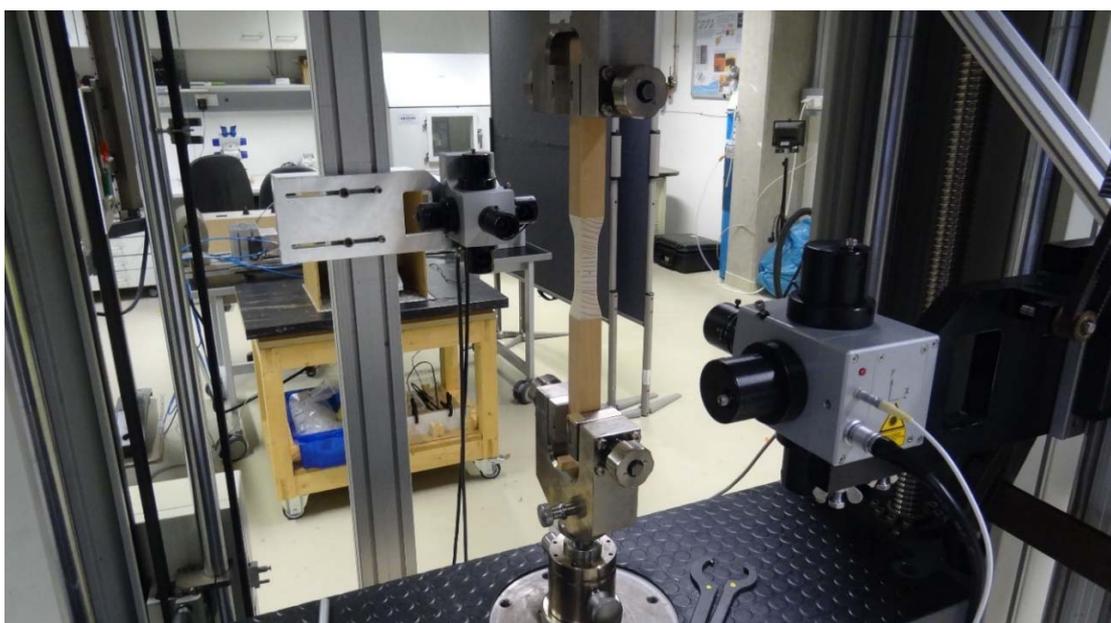
Zur Messung der Deformationen kamen zwei Speckle-Kameras der Firma Dantec – Ettmeyer zum Einsatz. Sie besitzen Laserdioden der Klasse 3B mit einer Wellenlänge  $\lambda > 780 \text{ nm}$  und einer optischen Leistung von 50 mW. Diese Kameras sind mit zwei In-plane-Messsystemen und einem out-of-plane-Messsystem ausgestattet. Somit kann je nach Voreinstellung in eine bzw. zwei Richtungen oder räumlich in drei Richtungen gemessen werden. Für jede Messrichtung wird nacheinander ein eigenes Specklebild erstellt. Das Umschalten zwischen den Messrichtungen geschieht vollautomatisch durch die in den Kameras verbauten Verschlussblenden (shutter). Abbildung 3-12 zeigt den schematischen optischen Aufbau einer in-plane Messung. Wegen der Übersichtlichkeit ist nur der Aufbau für eine Messrichtung dargestellt. In Abbildung 3-14 ist der Aufbau der Universalprüfmaschine und der zwei Messeinheiten schematisch in Ansicht und Schnitt dargestellt.

Die Auswertung und Steuerung der Kameras erfolgt mit der von Dantec mitgelieferten Software ISTRÄ. In ISTRÄ werden alle Einstellungen für die Messung getätigt. Diese sind z.B. der Abstand der Kameras zum Messobjekt, die gewünschten Messrichtungen, die Speicherverzeichnisse und die Einstellung für die Abstände der Umlenkspiegel, da je nach Messaufgabe lange oder kurze Spiegelarme montiert werden können. Ein weiterer wichtiger Punkt vor dem Messbeginn ist die Kalibrierung der Piezo-Spiegel. Da diese die Phasenverschiebung bewirken, vergleiche Abschnitt 2-4.4.1. Bei der Kalibrierung ist darauf zu achten, dass durch die Einstellungen ein sinusförmiger Verlauf der elektr. Spannung am Piezoelement erzielt wird.



**Abbildung 3-12:** Schematischer Aufbau einer in-plane Messung in eine Messrichtung (in Anlehnung an [46])

Da die Messung mit der Speckle-Interferometrie mit Einzelbildern vonstattengeht, wurde ein stufenförmiger Prüfverlauf mit 9 Lastschritten und einer jeweiligen Haltezeit der Last von 7 Sekunden gewählt, in der die Fotos erstellt wurden. Nach dem letzten Lastschritt wurde der Probekörper entlastet und  $90^\circ$  um die Belastungsachse gedreht. Somit erhielt man von jedem Probekörper zwei Messungen der Dehnungen in Richtung der Hauptachse bzw. je eine Dehnungsmessung quer dazu.



**Abbildung 3-13:** Zentrische Einspannung mittels mechanischer Klemmbacken / Speckle-Kameras, Prüfkörper ohne Lichtblende

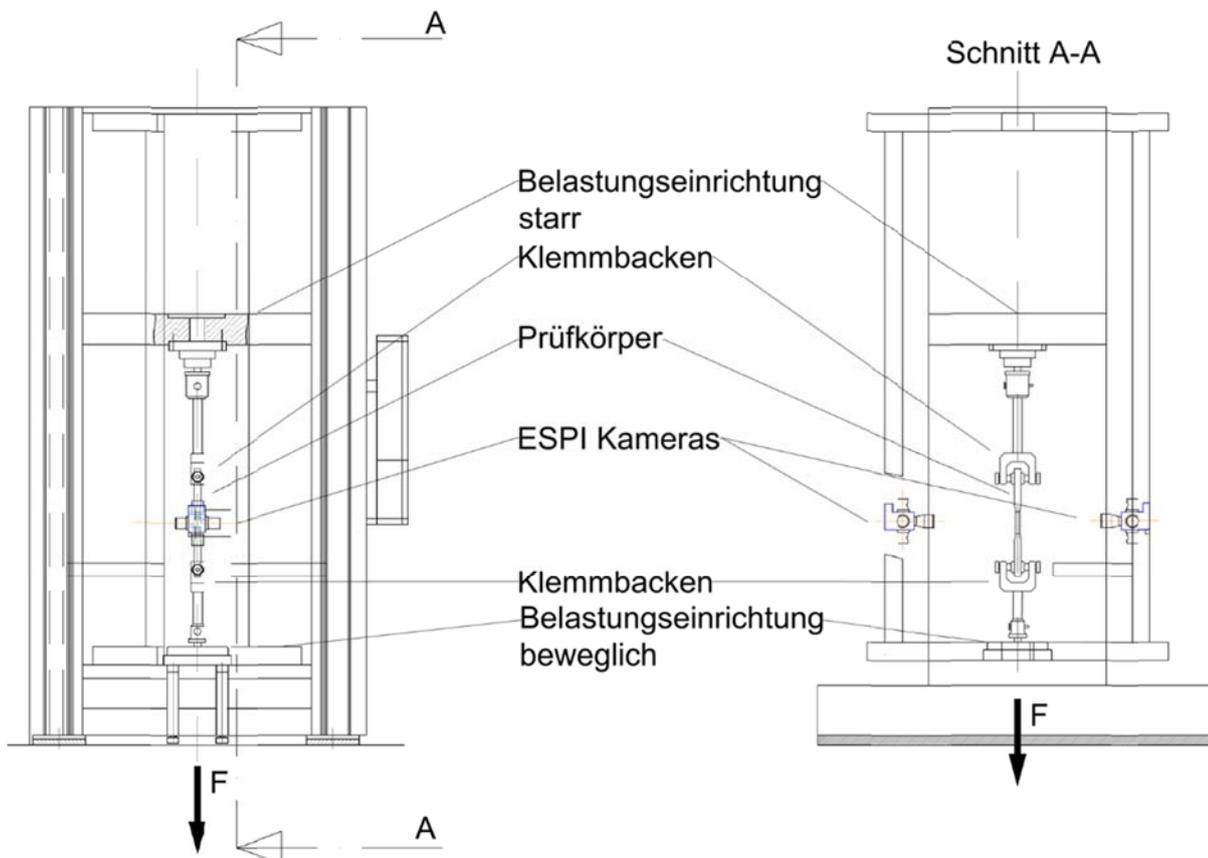


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Ansicht und Schnitt

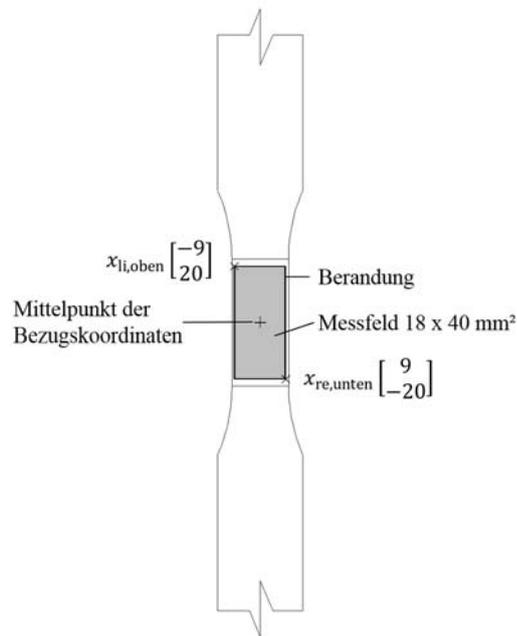
### 3-3.3 PRÜFABLAUF

Im Folgenden Abschnitt wird der Ablauf der Versuche beschrieben. Die einzelnen Schritte wurden bei jedem Prüfkörper nach dem gleichem Schema durchgeführt, um eine gleichbleibende Qualität der Messungen zu erreichen. Der Prüfablauf umfasste folgende Schritte:

1. Vorbereitung der Probekörper,
2. Vorbereitung der Kameras und der Software,
3. Vorbereitung der Universalprüfmaschine,
4. Durchführung der Prüfung,
5. Auswertung der Speckle - Messung und
6. Auswertung des E-Moduls und der Querdehnzahl.

#### 3-3.3.1 Vorbereitung der Probekörper

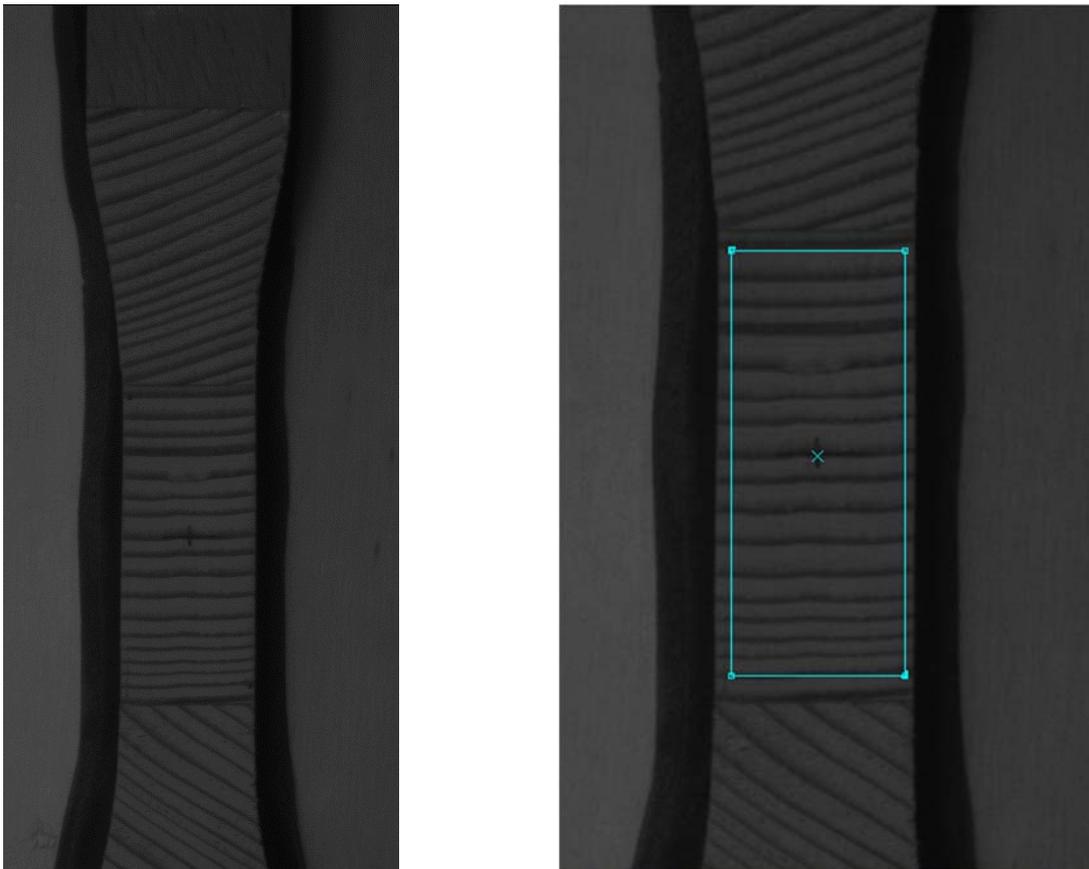
Für die Messung war es wichtig, dass die Oberfläche frei von abstehenden Fasern, oder Spänen war. Deshalb wurde der Messbereich mit Schleifpapier der Körnung 180 und 240 geschliffen. Für das Einrichten der Berandung (= Umgrenzung des Mess- und Auswertfeldes), musste der Mittelpunkt des Messfeldes, sowie die Koordinaten links-oben, bzw. rechts-unten am Probekörper markiert werden. Damit ergaben sich für das Messfeld von  $18 \times 40 \text{ mm}^2$ , vom Mittelpunkt aus, die Koordinaten  $x_{\text{li,oben}} \begin{bmatrix} -9 \\ 20 \end{bmatrix}$  und  $x_{\text{re,unten}} \begin{bmatrix} 9 \\ -20 \end{bmatrix}$ . Dies wurde mit einer vorgefertigten Schablone aus Karton bewerkstelligt. Abbildung 3-15 zeigt schematisch den Prüfkörper mit den eingezeichneten Koordinaten, der Berandung und dem Messfeld. Damit sich die Laserstrahlen der beiden Kameras nicht gegenseitig beeinflussen, wurden zudem Lichtblenden seitlich an den Probekörpern angebracht.



**Abbildung 3-15:** Darstellung der Berandung, der Bezugskordinaten und des Messfeldes

### 3-3.3.2 Vorbereitung der Speckle-Kameras bzw. ISTRASoftware

Nach dem zentrischen Einspannen des Probekörpers wurde dieser ausgeleuchtet und, wie in Abbildung 3-16 (links) zu sehen ist, mit jeder Kamera ein Bild aufgenommen. Dieses Bild wurde in der Auswertesoftware ISTRASoftware geöffnet und anhand der markierten Koordinaten und des Mittelpunktes die Berandung bzw. das Messfeld definiert (vergleiche Abbildung 3-16, rechts). Nach dem Einrichten des Speicherverzeichnisses und Starten des Serienaufnahmemodus waren die Kameras und die Software bereit für die Messungen.



**Abbildung 3-16:** links: Bildaufnahme mit den Kameras; rechts: Am aufgenommenen Bild wird anhand der markierten Koordinaten die Berandung eingerichtet

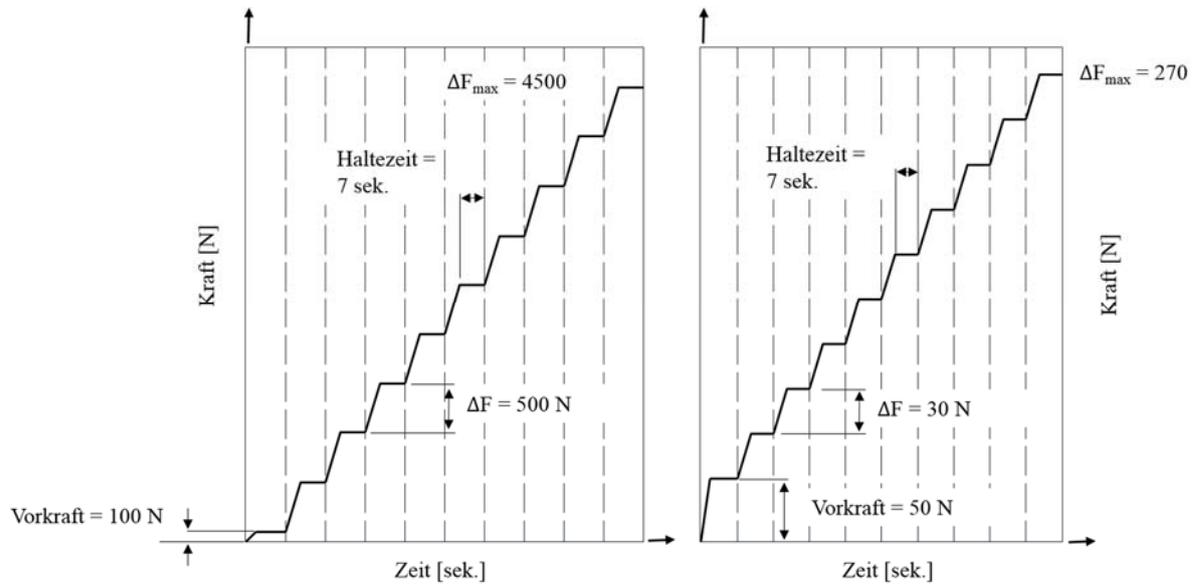
### 3-3.3.3 Vorbereitung der Universalprüfmaschine

#### Zugversuche

Wie in Abschnitt 3-3.2 erwähnt, wurden die Messungen in definierten Laststufen durchgeführt. Abbildung 3-16 (links) zeigt die Laststufen für Messungen in Faserrichtung anhand eines Prüfkraft-Prüfzeit-Diagramms und Abbildung 3-16 (rechts) stellt die Laststufen für die Messungen quer zur Faserrichtung dar. Die Belastungsgeschichte bestand aus einer Vorkraft von 100 N für Belastungen längs der Faser bzw. 50 N für Belastungen quer zur Faserrichtung. Danach folgten 9 Laststufen mit einer Laststeigerung von 500 N bis zu einer maximalen Laststeigerung von 4500 N für die längsbeanspruchten bzw. 30 N bis zu einer maximalen Laststeigerung von 270 N für die querbeanspruchten Probekörper.

Für die Probekörper mit Beanspruchung in Längsrichtung bedeutete dies eine Zugspannung von  $11,25 \text{ N/mm}^2$ . Nach Tabelle 3-3 sind das ca. 14 % der zu erwartenden Bruchlast. Die Prüfkraft wurde auf diesem Niveau gehalten, weil die Bruchlast nach [50] (Tabelle 3-3) für zu hoch gehalten wurde.

Die Zugspannungen der Proben mit Belastung in radialer und tangentialer Richtung betragen  $0,75 \text{ N/mm}^2$ . Dies entsprach ca. 19 % der Bruchlast in radialer Richtung und 25 % der Bruchlast in tangentialer Richtung. Somit fanden die Versuche im linear elastischen Bereich statt.

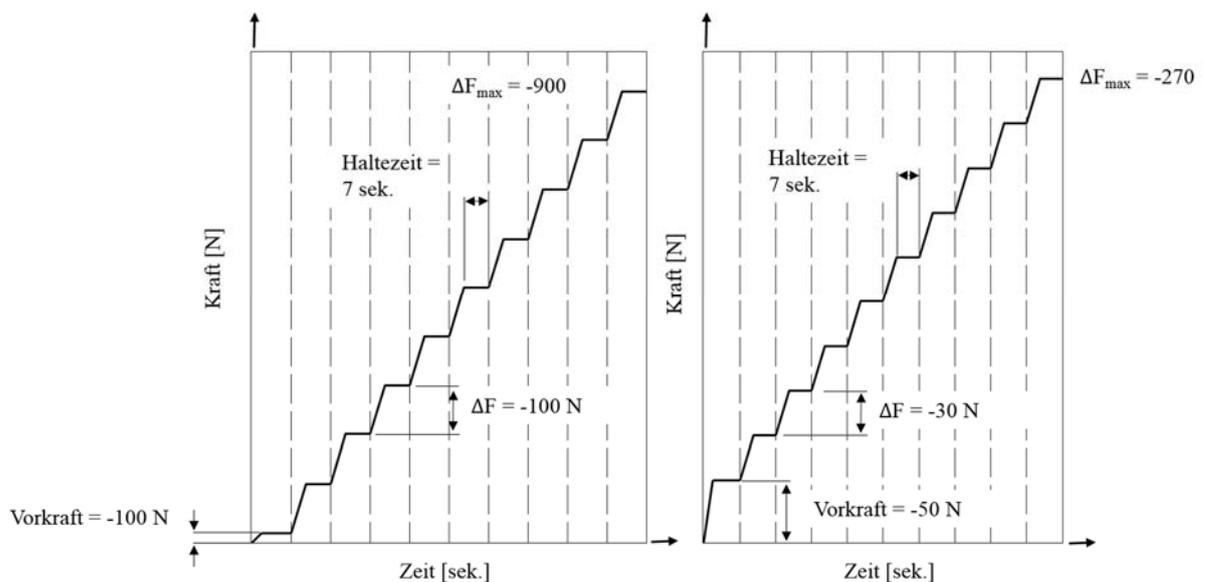


**Abbildung 3-17:** Definition der Laststufen der Zugversuche; links: Laststufen für Messungen in Faserrichtung; rechts: Laststufen für Messungen quer zur Faserrichtung

Nach dem Erreichen der Vorkraft wurde das erste Bild aufgenommen. Dieses Bild diente als Referenzbild und stellte den unverformten Zustand dar. Nach jeder weiteren Laststufe wurde innerhalb der Haltezeit ein weiteres Bild erstellt. Dabei war darauf zu achten, dass jedes Bild so schnell wie möglich erstellt wurde, um eventuelle Einflüsse aus der Relaxation der Probe während des Haltens der Kraft zu vermeiden.

### Druckversuche

Ausgewählte Prüfkörper wurden auch einem Druckversuch unterzogen, um den Vergleich der Parameter E-Modul und Querdehnung in Abhängigkeit der Belastungsrichtung zu erhalten. Bei den Einstellungen der Universalprüfmaschine wurden nur minimale Änderungen durchgeführt. Die Einspannung blieb unverändert, es wurde lediglich die Prüfvorschrift geändert. Generell bestand die Lastgeschichte wieder aus neun Lastschritten. In Abbildung 3-18 ist die Lastgeschichte für die Druckprüfungen längs und quer zur Faser dargestellt.



**Abbildung 3-18:** Definition der Laststufen; links: Laststufen für die Druckmessungen in Faserrichtung; rechts: Laststufen für die Druckmessungen quer zur Faser

Für die Prüfungen in longitudinaler Richtung wurde eine Vorkraft von  $-100\text{ N}$  (negatives Vorzeichen wegen Druck) aufgebracht. Anschließend folgten neun Lastschritte zu je  $-100\text{ N}$ . Somit ergab sich eine Gesamtbelastung von  $-900\text{ N}$ . Die Belastung wurde im Vergleich zu den Zugprüfungen gesenkt, um ein Ausknicken, bzw. zu große Starrkörperverschiebungen aufgrund von seitlichem Ausweichen der Probekörper, zu verhindern.

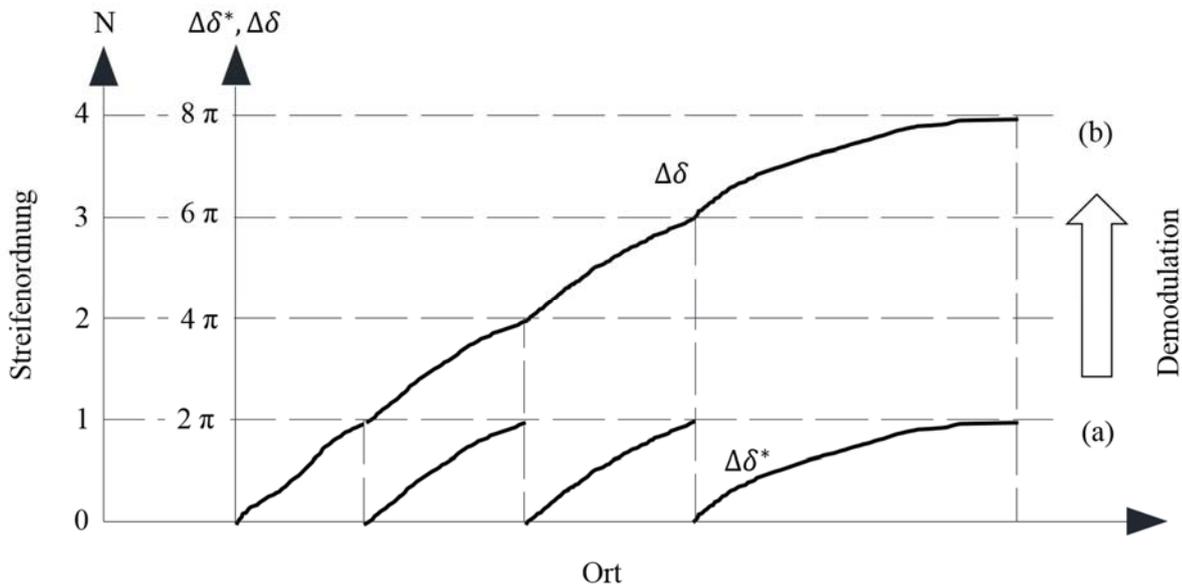
In tangentialer und radialer Richtung betrug die Vorkraft  $-50\text{ N}$  und wurde in neun Schritten zu je  $-30\text{ N}$  auf eine maximale Laststeigerung von  $-270\text{ N}$  gesteigert.

### 3-4 AUSWERTUNG DER SPECKLE-INTERFEROMETRIE

Während der Messung mit dem ESPI-System waren die in Echtzeit erstellten Streifenbilder, für eine ausgewählte Messrichtung, zu sehen. Diese gaben schon während des Messvorgangs Aufschluss über die Qualität der Messung (Helligkeit, Kontrast, Schwingungen, Luftverwirbelungen; siehe Abschnitt 2-4.4.2). Diese Bilder wurden aber nicht weiter ausgewertet oder gespeichert. Zur Auswertung wurden die Bilder aus der Belastungsgeschichte überlagert und somit die Lageänderung jedes Punktes über die Versuchsdauer bestimmt.

In der Vorauswertung wurde aus den vor bzw. nach der Deformation aufgezeichneten Speckle - Interferogrammen ein moduliertes Phasenbild (Modulo -  $2\pi$  - Streifenbild) erstellt. Um eine zuverlässige, automatisierte Demodulation des erhaltenen Phasenbildes zu gewährleisten mussten die Intensitätsverteilungen deutlich erkennbare Sägezahnverläufe entlang von senkrecht zu den Streifen verlaufenden Schnitte aufweisen (vgl. Abbildung 2-25, c). [46]

Durch Filteralgorithmen, die eine Glättung hochfrequenter Störungen bewirkten, konnten die Phasensprünge hervorgehoben und verdeutlicht werden. In Abbildung 3-17 ist ein idealisierter Sägezahnverlauf der modulierten Interferenzphasenänderung, sowie der zugehörige, demodulierte Verlauf eines Bildschnittes dargestellt. [46, 48]

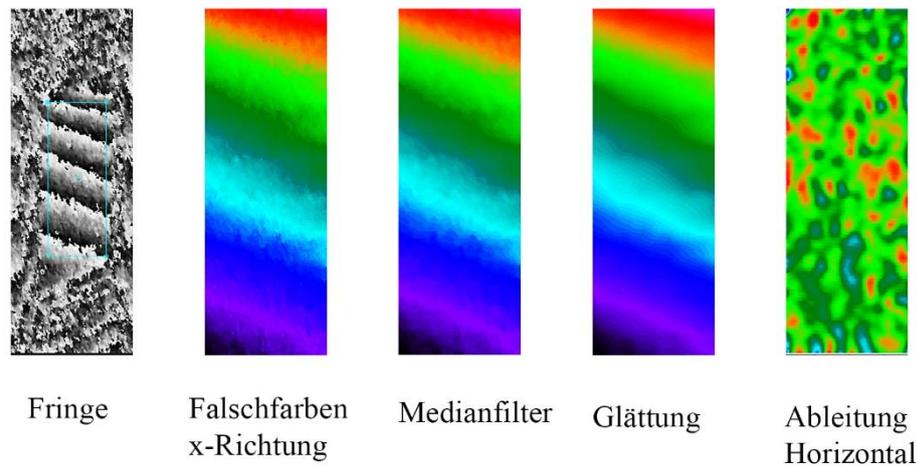


**Abbildung 3-19:** Idealisierter Schnitt durch ein Phasenbild; (a) modulierte; (b) demodulierte Interferenzphasenänderung (in Anlehnung an [46, 48])

Die eigentliche Auswertung der Messdaten begann durch die Anwendung von Gleichung (2.44). Dies verursachte den Übergang von der Streifenordnung zum korrespondierenden relativen Verschiebungswert. Durch Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse des Aufbaus (Beleuchtungs-, und Beobachtungsgeometrie) sowie der Berandung und den Abmessungen des Messfeldes wurden von der demodulierten Verteilung der Interferenzphasen relative, jedoch bereits quantifizierte Verschiebungs- bzw.

Deformationsverteilungen in der jeweiligen Messrichtung ermittelt. Um die absoluten Verschiebewerte zu erhalten, wurden die einzelnen inkrementellen, relativen Verschiebungsverteilungen aufsummiert. [46, 48]

In der Software wurde die Falschfarbengrafik für die gewünschte Messrichtung ausgewählt. Wie zuvor beschrieben, wurden für eine genauere Auswertung ein Glättungsalgorithmus, sowie ein Medianfilter angewandt. Dadurch sollten Verfälschungen der Messergebnisse durch Rauschen vermindert, und das Messergebnis präzisiert werden. Um die Dehnungen zu erhalten, wurde die Falschfarbengrafik in die jeweilige Richtung numerisch abgeleitet. Direkt in der Software kann der Messbereich vermessen und der Mittelwert der Dehnung ausgelesen werden. In Abbildung 3-20 sind die zuvor beschriebenen Schritte schematisch für eine horizontale Dehnung dargestellt.



**Abbildung 3-20:** Auswerteprozedur vom ESPI-Fringe bis zu den messbaren Dehnungen

Zur Plausibilitätskontrolle der Messungen konnten auch die Vektorgrafiken herangezogen werden. Diese zeigen den Verlauf und die Größe der Verschiebungen bzw. der Dehnungen über das Messfeld.

### 3-5 AUSWERTUNG DES E-MODULS UND DER QUERDEHNZAHLEN

Da die Prüfkörper bei jedem Prüfvorgang beidseitig vermessen wurden, erhielt man auch zwei Verformungswerte je Richtung (horizontale und vertikale Verformung) Zur Auswertung des E-Moduls und der Querdehnzahlen wurden die Ergebnisse der beiden Speckle-Prüfungen gemittelt. Die Auswertung des E-Moduls erfolgt in Anlehnung an ,ÖNORM EN 408 [16]. Dabei wird der Zug-Elastizitätsmodul wie folgt bestimmt:

$$E_{t,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} \quad (4.1)$$

mit:

$F_2 - F_1 =$  Laststeigerung im linearen Bereich der Last-Verformungs-Kurve, in N

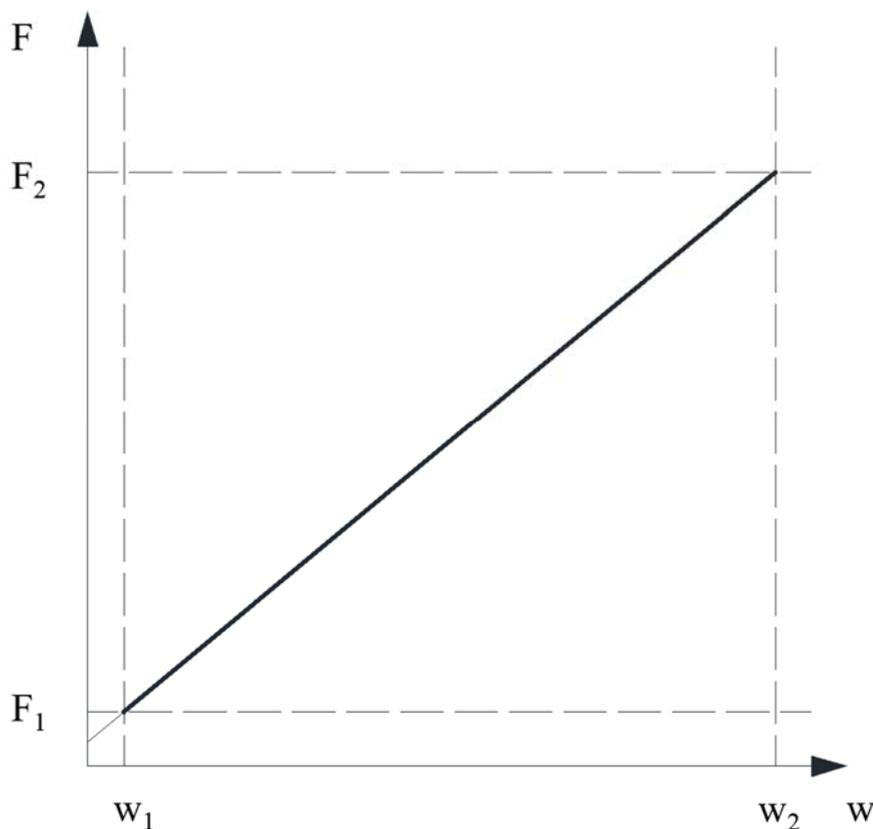
$l_1 =$  Messlänge zur Bestimmung des E-Moduls, in mm

$w_2 - w_1 =$  die Verformungszunahme entsprechend  $F_2 - F_1$ , in mm

$A =$  Querschnittsfläche in mm<sup>2</sup>

Abbildung 3-21 zeigt eine Last- Verformungskurve zur Bestimmung des E-Moduls nach [16]. Die Kraft F wurde aus dem Protokoll der Universalprüfmaschine entnommen. Die Querdehnzahlen wurden nach Gleichung (4.2) berechnet und ausgewertet (siehe Abschnitt 2-2.4).

$$\nu = -\frac{e_d}{e_1} = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (4.2)$$



**Abbildung 3-21:** Last- Verformungskurve zur Bestimmung des E-Moduls

Die Auswertung der E-Moduln und der Querdehnzahlen erfolgte mit dem Programm Office Excel 2013 (Version 15.0.5059.10000) von Microsoft. Diese Excel-Tabellen dienen auch als Prüfprotokoll. Jede Prüfung wurde als Tabellenblatt abgelegt und Auffälligkeiten wurden darin vermerkt.

## 3-6 STATISTISCHE AUSWERTUNG

### 3-6.1 DATENERHEBUNG

Sämtliche Daten der in Abschnitt 3-5 erwähnten Prüfprotokolle wurden, geordnet nach Orientierung und Jahrringgruppe in einer Excel-Tabelle zusammengefasst. Außerdem wurden dieser Tabelle die Rohdichtedaten der Prüfkörper, die ebenfalls mit Excel berechnet wurden (siehe Abschnitt 3-2.2.1), hinzugefügt. Somit standen für jeden Prüfkörper die Kennwerte:

- Rohdichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],
- E-Modul in Belastungsrichtung  $E$  [N/mm<sup>2</sup>]
- Querdehnzahl  $\nu$  [-]
- Jahrringgruppe ( $a_w = 2, 4$  oder  $6$ )

zur statistischen Auswertung bereit.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Softwareapplikation R (Version 3.3.2). Im Weiteren wird die Ermittlung der statistischen Kenngrößen nach [52] beschrieben.

### 3-6.2 BESTIMMTE STATISTISCHE KENNGRÖßEN

Das **arithmetische Mittel**  $\bar{x}$  erhält man indem man alle Merkmalsausprägungen  $x_i$  aufaddiert und durch die Anzahl  $n$  der statistischen Elemente dividiert.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.3)$$

Die empirische **Varianz**  $s^2$  ist die Summe der Abweichungsquadrate der Einzelwerte von ihrem arithmetischen Mittel  $\bar{x}$  geteilt durch  $(n-1)$ .

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.4)$$

Da sich dadurch teilweise exotische physikalische Einheiten ergeben, wird die **Standardabweichung**  $s$  als Kenngröße verwendet. Die Standardabweichung ist die positive Quadratwurzel der Varianz  $s^2$  und hat die gleiche Einheit wie die Einzelwerte der Messungen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Der **Variationskoeffizient**  $COV$  (oder auch  $V$ ) ist ein relatives Streuungsmaß und drückt das Verhältnis der Standardabweichung  $s$  zum arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  aus.

$$COV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (4.6)$$

Der **Median** oder Zentralwert  $x_{med}$  ist in der Statistik ein Lageparameter. Er wird gebildet, indem die Auflistung der Daten der Größe nach geordnet wird. Ist die Datenanzahl  $n$  ungerade, so ist der Median die mittlere Zahl. Bei einer geraden Anzahl  $n$  entspricht der Median dem arithmetischen Mittel der zwei mittleren Zahlen des Datensatzes.

Die wichtigste Eigenschaft des Medians ist seine Robustheit gegenüber Ausreißern.

$$x_{\text{med}} = \begin{cases} x_{\frac{n-1}{2}+1} & \text{für } n = \text{ungerade} \\ \frac{1}{2} \left( x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n+2}{2}} \right) & \text{für } n = \text{gerade} \end{cases} \quad (4.7)$$

Der **Inter-Quantilbereich** IQ teilt, analog zum Median, Daten in Bereiche. Der Median teilt Daten in zwei etwa gleich große Hälften. Der Inter-Quantilbereich teilt diese Daten so, dass mindestens  $p$  % der Daten im Bereich  $\leq q_p$  oder höchstens  $(1-p)$  % der Daten im Bereich  $> q_p$  liegen. Allgemein definiert man das  $p$ -Quantil  $q_p$  als:

$$q_p = (1-g)x_{\lfloor (n-1)p \rfloor + 1} + g x_{\lfloor (n-1)p \rfloor + 2} \quad (4.8)$$

mit:

$$g = (n-1)p - \lfloor (n-1)p \rfloor$$

Die Sonderform  $q_{25}$  und  $q_{75}$  wird auch als Quartil (Viertelwerte (25 %, 50 %, 75 %)) bezeichnet, daher stammt auch der Inter-Quartilbereich und  $q_{50}$  entspricht dem Median. [53]

Zur graphischen Übersicht der Ergebnisse werden in Kapitel 4 Boxplots verwendet. In Abbildung 3-22 wird eine allgemeine Erklärung dieser Darstellungsmethode gezeigt. Die Einkerbungen (Notches) im Plot geben anhand deren Lage in zwei zu vergleichenden Plots Auskunft darüber ob signifikante Unterschiede des Medians der einzelnen Prüfserien vorliegen. Wenn sich die eingekerbten Bereiche der einzelnen Boxplots überschneiden, sind, vereinfacht gesagt, keine signifikant unterschiedlichen Mediane der jeweiligen Prüfserien zu erwarten.

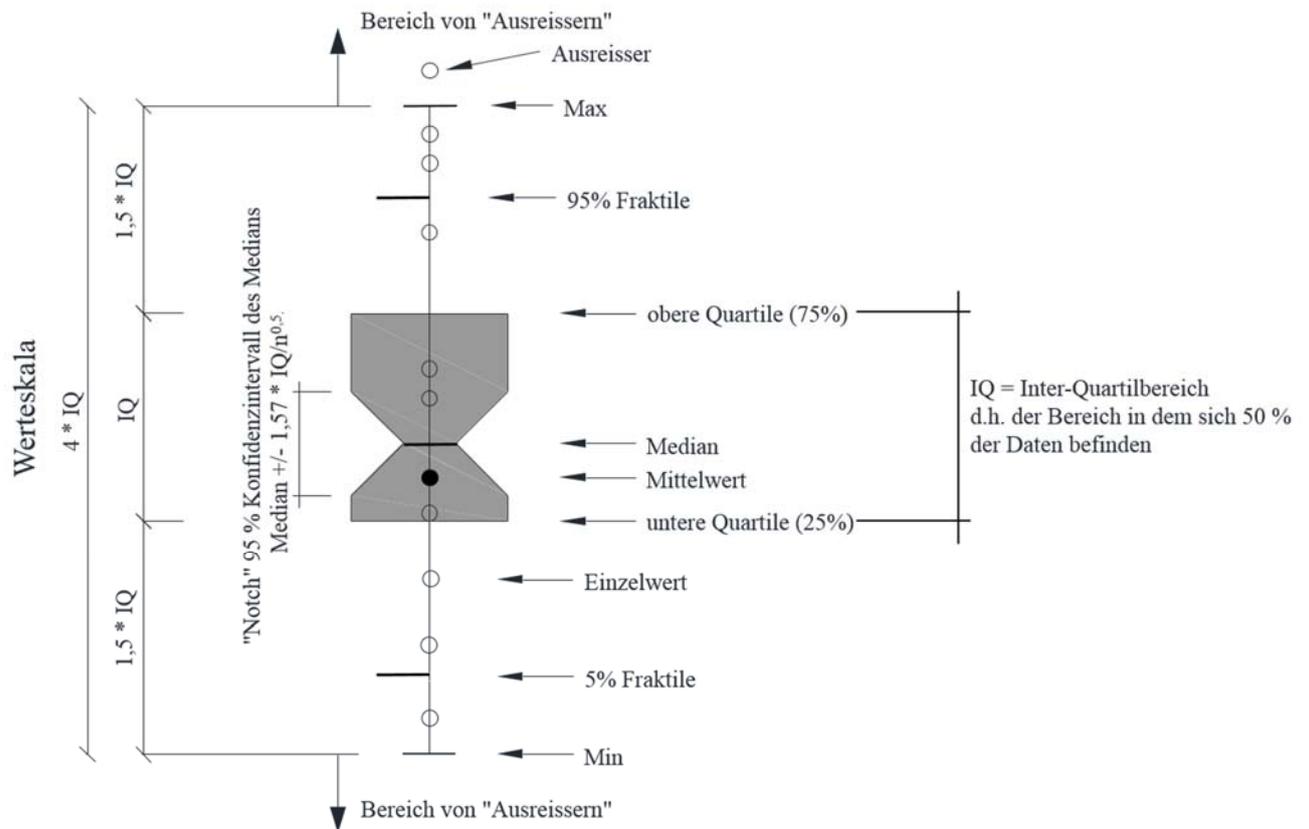


Abbildung 3-22: Beschreibung eines Boxplots

### 3-6.3 AUSREIßERIDENTIFIKATION

Die in Abschnitt 3-6.1 vorgestellten Kennwerte wurden einer Analyse unterzogen, um stabile und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die Ausreißeridentifikation geschah in zwei Schritten.

Im ersten Schritt wurden die Ergebnisse der Dehnungsmessungen schon während der Eingabe in das Prüfprotokoll, bzw. während der Auswertung des E-Moduls auf Plausibilität geprüft. Messungen, die keine glaubhaften Ergebnisse lieferten wurden wiederholt, da es auch durch Vibrationen im Labor, z.B. beim Öffnen und Schließen der Labortüre und anderem Verkehr im Labor während der laufenden Messung, zu Fehlmessungen gekommen ist. Wenn wieder keine plausiblen Dehnungen beobachtet werden konnten, wurde entweder das Ergebnis eines Messsystems, oder das gesamte Messergebnis eines Prüfkörpers verworfen. Ursachen für derartige Fehlmessungen waren unter anderem:

- inhomogene Schichtung von Früh- und Spätholz an der Messoberfläche (vgl. Abschnitt 4-1.2 und 4-1.3),
- Faserverlauf, der nicht genau parallel oder senkrecht zur Belastungsrichtung verläuft,
- Relaxationserscheinung bei den Versuchen mit Belastung in Faserlängsrichtung.

Alle anderen Ausreißer, bei denen es keine offensichtlichen Gründe für Abweichungen gab, wurden aufgrund zu großer Abweichung vom Median und unter Bedachtnahme der Streuung und des Stichprobenumfanges, eliminiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass so viele Daten wie möglich erhalten blieben. So wurde z.B. öfters nur das Messergebnis einer Kamera verworfen und nicht der komplette Prüfkörper. Es wurden keine Prüfkörper aufgrund ihrer Rohdichtewerte eliminiert, da, wie in Kapitel 4: zu sehen ist, keine außergewöhnlichen Rohdichtewerte vorlagen, auch wenn sie in den Boxplots als Ausreißer identifiziert wurden.

### Statistische Verteilungsmodelle

Die statistischen Verteilungsmodelle lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen. Diese sind:

- **additive, singuläre Mechanismen:** Für Kennwerte diese Gruppe (z.B. Rohdichte,...) gilt grundsätzlich die Normalverteilung (ND) als Verteilungsmodell.
- **multiplikative, singuläre Mechanismen:** Das Verteilungsmodell für Kennwerte dieser Kategorie (z.B. Festigkeiten,...) gilt meistens die Lognormalverteilung (LND).
- **Extremwerte:** Für die Beschreibung von Extremwerten (min, max) (z.B. Lasten und Einwirkungen) werden Gumbel-, Fréchet- oder die Weibull-Verteilung als Verteilungsmodell herangezogen. [54]

In der vorliegenden Arbeit wurde bei allen physikalischen und mechanischen Kennwerten von einer Lognormalverteilung ausgegangen. Die zwei Hauptfaktoren, die diese Annahme erlauben sind:

1. Im Gegensatz zur Normalverteilung ist der Definitionsbereich der Lognormalverteilung auf natürliche Zahlen ( $\mathbb{N}$ ) begrenzt (0 bis  $+\infty$ ). Dieser Wertebereich bildet auch die Werte der hier vorliegenden Kenngrößen ab.
2. Auch in der ÖNORM EN 13358 [55] wird für die Berechnung von charakteristischen Kennwerte für Vollholz, Holzwerkstoffe und Verbindungen von einer Lognormalverteilung der Festigkeitseigenschaften ausgegangen.

Laut Brandner [56] ergibt sich aus einer lognormalverteilten Variable  $X$ , von der der natürliche Logarithmus gebildet wird, eine Normalverteilung der Variable.

$$X \sim \text{LND falls } Y = \ln(X) \sim \text{ND} \quad (4.9)$$

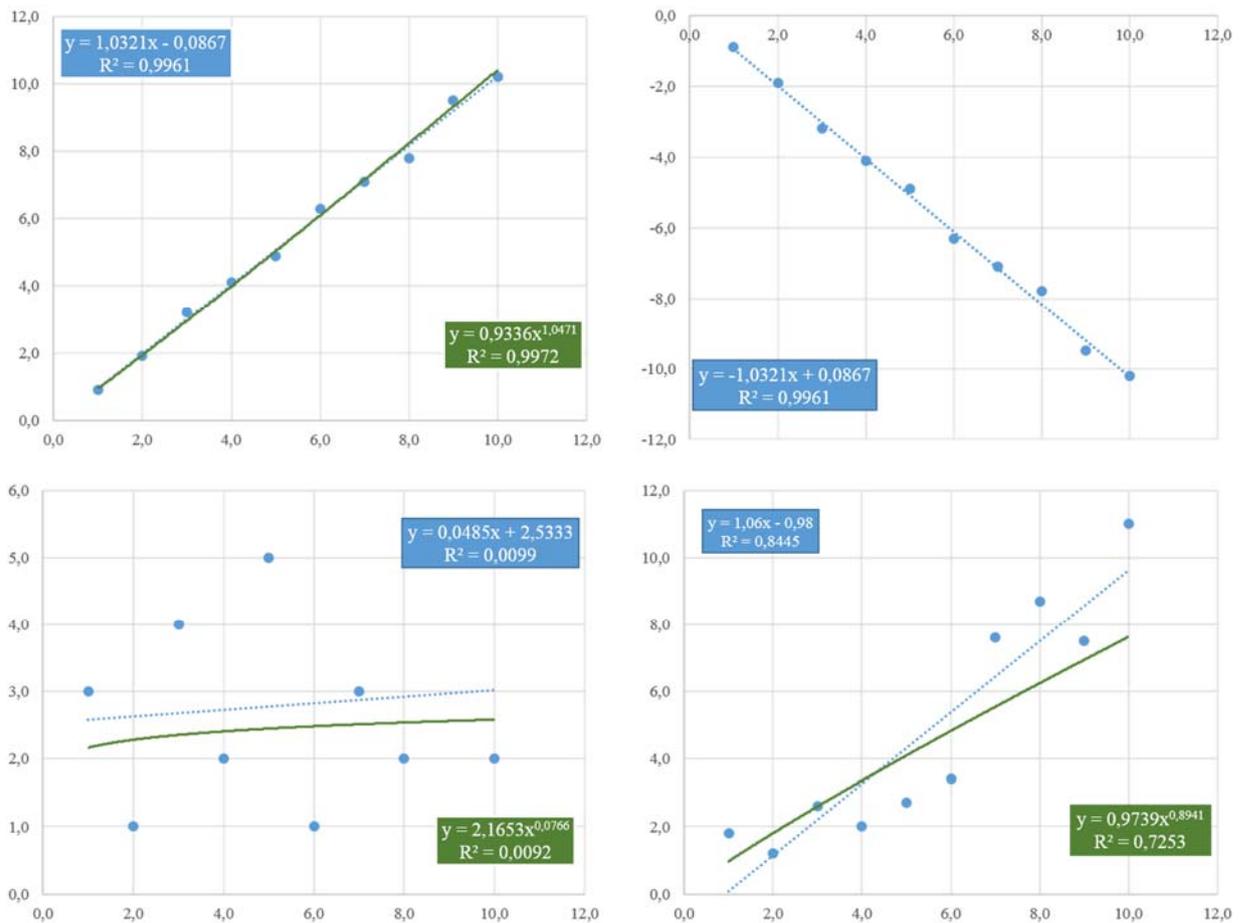
Nach dem logarithmieren der Daten wurden mittels der Softwareapplikation R (Version 3.3.2) Boxplots (vgl. Abbildung 3-22) erstellt, um weitere Ausreißer zu identifizieren. In dieser Darstellung gelten jene Werte als Ausreißer, die um das 1,5-Fache vom Inter-Quartilbereich kleiner als das untere Quartil ( $q_{25}$ ), oder größer als das obere Quartil ( $q_{75}$ ) sind. Diese Grenzen werden durch die Whiskers des Boxplots (siehe Abbildung 3-22) markiert und bilden somit das Minimum und Maximum des jeweiligen Datensatzes.

### 3-6.4 REGRESSIONSANALYSE

Regressionsanalysen machen es möglich, Zusammenhänge zwischen Parametern zu schätzen und somit das Auftreten gewisser Phänomene zu erklären. Tatsächliche Kausalitäten werden dadurch zwar nicht aufgedeckt, jedoch geben diese Analysen wichtige Hinweise in diese Richtung. [57]

Der erste Schritt bei der Regressionsanalyse ist eine Funktion zu finden, die die Beziehung der einzelnen Parameter untereinander bestmöglich beschreibt. Erfahrungen aus der Literatur (siehe [19]) haben gezeigt, dass sich die Linearfunktion und die Exponentialfunktion am besten dafür eignen.

Als Zeichen für den Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen ( $y$ ) und den unabhängigen Variablen ( $x$ ) wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , bzw. Korrelation  $r$  herangezogen. Die Werte von  $R^2$  bzw.  $r$  liegen zwischen -1 und 1. Dabei bedeutet 1 eine vollkommene Korrelation mit ansteigenden Werten (vgl. Abbildung 3-23, oben links) und -1 vollkommene Korrelation mit fallenden Werten (Abbildung 3-23, oben rechts). In Abbildung 3-23 (unten links und unten rechts) sind noch weitere Beispiele für das Korrelationsmaß gegeben.



**Abbildung 3-23:** Beispiele für Linear- und Potenzregression, Interpretation für lineare Korrelation; oben links: starke Korrelation ( $R^2 = 0,996$ ); oben rechts: starke Korrelation ( $R^2 = -0,996$ ) mit fallenden Zusammenhang; unten links: sehr schwache Korrelation ( $R^2 = 0,0099$ ); unten rechts: starke Korrelation ( $R^2 = 0,8445$ )

Als groben Anhaltspunkt für eine mögliche Interpretation kann angenommen werden:

- schwache Korrelation für  $0 \leq R^2 \leq 0,5$ ,
- mittlere Korrelation für  $0,5 \leq R^2 \leq 0,8$  und
- starke Korrelation für  $0,8 \leq R^2 \leq 1$ . [53]

Die oben gezeigte Zuordnung gilt sinngemäß auch für negative Werte. Eine Interpretation der Korrelation  $r$  bzw. des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  lässt sich nur im Zusammenhang mit dem Aussehen der „Punktwolken“ bzw. Streudiagrammen richtig ableiten. [53]

### Lineare-Regressions-Funktion

Die lineare Regression wird im Statistikprogramm „R“ mit dem Befehl `lm` („linear model“) durchgeführt. Hierbei wird  $b$  mit der Methode der kleinsten Fehler-Quadrate geschätzt. Die lineare-Regressions-Funktion besitzt die Form:

$$y = a + b x . \quad (4.10)$$

### **Potenz-Regressions-Funktion**

Die Potenzfunktion besitzt die Form:

$$y = ax^b \quad (4.11)$$

Damit diese auch mit der linearen Form der Methode der kleinsten Fehler-Quadrate und somit mit der lm Funktion in R berechnet werden kann, muss Gleichung (3.9) zuerst linearisiert werden. Dies wird mit dem Logarithmus, wie folgt, erzielt.

$$\ln(y) = \ln(a) + b \ln(x) \quad (4.12)$$

### **Korrelationsanalyse**

Da das Auffinden möglicher Zusammenhänge der Kennwerte (Rohdichte, E-Modul und Querdehnzahl) ein Ziel dieser Arbeit ist, wurden diese Kennwerte einer Korrelationsanalyse unterworfen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson wurde mit der Softwareapplikation R (Version 3.3.2) für alle Kennwerte, die nach der Ausreißerelimination noch paarweise vorhanden waren, durchgeführt. Die Korrelationskoeffizienten wurden für jede Prüfserie in eine Matrix (vgl. Abschnitt 4-1) zusammengefasst um zusammen mit den einzelnen Streudiagrammen einen Überblick über einzelne Zusammenhänge zu schaffen.

## KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

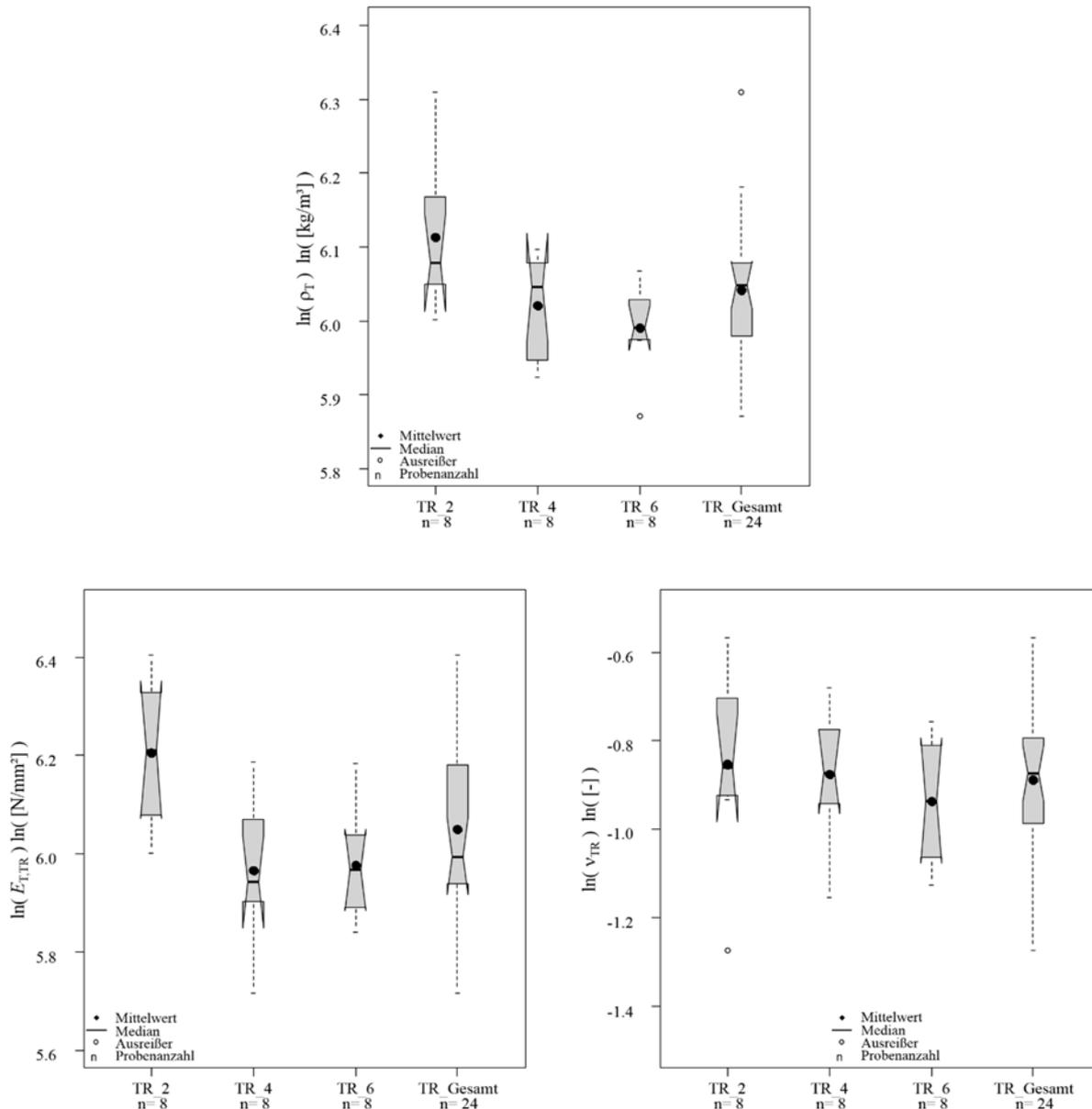
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Belastungsprüfungen zur Bestimmung der Elastizitätszahlen dargestellt und besprochen. Die Prüfungen wurden aufgrund der Auslastung des Labors der Universität für Bodenkultur in Tulln in drei Etappen (März 2018, April 2018 und Juli 2018) durchgeführt. Wie in Kapitel 3: beschrieben, wurden je Orientierung 24 Prüfkörper geprüft. Die Ergebnisse jeder Prüforientierung wurden weiter in die drei Jahrringgruppen ( $a_w = 2$  mm,  $a_w = 4$  mm und  $a_w = 6$  mm) unterteilt und in Form der drei Kennwerte Rohdichte, E-Modul und Querdehnzahl statistisch ausgewertet. Aufgrund des Umstandes, dass die Prüfungen zerstörungsfrei durchgeführt wurden und die Proben gegenwärtig für etwaige noch stattfindende, zerstörende Prüfungen zur Bestimmung der betreffenden Festigkeiten gelagert werden, erfolgte noch keine Bestimmung der Holzfeuchte (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit dem Darrverfahren gemäß ÖNORM EN 13183-1 [58]. Nachdem Grundmaterial und Probekörper jedoch durchgehend unter Normklima gelagert wurden, ist davon auszugehen, dass letztere eine mittlere Holzfeuchte von 12 % zum Zeitpunkt der Prüfung aufwiesen.

### 4-1 ERGEBNISDISKUSSION NACH PRÜFSERIE

#### 4-1.1 ZUGVERSUCHE DER PRÜFSERIE TR

In Abbildung 4-1 sind die Boxplots der Zugversuche der Orientierung TR dargestellt. Abbildung 4-1 (oben) zeigt die Boxplots der Rohdichteverteilung aufgeteilt in die drei Jahrringgruppen, sowie für die gesamte Prüfsérie. Dieser Boxplot identifiziert einen Ausreißer, Prüfkörper TR\_6\_09 mit einer Dichte von  $\rho = 354,8$  kg/m<sup>3</sup>. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch entschieden, keine Prüfergebnisse aufgrund der Lage der jeweiligen Rohdichte zu eliminieren. Somit erfolgte hier keine Anpassung der Daten.

In Abbildung 4-1 (unten links) ist zu erkennen, dass es bei den E-Moduln keine Messwerte außerhalb der Whiskers und somit keine Ausreißer gibt. Bei den Ergebnissen der Querdehnzahlen (siehe Abbildung 4-1, unten rechts) wurde das Ergebnis der Probe TR\_2\_08 eliminiert, da die Querdehnzahl einen unwahrscheinlich, tiefen Wert annimmt. Gründe dafür konnten weder am Prüfkörper, noch in der Messung festgestellt werden. Abbildung 4-1 (oben) zeigt ein deutliches Sinken der Rohdichte mit steigendem nominellen Jahrringabstand. Dies bestätigt den Nutzen der Klassierung in Jahrringgruppen. Eine Übersicht aller Ergebnisse dieser Prüfsérie befindet sich in Tab. B-1.



**Abbildung 4-1:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR, getrennt nach Jahrringgruppe sowie für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

Die mittlere Rohdichte dieser Serie beträgt  $\rho = 417 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 10 \%$ . Die bereinigten Messdaten sind in Abbildung 4-5 als Streudiagramme dargestellt. Tabelle 4-1 zeigt die dazugehörigen statistischen Kennwerte, getrennt nach Jahrringgruppe und als Gesamtes für diese Prüferie.

Im Vergleich mit einem Mittelwert der Querdehnzahlen aus der Literatur ( $\nu_{TR} = 0,321$ , vgl. Tabelle 2-5), fällt die Messung dieser Arbeit ( $\nu_{TR} = 0,41$ ) mit einer Streuung von  $\text{COV} = 16 \%$  um 22 % höher aus. Im Vergleich mit der Arbeit von Kumpenza [34] ( $\nu_{TR, \text{ESPI}} = 0,739$ ) liegt der hier gemessene Wert um 44 % tiefer als dessen ESPI-Messung und um 40 % im Vergleich mit den Laser- und Video-Extensometer-Messungen ( $\nu_{TR, \text{Laser}} = 0,69$ ) aus [34].

Der E-Modul über die gesamte Prüferie ergibt sich im Mittel zu  $E_{T, TR} = 439 \text{ N/mm}^2$  mit einer Streuung in Form von  $\text{COV} = 18 \%$ . Dieser Wert entspricht den Literaturwerten (vgl. Tabelle 2-5), die im Mittel einen Wert von  $487 \text{ N/mm}^2$  annehmen.

In Abbildung 4-2 (oben links) ist der Zusammenhang zwischen E-Modul und Rohdichte dargestellt. Anhand der Lage der einzelnen Daten zueinander und zu den dargestellten Trendlinien sowie auf Basis des vergleichsweise hohen Korrelationskoeffizienten von 0,72 kann für diesen Zusammenhang eine relativ hohe, positive Korrelation festgestellt werden; vgl. Abbildung 4-2 (unten rechts).

Zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte (vgl. Abbildung 4-2, oben rechts), bzw. zwischen der Querdehnzahl und dem E-Modul (siehe Abbildung 4-2, unten links) besteht ebenfalls eine positive Korrelation. Dies wird auch in Abbildung 4-2 (unten rechts) gezeigt. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,61 zwischen Querdehnzahl und Rohdichte, bzw. 0,54 zwischen Querdehnzahl und E-Modul ist dieser zwar nicht mehr so ausgeprägt wie zwischen E-Modul und Rohdichte, aber dennoch deutlich erkennbar.

Bei näherer Betrachtung der Jahrringgruppe  $a_w = 4$  mm (siehe Tabelle 4-1, oben rechts) und der Jahrringgruppe  $a_w = 6$  mm (siehe Tabelle 4-1, unten links) ist der zuvor erwähnte Rohdichteunterschied der Mittelwerte dieser zwei Gruppen nicht so stark ausgeprägt, wie vorerst angenommen. Folglich nehmen auch der E-Modul und die Querdehnzahl ähnliche Werte an. Dennoch ist der Unterschied Jahrringgruppe  $a_w = 2$  mm (siehe Tabelle 4-1, oben links) klar gegeben.

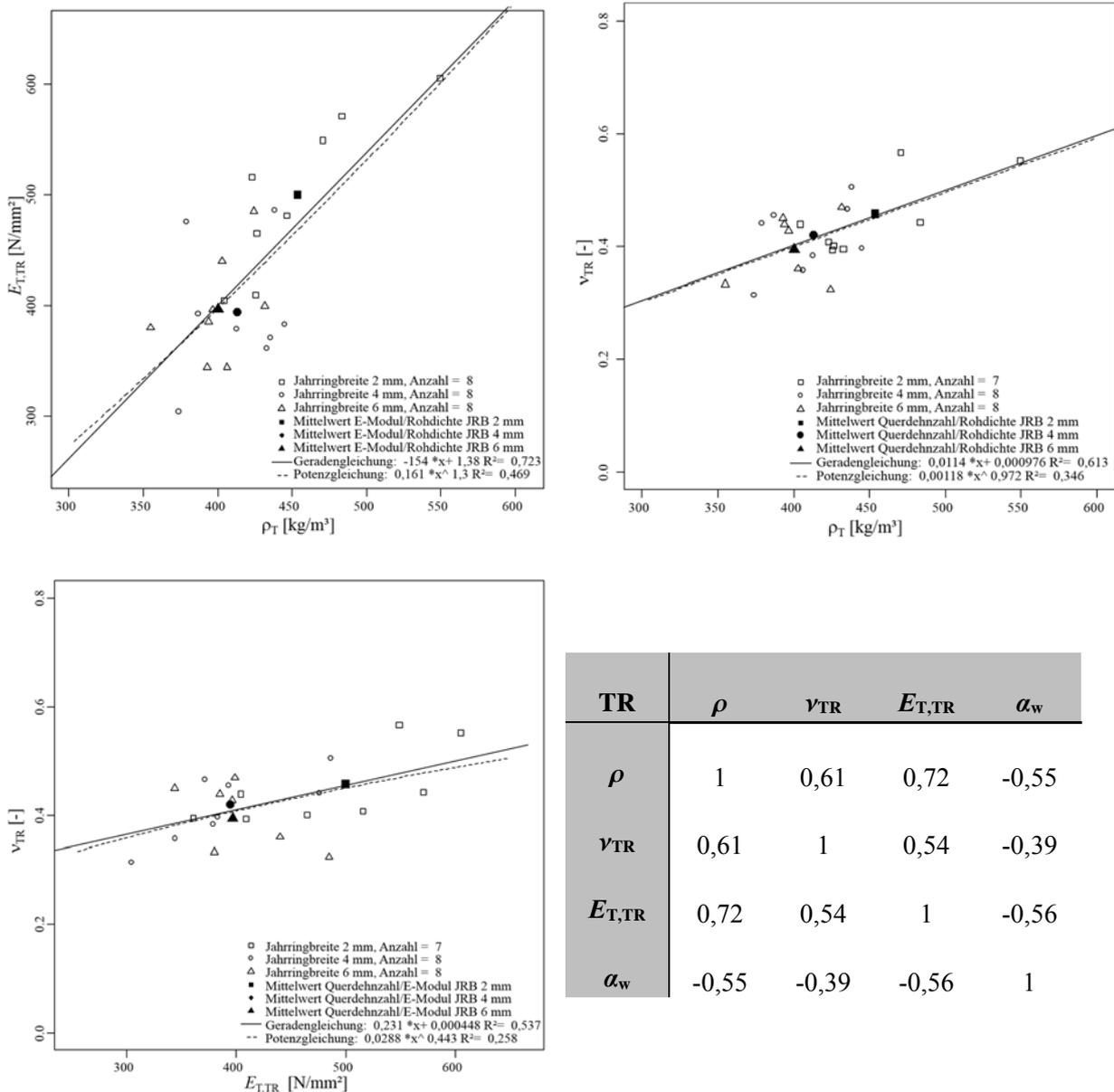
**Tabelle 4-1:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche TR; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2$  mm; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4$  mm; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6$  mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen

TR_2_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TR}$	$\nu_{TR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7
Min	404	404	0,39
Median	437	499	0,44
Max	550	605	0,57
<b>Mittelwert</b>	<b>454</b>	<b>500</b>	<b>0,46</b>
Standartabw.	47	73	0,07
COV	10%	15%	16%

TR_4_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TR}$	$\nu_{TR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	8
Min	374	304	0,32
Median	422	381	0,42
Max	445	486	0,51
<b>Mittelwert</b>	<b>413</b>	<b>394</b>	<b>0,42</b>
Standartabw.	29	60	0,06
COV	7%	15%	14%

TR_6_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TR}$	$\nu_{TR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	8
Min	355	344	0,32
Median	400	391	0,39
Max	432	485	0,47
<b>Mittelwert</b>	<b>400</b>	<b>406</b>	<b>0,40</b>
Standartabw.	23	47	0,06
COV	6%	12%	14%

TR_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{T,TR}$	$\nu_{TR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	24	24	23
Min	355	304	0,315
Median	424	402	0,428
Max	550	605	0,567
<b>Mittelwert</b>	<b>417</b>	<b>439</b>	<b>0,412</b>
Standartabw.	40	77	0,065
COV	10%	18%	16%



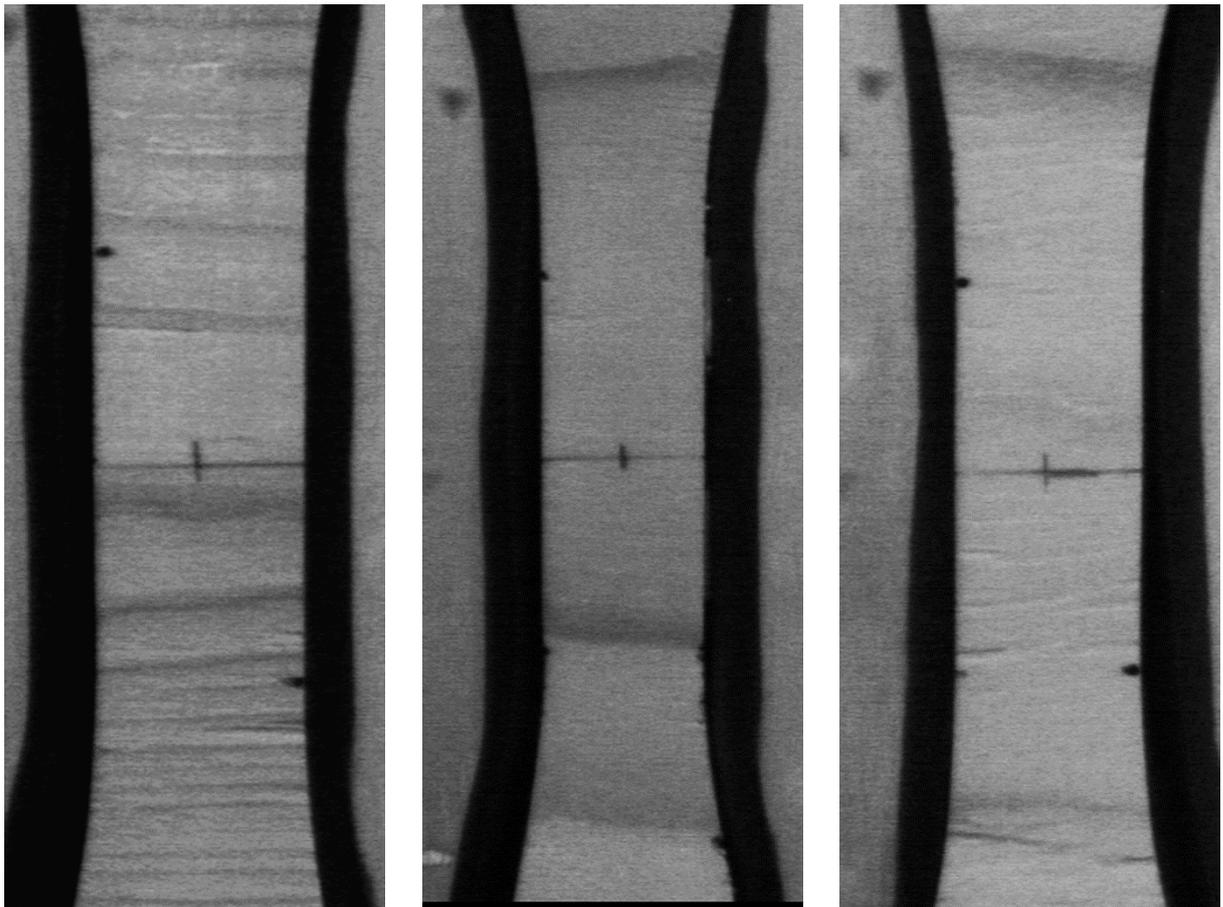
**Abbildung 4-2:** Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche TL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

### 4-1.2 ZUGVERSUCHE DER PRÜFSERIE TL

Bei der Serie TL gab es einige Schwierigkeiten bei den Messungen. Aufgrund des großen Steifigkeitsunterschiedes zwischen den Querrichtungen und der Längsrichtung des Holzes, sind die Einschnürungen in Längsrichtung sehr klein und schwer zu erfassen. Ein weiterer Punkt, der bei Messungen in dieser Orientierung aufgefallen ist, ist, dass es bei den meisten Messungen zu Vorzeichenunterschieden zwischen den beiden Messeinheiten gekommen ist. Dies bedeutet, dass von einer Kamera eine positive Dehnung (Aufweitung) und von der anderen eine negative Dehnung (Einschnürung) gemessen wurde, was ggf. auf eine Verzängung der Probe in der Einspannung und damit einhergehend auf auftretende, additive Dehnungsanteile zufolge Biegeverformung der Probe, welche bei diesen kleinen Dehnungswerten

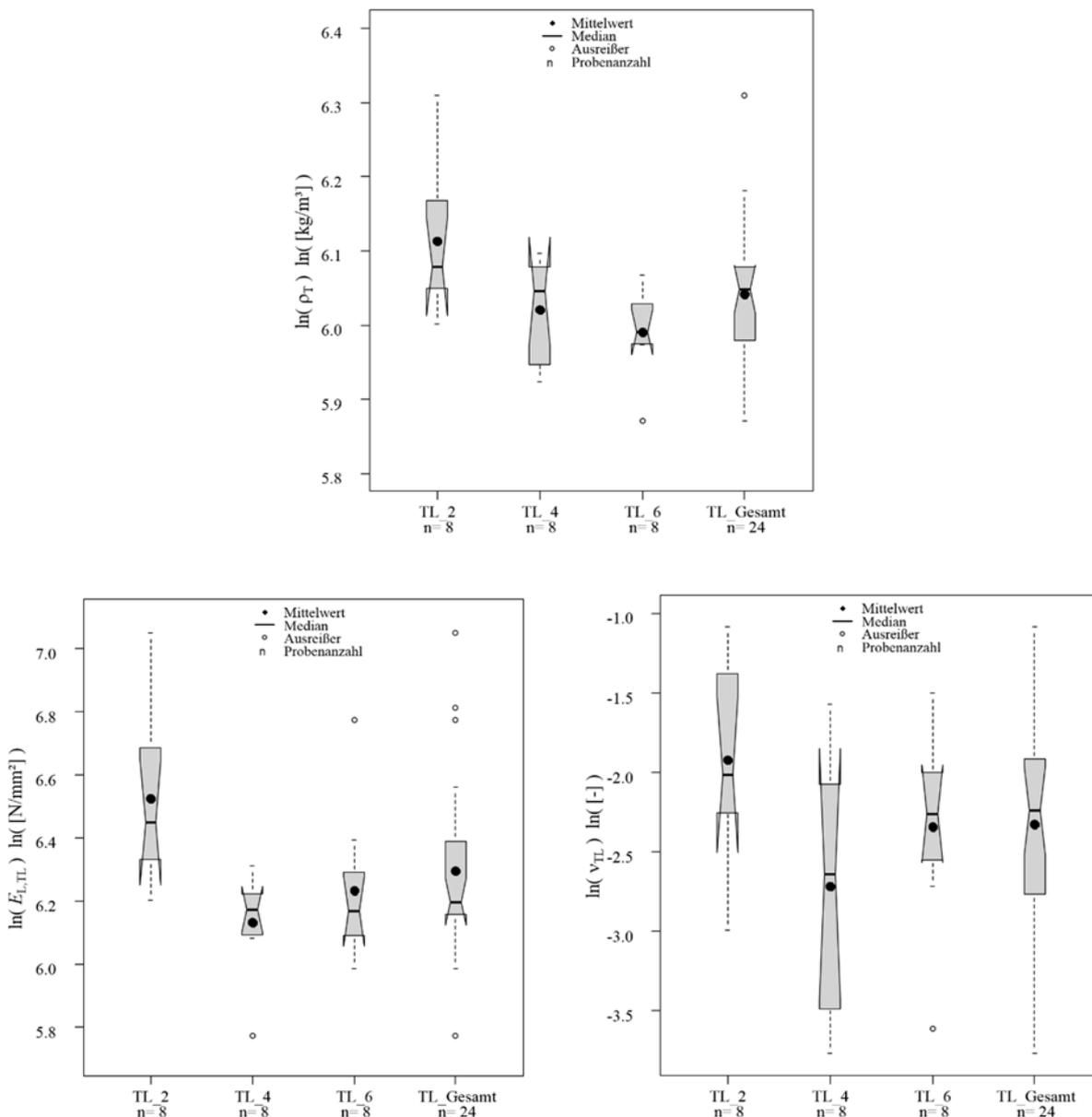
möglicherweise einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben, zurückzuführen ist. Über die Mittelwertbildung der beiden Messinstrumente haben sich aber die betragsmäßig kleineren positiven Querdehnungen  $\epsilon_L$  wieder aufgehoben. Wegen dieser Schwierigkeiten in der messtechnischen Erfassung sind die Querdehnzahlen für die Orientierung TL als auch für RL in der Literatur meist keine Messwerte, sondern nach Gleichung (2.11) berechnet. Die hier zur Vollständigkeit dargestellten Ergebnisse sind die tatsächlich gemessenen. Zum Vergleich ist in Tabelle 2-5 auch der berechnete Wert angegeben.

Eine weitere Ursache für die Unterschiede der Ergebnisse bei der Prüfsérie TL ist auf die Oberfläche des Messfeldes zurückzuführen. Diese wird mit unregelmäßigen Anteilen von Früh- bzw. Spätholz geprägt. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft eine solche Oberflächenbeschaffenheit der Proben der Série TL.



**Abbildung 4-3:** Ansichten verschiedener Prüfkörper mit inhomogenen Früh- bzw. Spätholzanteil im Messfeld;  
links: TL\_2\_24; Mitte: TL\_4\_17; rechts: TL\_6\_23

In Abbildung 4-4 sind die Boxplots mit den logarithmierten Daten der Série TL abgebildet. Auf eine Ausreißerelimination aufgrund der Rohdichte wurde wieder verzichtet. Für den Kennwert E-Modul wurden die Probekörper TL\_4\_24 und TL\_6\_05 in der Auswertung gestrichen. Bezüglich der Querdehnung wurde der Probekörper TL\_6\_09 eliminiert. Die vollständigen Prüfergebnisse sind in Tab. B-2 dargestellt.



**Abbildung 4-4:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL, getrennt nach Jahrringgruppen sowie für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

Der mittlere E-Modul dieser Prüferserie beträgt  $E_{T,TL} = 539 \text{ N/mm}^2$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 33 \%$ . Im Vergleich mit dem Mittelwert von  $482 \text{ N/mm}^2$  aus der Literatur (vgl. Tabelle 2-5) liegt dieser Wert etwas höher, doch der Mittelwert aus den Prüferserien TR und TL ( $487 \text{ N/mm}^2$ ) deckt sich sehr gut mit den in Tabelle 2-5 angeführten Literaturwerten. Die Streuung der Rohdichte ( $\text{COV} = 10 \%$ ) liegt in einem angemessenen Bereich und wird hier nicht weiter diskutiert.

Die bereinigten Daten sind in Abbildung 4-5 als Streudiagramm dargestellt. Auch hier lässt sich wieder ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Kennwerten erkennen. Zwischen dem E-Modul und der Rohdichte lässt sich ein Korrelationskoeffizient von  $0,81$  beobachten (vgl. Abbildung 4-5, oben links). Auffallend sind die, im Vergleich zu den anderen Jahrringgruppen, niedrigen Werte der Querdehnzahl der Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$  (siehe Tabelle 4-2, oben rechts und Abbildung 4-5, unten rechts). Dies kann auf die zuvor erwähnten Messschwierigkeiten der Längsdehnung bei Belastung quer zur Faser zurückgeführt werden. Daher sind den Ergebnissen der Querdehnzahl der Orientierung TL nur mäßiges Vertrauen

entgegenzubringen. Wie Abbildung 4-5 (oben rechts) zeigt, besitzt die Korrelation zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,44 eine vergleichsweise schwache Ausprägung. Die Querdehnzahl und der E-Modul korrelieren mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,66, wie in Abbildung 4-5 (unten links) zu sehen ist.

Tabelle 4-2 zeigt eine große Streuung der Querdehnzahl mit Werten des Variationskoeffizienten zwischen (COV = 50 %) in der Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$  und (COV = 76 %) in der Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$ . Die mittlere Querdehnzahl der Prüfsérie TL ( $\nu_{TL} = 0,12$ ) mit einer Streuung von (COV = 66 %) ist um 82 % höher als der Mittelwert der Literaturergebnisse ( $\nu_{TL, Lit} = 0,022$ ) (vgl. Tabelle 4-2) und um 65 % höher als die ESPI-Messungen von Kumpenza [34]  $\nu_{TL, Kumpenza} = 0,041$ . Der nach Gleichung (2.11) berechnete Wert ( $\nu_{TL, calc} = 0,017$ ) deckt sich wiederum sehr gut mit den Literaturergebnissen. Die mittlere Rohdichte dieser Serie beträgt  $\rho = 417 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von COV = 10 %.

**Tabelle 4-2:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche TL; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$ ; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$ ; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$ ; unten rechts: alle Jahrringgruppen

TL_2_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TL}$	$\nu_{TL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	8
Min	404	494	0,050
Median	437	634	0,134
Max	550	1152	0,425
<b>Mittelwert</b>	<b>454</b>	<b>714</b>	<b>0,182</b>
Standartabw.	47	222	0,121
COV	10%	31%	67%

TL_4_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TL}$	$\nu_{TL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	7	8
Min	374	438	0,023
Median	422	483	0,073
Max	445	550	0,207
<b>Mittelwert</b>	<b>413</b>	<b>486</b>	<b>0,087</b>
Standartabw.	29	39	0,066
COV	7%	8%	76%

TL_6_xx			
	Rohdichte	$E_{T,TL}$	$\nu_{TL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	7	7
Min	355	398	0,066
Median	400	476	0,109
Max	432	599	0,223
<b>Mittelwert</b>	<b>400</b>	<b>454</b>	<b>0,102</b>
Standartabw.	23	64	0,051
COV	6%	14%	50%

TL_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{T,TL}$	$\nu_{TL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	24	22	23
Min	355	398	0,023
Median	424	492	0,109
Max	550	1152	0,425
<b>Mittelwert</b>	<b>417</b>	<b>539</b>	<b>0,129</b>
Standartabw.	40	177	0,092
COV	10%	33%	71%

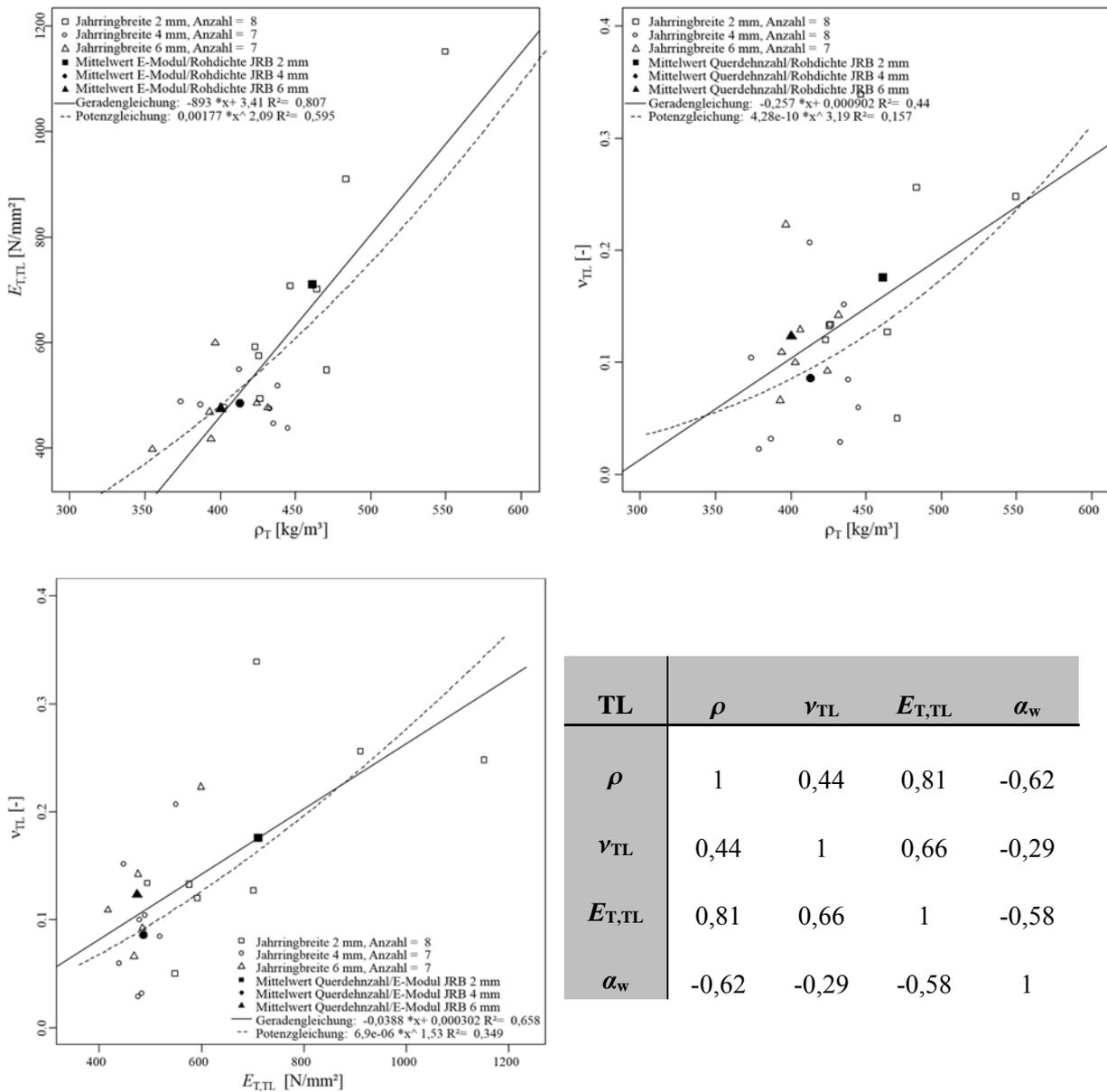
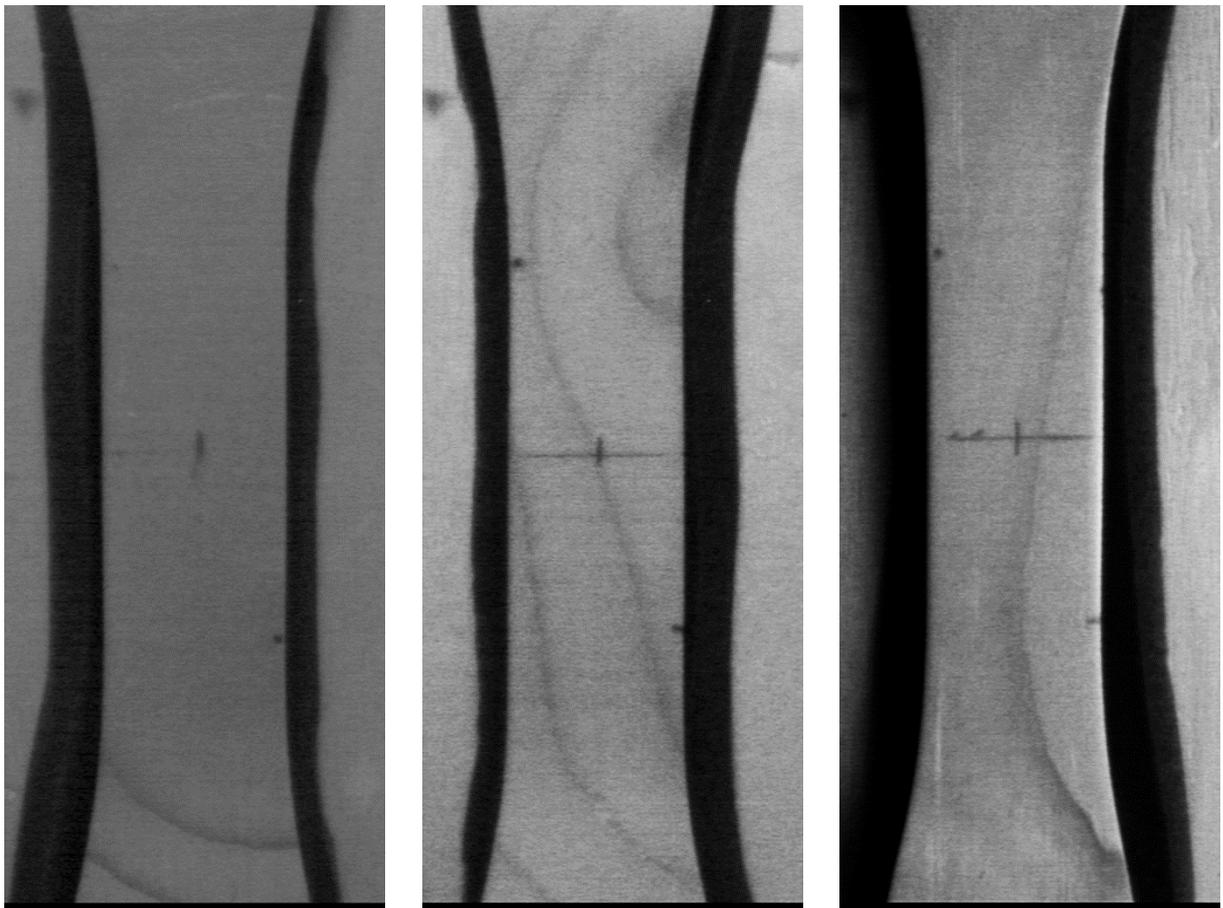


Abbildung 4-5: Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche TL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

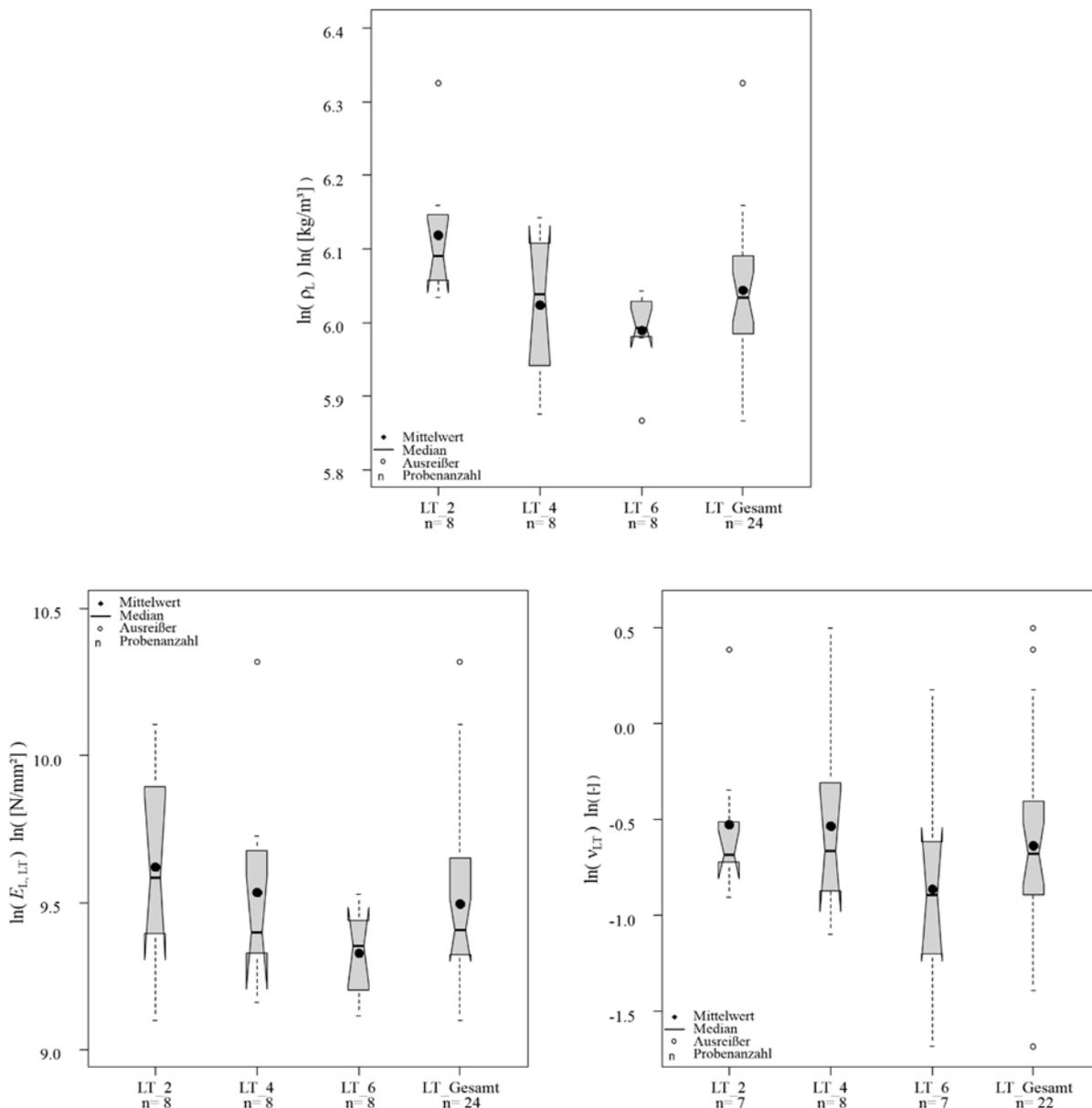
### 4-1.3 ZUGVERSUCHE DER PRÜFSERIE LT

Ähnlich der zuvor besprochenen Serie TL, gibt es aufgrund des Jahringanschnitts bei der Probenherstellung auch bei der Serie LT Probleme mit der Verteilung von Früh- und Spätholzanteilen auf der Messoberfläche. In Abbildung 4-6 sind beispielhaft drei Ansichten von Prüfkörpern dieser Prüfsérie dargestellt. Aus diesem Grund mussten einige Messungen wiederholt werden, da es teilweise zu unbrauchbaren (da unrealistischen) Ergebnissen gekommen ist. Die letztendlich verwendeten, unbereinigten Ergebnisse sind in logarithmierter Form als Boxplots in Abbildung 4-7 dargestellt. Eine weitere Auffälligkeit bei den Prüfungen der Serie LT als auch bei der Serie LR, war das Relaxieren der Prüfkörper während der Haltezeit. Deshalb war darauf zu achten, die ESPI-Aufnahmen sofort nach Erreichen des Lastplateaus zu erstellen.



**Abbildung 4-6:** Ansichten verschiedener Prüfkörper mit inhomogenen Früh- bzw. Spätholzanteil im Messfeld;  
links: LT\_2\_30; Mitte: LT\_4\_06; rechts: LT\_6\_26

Aus dem Boxplot in Abbildung 4-7 (unten links) ist zu erkennen, dass es beim Kennwert E-Modul nur einen Ausreißer (LT\_4\_04) zu eliminieren gab. Für die Querdehnzahl sind, wie in Abbildung 4-7 (unten rechts) zu erkennen ist, drei Prüfkörper aus der Auswertung entnommen worden. Diese sind: LT\_2\_30, LT\_4\_04 und LT\_6\_23. Zudem sind schon vor der Ausreißeridentifikation die Prüfkörper LT\_2\_12 und LT\_6\_13 wegen Plausibilitätsproblemen gestrichen worden (vgl. Tab. B-3).



**Abbildung 4-7:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

In Tabelle 4-3 sind die statistischen Kennwerte dieser Serie dargestellt. Die mittlere Rohdichte dieser Serie beträgt  $\rho = 414 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 10 \%$ . Die Streuung des E-Moduls ( $\text{COV} = 33 \%$ ) in der Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$  liegt im Vergleich mit der Literatur [32, 34] etwas höher, doch für die Jahrringgruppen  $a_w = 4 \text{ mm}$  ( $\text{COV} = 20 \%$ ) und  $a_w = 6 \text{ mm}$  ( $\text{COV} = 15 \%$ ) liegt er wieder in einem angemessenen Bereich. Über die gesamte Prüferie ergibt sich ein Mittelwert des E-Modul von  $E_{L,LT} = 11376 \text{ N/mm}^2$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 34 \%$ , der sich sehr gut mit den Literaturwerten in Tabelle 2-5 deckt.

Die Querdehnzahl für diese Prüferie ergibt sich im Mittel zu  $\nu_{LT} = 0,46$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 33 \%$ . Im Vergleich mit dem Mittel aus den Literaturwerten ( $\nu_{LT, Lit} = 0,505$ , vgl. Tabelle 2-5), liegt die hier gemessene Querdehnzahl geringfügig tiefer. Auch hier liegt der Variationskoeffizient im Vergleich mit Kumpenza [34] ( $\text{COV} = 19,7 \%$ ), Niemz-Caduff [32] ( $\text{COV} = 18 \%$ ) und Keunecke [33] ( $\text{COV} = 8,2 \%$ ) höher.

Wie in Abbildung 4-8 zu sehen ist, gibt es in der Prüferie LT nur schwache bis mittlere Korrelationen zwischen den einzelnen Kennwerten. So beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen E-Modul und Rohdichte 0,54 (vgl. Abbildung 4-8, oben links und unten rechts). Zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte stellt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,4 ein (vgl. Abbildung 4-8, oben rechts und unten rechts), sowie 0,17 zwischen der Querdehnzahl und dem E-Modul (vgl. Abbildung 4-8, unten links und unten rechts).

**Tabelle 4-3:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche LT; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$ ; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$ ; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$ ; unten rechts: alle Jahrringgruppen

LT_2_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LT}$	$\nu_{LT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	6,000
Min	417	8963	0,404
Median	442	14611	0,501
Max	558	24521	0,707
<b>Mittelwert</b>	<b>456</b>	<b>15808</b>	<b>0,517</b>
Standartabw.	46	5212	0,101
COV	10%	33%	20%

LT_4_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LT}$	$\nu_{LT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	7	7
Min	356	9509	0,334
Median	419	11993	0,508
Max	465	16769	0,813
<b>Mittelwert</b>	<b>415</b>	<b>12592</b>	<b>0,526</b>
Standartabw.	40	2506	0,164
COV	10%	20%	31%

LT_6_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LT}$	$\nu_{LT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	6
Min	353	9087	0,186
Median	401	11534	0,388
Max	421	13741	0,573
<b>Mittelwert</b>	<b>399</b>	<b>11013</b>	<b>0,338</b>
Standartabw.	21	1668	0,148
COV	5%	15%	44%

LT_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{L,LT}$	$\nu_{LT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	24	23	19
Min	353	8963	0,186
Median	418	12144	0,496
Max	558	24521	0,813
<b>Mittelwert</b>	<b>414</b>	<b>11376</b>	<b>0,458</b>
Standartabw.	43	3889	0,150
COV	10%	34%	33%

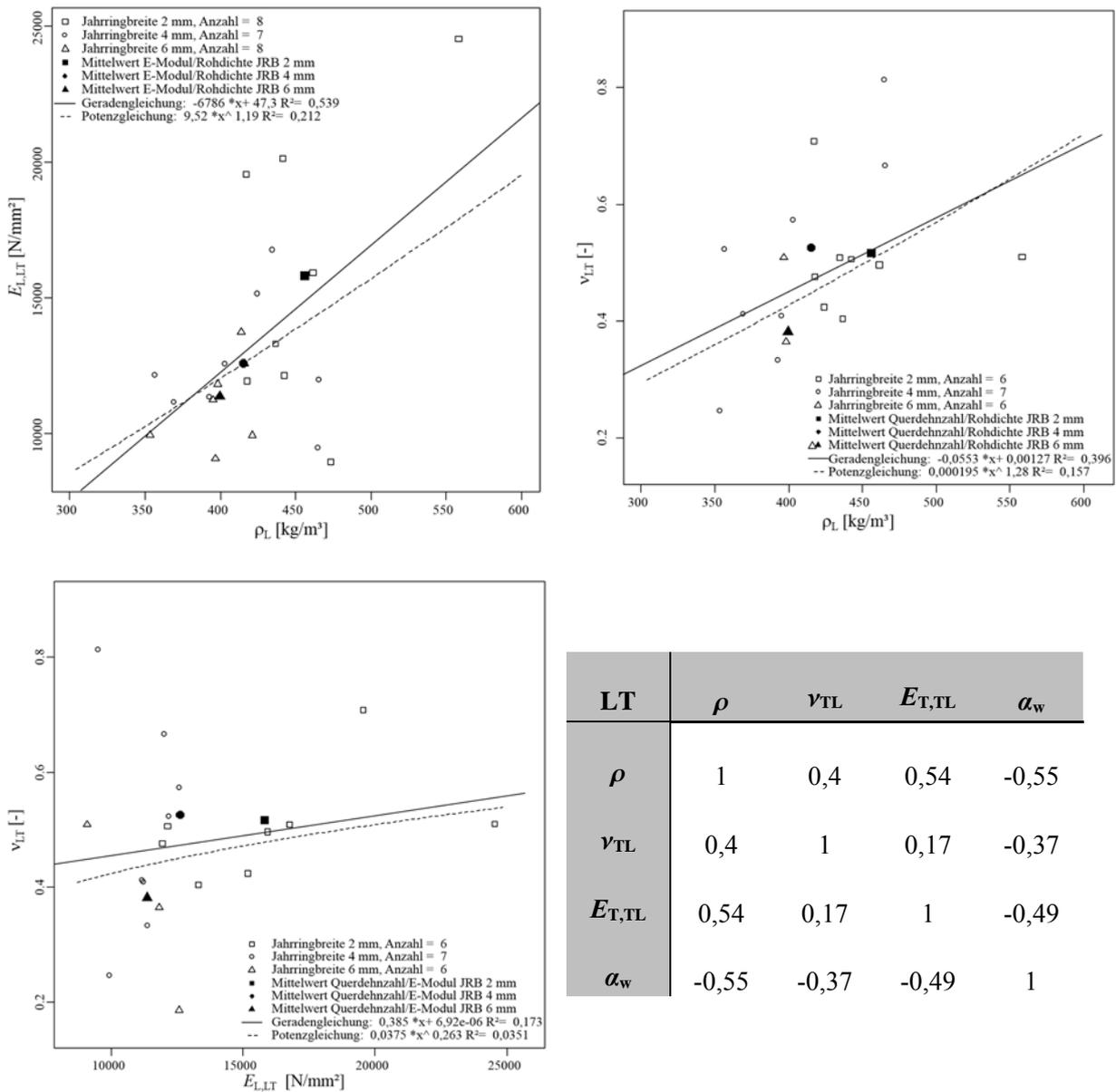
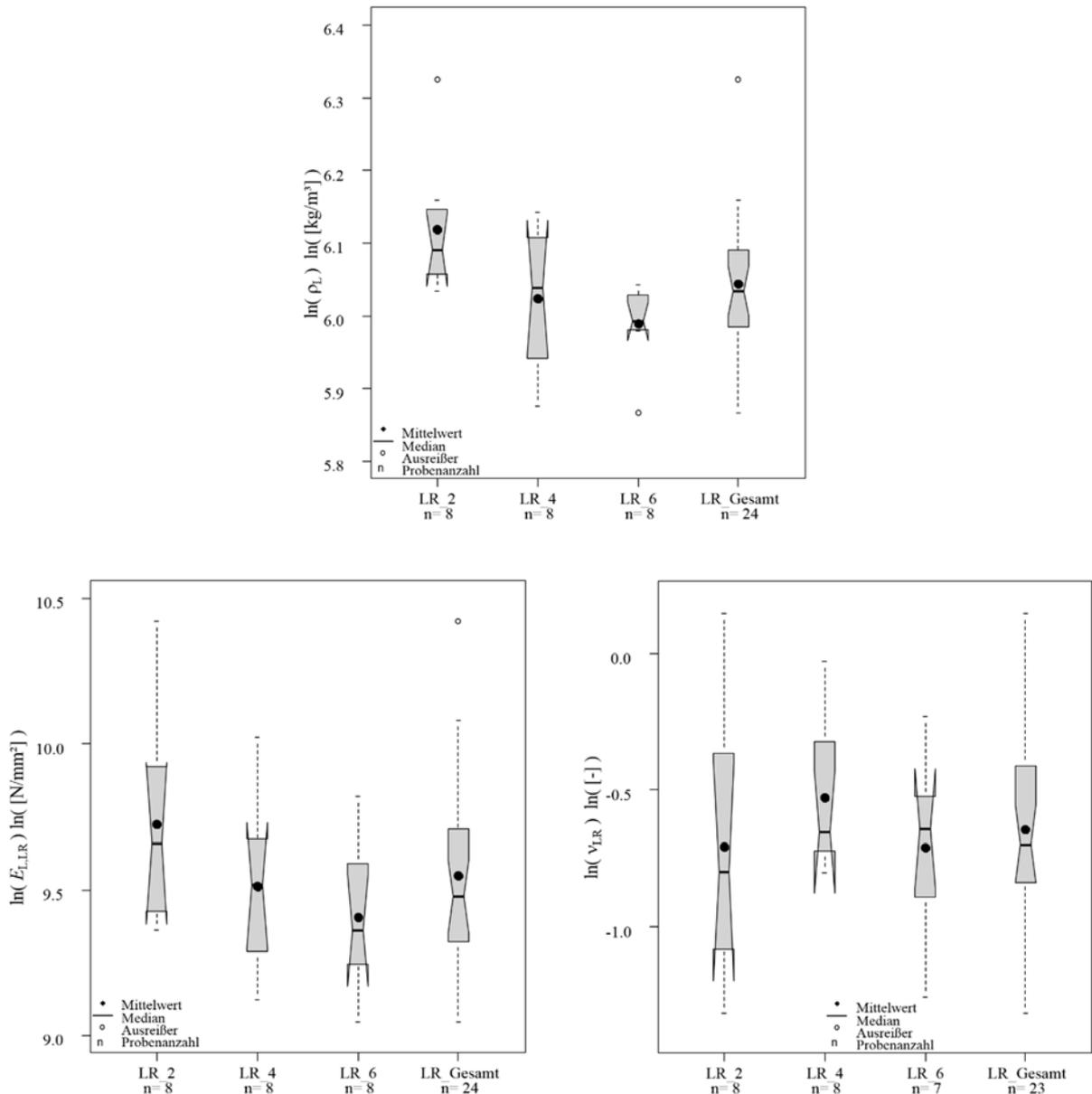


Abbildung 4-8: Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche LT; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

### 4-1.4 ZUGVERSUCHE DER PRÜFERIE LR

Die Messungen der Prüferie LR sind ohne besondere Vorkommnisse verlaufen. In Abbildung 4-9 sind die Boxplots mit den logarithmierten Prüfdaten abgebildet. Anhand dieser wurde die Ausreißerkorrektur durchgeführt. Abbildung 4-9 (unten links) zeigt zwar keinen Ausreißer für den E-Modul, dennoch wurde der E-Modul-Wert des Prüfkörpers LR\_2\_24 aus Plausibilitätsgründen gestrichen. Des Weiteren wurde vom Prüfkörper LR\_6\_14 nur der E-Modul-Wert eines Messsystems für die Auswertung herangezogen. Auch hier musste der zweite Messwert aus Plausibilitätsgründen verworfen werden. Ebenso wurde die Querdehnzahl des Prüfkörpers LR\_6\_14 komplett für die Auswertung gestrichen (vgl. Tab. B-4).



**Abbildung 4-9:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

Tabelle 4-4 zeigt eine Übersicht der statistischen Kennwerte dieser Prüferie unterteilt in die Jahrringgruppen und als Gesamtes. Die mittlere Rohdichte dieser Serie beträgt  $\rho_L = 424 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 10 \%$ . Die Streuung des E-Moduls mit einem Mittelwert von  $E_{L,LR} = 14002 \text{ N/mm}^2$

der gesamten Prüferie liegt mit einem Variationskoeffizienten von  $COV = 29\%$  relativ hoch im Vergleich zu den Arbeiten von Kumpenza [34] ( $E_L = 14635 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 18,2\%$ ), Niemz und Caduff [32] ( $E_L = 11496 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 20\%$ ) und Keunecke [33] ( $E_L = 12800 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 9,2\%$ )

Die Querdehnzahl für diese Prüferie beträgt  $\nu_{LR} = 0,57$  im Mittel und weist einen Variationskoeffizienten von  $COV = 41\%$  auf. Im Vergleich mit dem Mittelwert der Literaturangaben ( $\nu_{LR, Lit} = 0,45$ ), liegt der gemessene Wert um  $21\%$  höher. Die Ergebnisse der Video- und Laser-Extensometer Messungen von Kumpenza [34] ( $\nu_{LR, Kumpenza} = 0,706$ ) sind um  $20\%$  höher als die in dieser Arbeit. Eine Übersicht über die Literaturwerte und den Messungen dieser Arbeit ist in Tabelle 2-5 abgebildet.

**Tabelle 4-4:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche LR; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$ ; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$ ; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$ ; unten rechts: alle Jahrringgruppen

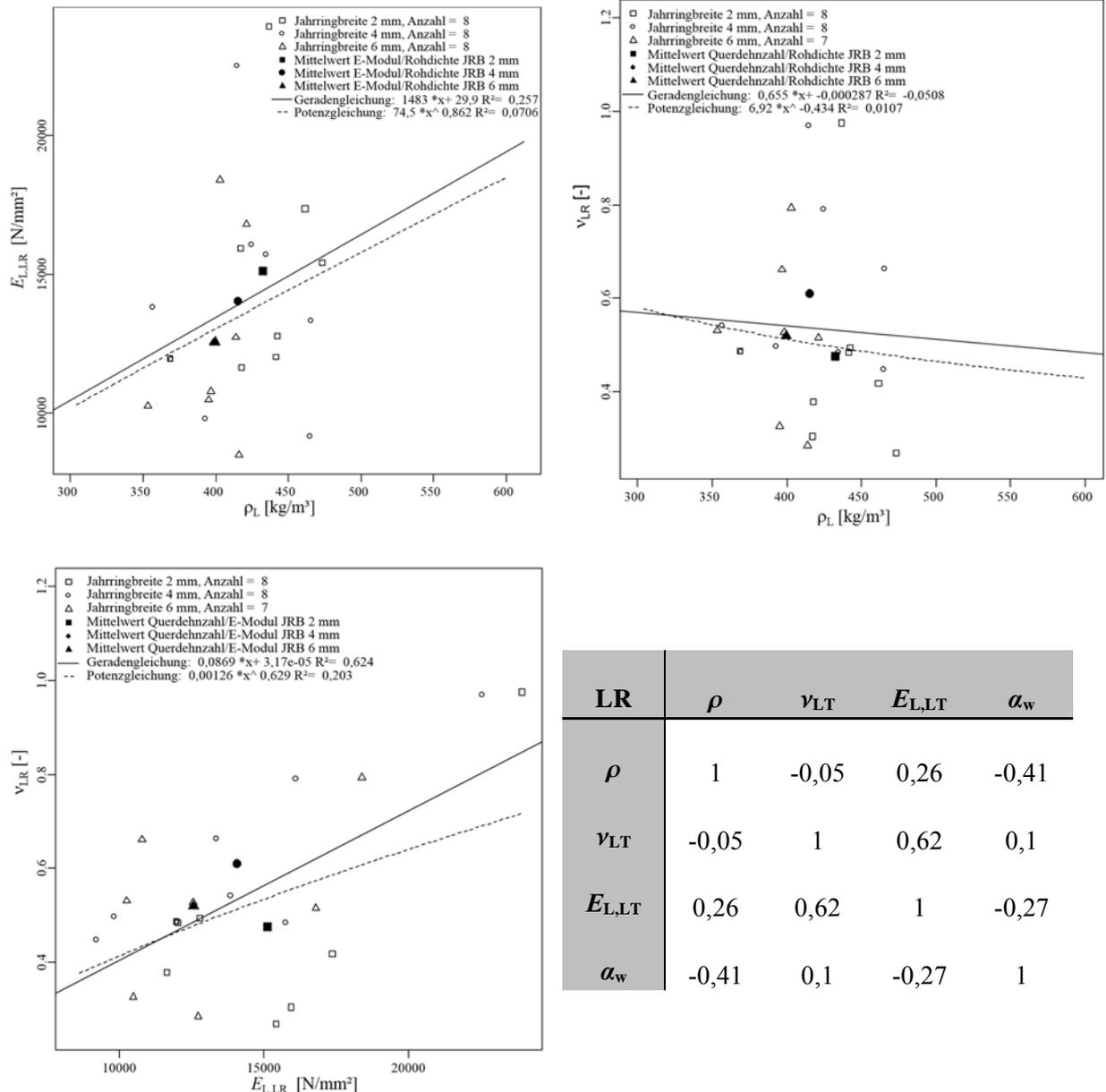
LR_2_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LR}$	$\nu_{LR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	7	8,000
Min	417	11638	0,268
Median	442	15417	0,451
Max	558	23929	1,158
<b>Mittelwert</b>	<b>456</b>	<b>15584</b>	<b>0,560</b>
Standartabw.	46	4263	0,326
COV	10%	27%	58%

LR_4_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LR}$	$\nu_{LR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	8,000
Min	356	9168	0,448
Median	419	13592	0,520
Max	465	22528	0,970
<b>Mittelwert</b>	<b>415</b>	<b>14059</b>	<b>0,610</b>
Standartabw.	40	4234	0,185
COV	10%	30%	30%

LR_6_xx			
	Rohdichte	$E_{L,LR}$	$\nu_{LR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7,000
Min	353	8492	0,284
Median	401	11665	0,527
Max	421	18403	0,793
<b>Mittelwert</b>	<b>400</b>	<b>12559</b>	<b>0,519</b>
Standartabw.	21	3415	0,177
COV	5%	27%	34%

LR_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{L,LR}$	$\nu_{LR}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	24	23	23
Min	353	8492	0,268
Median	418	12790	0,498
Max	558	23929	1,158
<b>Mittelwert</b>	<b>424</b>	<b>14002</b>	<b>0,565</b>
Standartabw.	43	3991	0,234
COV	10%	29%	41%

Abbildung 4-10 stellt die Zusammenhänge der einzelnen Kennwerte dar. Im Allgemeinen sind die Korrelationen dieser Orientierung sehr schwach ausgebildet. Nur der Zusammenhang zwischen Querdehnzahl und E-Modul weist eine mittlere Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von  $0,62$  auf (vgl. Abbildung 4-10, unten links). Der Korrelationskoeffizient zwischen E-Modul und Rohdichte beträgt  $0,26$  (siehe Abbildung 4-10 oben links) und zwischen Querdehnzahl und Rohdichte  $-0,05$ , was – im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Beziehungen Querdehnzahl vs. Rohdichte – sogar zu einem (wenn auch nicht signifikanten) Abfall der Querdehnzahl mit zunehmender Rohdichte führt (vgl. Abbildung 4-10, unten rechts). Somit konnte für diese Kennzahlen in dieser Orientierung quasi kein nennenswerter Zusammenhang bestimmt werden.



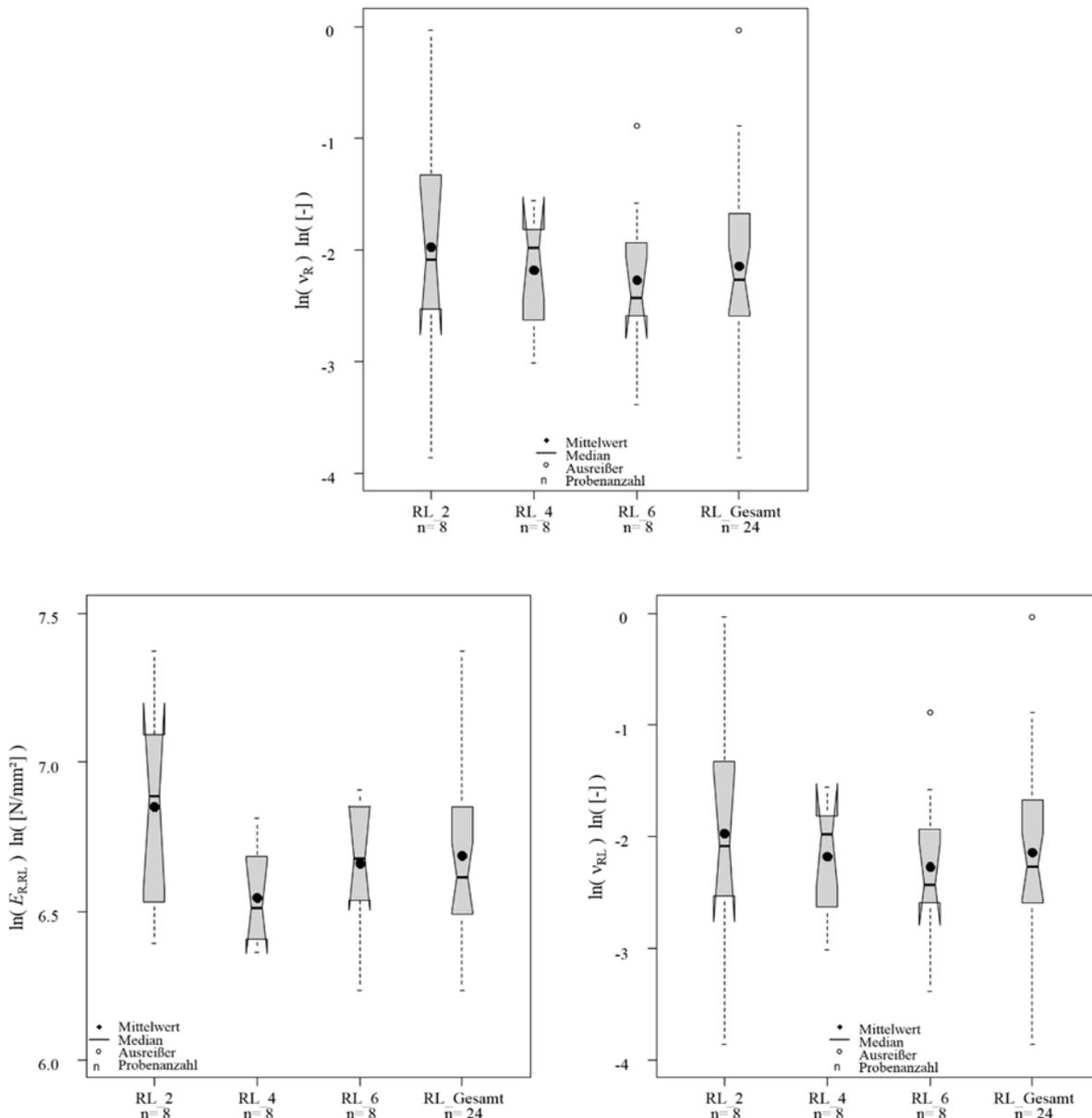
**Abbildung 4-10:** Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche LR; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

### 4-1.5 ZUGVERSUCHE DER PRÜFERSERIE RL

Bei dieser Prüferie gab es ähnliche Problem wie bei der Prüferie TL (vgl. Abschnitt 4-1.2) bezüglich der Messbarkeit der Dehnung in Längsrichtung bei Belastung in Querrichtung aufgrund der minimalen Verformungen.

Abbildung 4-11 zeigt die Boxplots mit den logarithmierten Daten dieser Prüferie. Wie in Abbildung 4-11 (unten rechts) zu sehen ist, stellt der Prüfkörper RL\_6\_26 den einzigen Ausreißer der Querdehnzahlen dar. Des Weiteren wurde auch noch der Prüfkörper RL\_2\_08 auf Grund von Plausibilität aus dem Datensatz

der Querdehnzahlen dieser Prüferie gestrichen. Die Rohdichtedaten blieben wie bei den anderen Prüferien zuvor unberührt. Die gesamten Ergebnisse sind in Tab. B-5 dargestellt.



**Abbildung 4-11:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

Tabelle 4-5 sind die statistischen Kennwerte getrennt nach Jahrringgruppen und als gesamtes der Prüferie RL dargestellt. Die mittlere Rohdichte dieser Serie beträgt  $\rho = 409 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 10\%$ . Der mittlere E-Modul dieser Prüferie beträgt  $E_R = 886 \text{ N/mm}^2$  mit einem Variationskoeffizienten von  $\text{COV} = 29\%$ . Dieser hohe Variationskoeffizient ist vor allem der Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$  mit einem Variationskoeffizienten von  $\text{COV} = 35\%$  geschuldet. Zum Vergleich sind hier wieder die Ergebnisse der Arbeiten von Kumpenza [34] ( $E_R = 970 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 16,7\%$ ), Niemz und Caduff [32] ( $E_R = 1099 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 12\%$ .) und Keunecke [33] ( $E_R = 625 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 20,4\%$ .) angeführt.

Der Mittelwert der Querdehnzahl beträgt  $\nu_{RL} = 0,12$  mit einer Streuung von  $COV = 59\%$ . Im Vergleich mit dem Mittelwert der Literatur  $\nu_{RL, Lit} = 0,048$ , liegt der gemessene Wert um 59 % darüber. Betrachtet man die Querdehnzahl aus der Arbeit von Kumpenza [34]  $\nu_{RL, Laser} = 0,12$  (aus der Video- und Laser-Extensometer-Messung) und  $\nu_{RL, ESPI} = 0,11$  (aus der ESPI-Messung) besteht keiner, bzw. nur ein geringer Unterschied zu den Ergebnissen aus dieser Arbeit. Hier stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse der Untersuchungen mit moderner Messtechnik (ESPI und Video- bzw. Laser-Extensometer) eher das wahre Materialverhalten widerspiegeln als die Messungen mit mechanischen bzw. elektromechanischen Messinstrumenten. Wenn man sich die Querdehnzahl mit Gleichung (2.11) berechnet ( $\nu_{RL, calc} = 0,043$ ), erhält man nahezu den gleichen Wert wie in der Literatur, da die meisten Literaturergebnisse für diese Orientierung gerechnet und nicht gemessen wurden. Der gesamte Literaturvergleich ist in Tabelle 2-5 dargestellt.

**Tabelle 4-5:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche RL; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2\text{ mm}$ ; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4\text{ mm}$ ; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6\text{ mm}$ ; unten rechts: alle Jahrringgruppen

RL_2_xx				RL_4_xx			
	Rohdichte	$E_{R,RL}$	$\nu_{RL}$		Rohdichte	$E_{R,RL}$	$\nu_{RL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7	Anzahl	8	8	8
Min	400	598	0,021	Min	364	580	0,049
Median	439	988	0,107	Median	422	674	0,138
Max	542	1595	0,275	Max	433	909	0,211
<b>Mittelwert</b>	<b>447</b>	<b>994</b>	<b>0,138</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>409</b>	<b>706</b>	<b>0,127</b>
Standartabw.	46	346	0,095	Standartabw.	27	124	0,057
COV	10%	35%	69%	COV	7%	18%	45%

RL_6_xx				RL_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{R,RL}$	$\nu_{RL}$		Rohdichte	$E_{R,RL}$	$\nu_{RL}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7	Anzahl	24	24	22
Min	349	510	0,034	Min	349	510	0,021
Median	399	796	0,081	Median	410	746	0,100
Max	411	999	0,206	Max	542	1595	0,275
<b>Mittelwert</b>	<b>391</b>	<b>769</b>	<b>0,098</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>409</b>	<b>886</b>	<b>0,117</b>
Standartabw.	20	166	0,053	Standartabw.	39	254	0,069
COV	5%	22%	54%	COV	10%	29%	59%

Abbildung 4-12 zeigt die Zusammenhänge der einzelnen Kennwerte. Die Rohdichte und der E-Modul korrelieren hier nur schwach mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,4 (vgl. Abbildung 4-12, oben links). Auch zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte ist kaum eine Korrelation festzustellen (siehe Abbildung 4-12, oben rechts). Der Korrelationskoeffizient beträgt hier 0,15. Einzig der positive Zusammenhang zwischen der Querdehnzahl und dem E-Modul (vgl. Abbildung 4-12, unten links) lässt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,54 eindeutig erkennen.

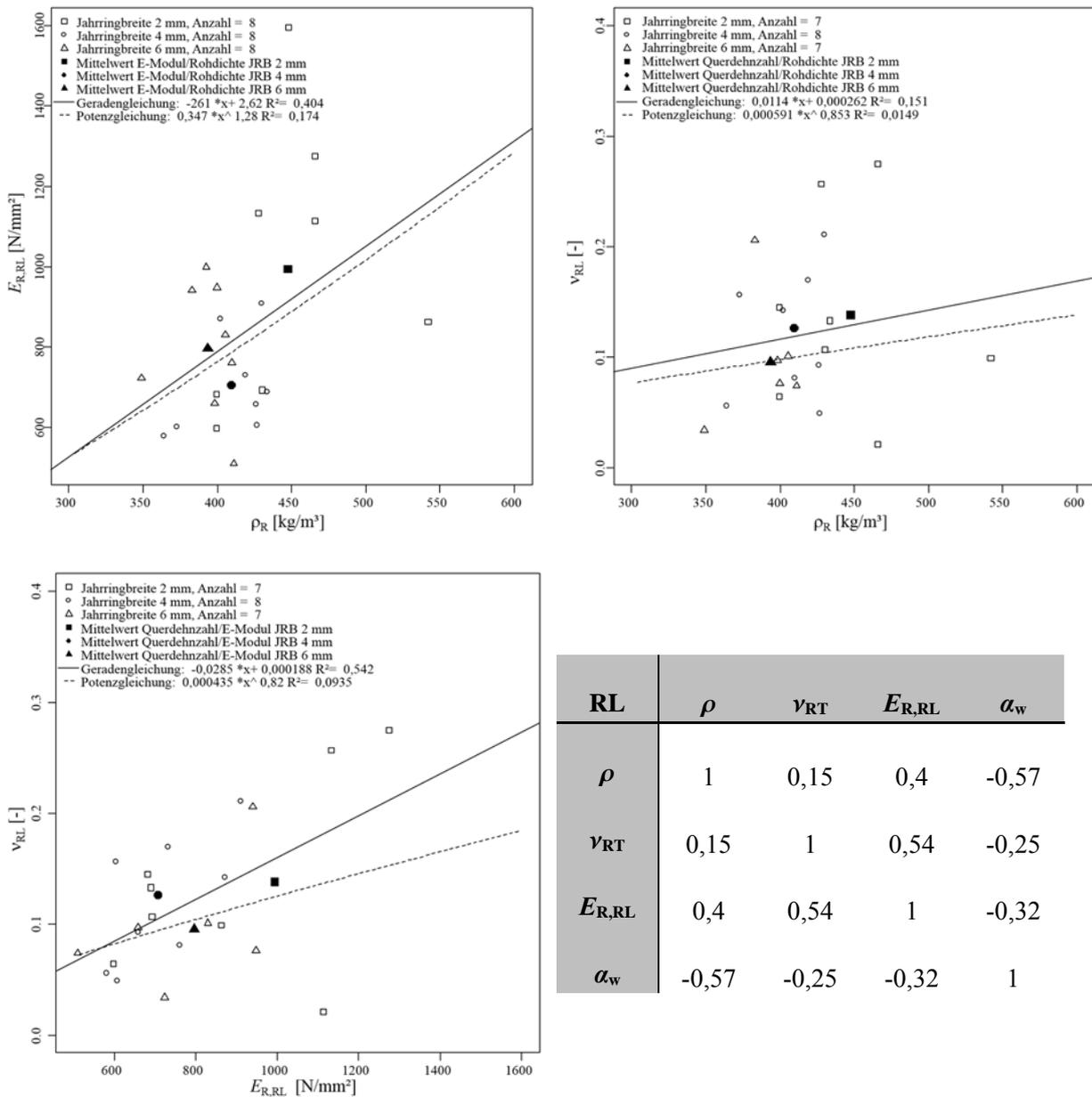
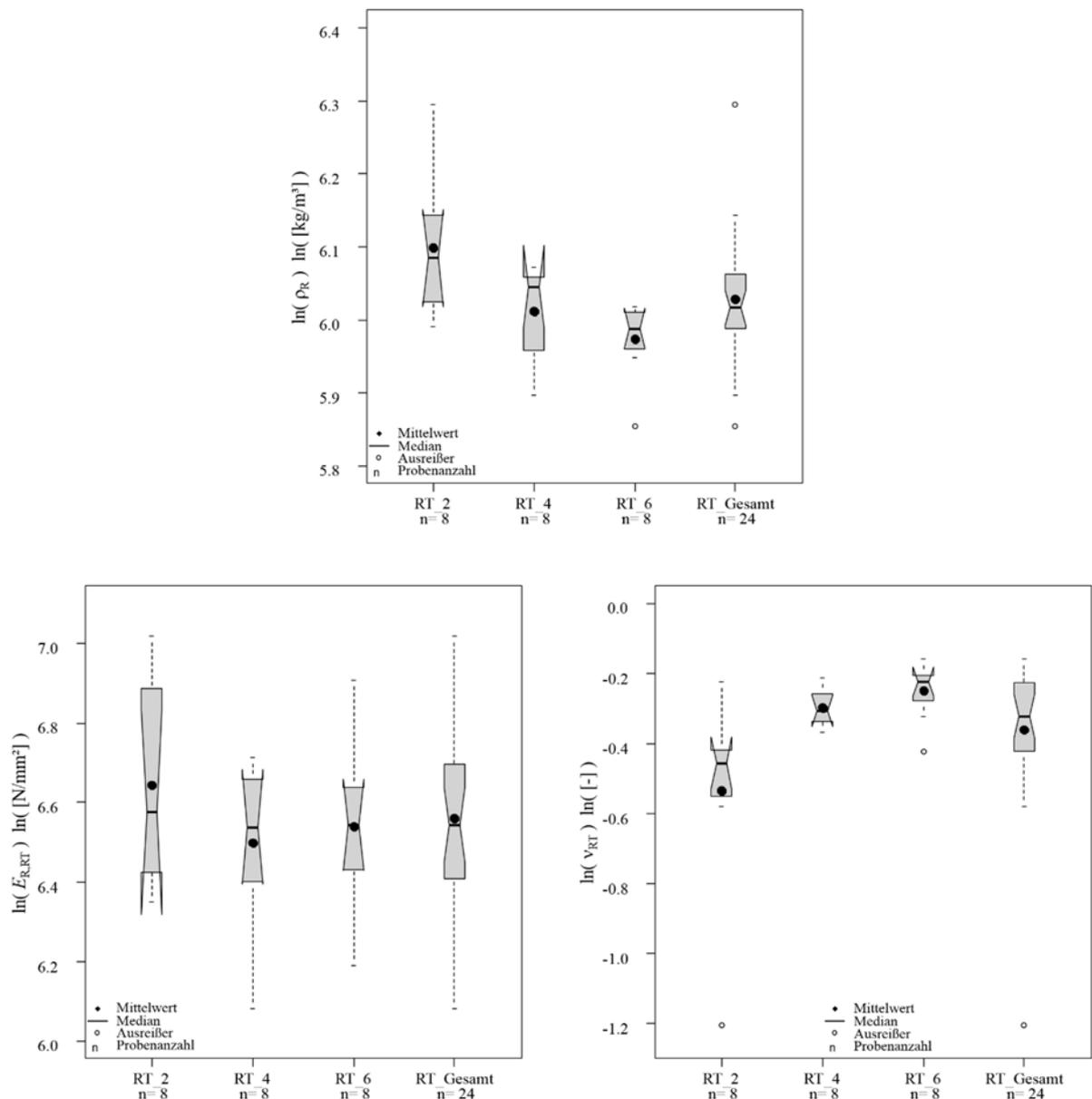


Abbildung 4-12: Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche RL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

### 4-1.6 ZUGVERSUCHE DER PRÜFSERIE RT

Die Prüfungen der Serie RT haben keine besonderen Vorkommnisse gezeigt. Die Boxplots mit den logarithmierten Daten dieser Prüferserie sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Wie in Abbildung 4-13 (unten links) zu sehen ist, gibt es beim E-Modul keine Ausreißer, es kann somit der volle Serienumfang in die Auswertung aufgenommen werden. Bei der Querdehnzahl (vgl. Abbildung 4-13, unten rechts) sind die Prüfkörper RT\_2\_10 und RT\_6\_05 als Ausreißer identifiziert und ausgeschieden worden.



**Abbildung 4-13:** Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl

Tabelle 4-6 zeigt eine Übersicht der statistischen Kennwerte der Prüferie RT. Die Rohdichte dieser Prüferie beträgt im Mittel  $409 \text{ kg/m}^3$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 10 \%$ . Der Mittelwert des E-Moduls beträgt  $E_R = 727 \text{ N/mm}^2$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 23 \%$ . Im Vergleich mit den Arbeiten von Kumpenza [34] ( $E_R = 970 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 16,7 \%$ ), Niemz und Caduff [32] ( $E_R = 1099 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 12 \%$ ) und Keunecke ( $E_R = 625 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 20,4 \%$ ), liegt der in dieser Arbeit gemessene Wert ein wenig unter dem Durchschnitt. Ein Vergleich des gesamten E-Moduls in Radialrichtung ist in Tabelle 2-5 zu finden.

Die Querdehnzahl  $v_{RT} = 0,74$  mit einer Streuung von  $\text{COV} = 11 \%$  ist sehr homogen über die einzelnen Jahrringgruppen. Im Vergleich mit Kumpenza [34] ( $v_{RT} = 0,681$ ,  $\text{COV} = 12,2 \%$ ), Niemz und Caduff ( $v_{RT} = 0,64$ ,  $\text{COV} = 17 \%$ ) und Keunecke ( $v_{RT} = 0,48$ ,  $\text{COV} = 19,2 \%$ ) liegt der hier ermittelte Wert über dem Durchschnitt. In der Gegenüberstellung mit dem Mittelwert der Literaturergebnisse ( $v_{RT, \text{Lit}} = 0,542$ ) liegt der Wert der Querdehnzahl aus dieser Arbeit um  $27 \%$  darüber. Im direkten Vergleich mit den Video-

und Laser- Extensometer-Messungen von Kumpenza [34] ( $\nu_{RT, Kumpenza} = 0,681$ ), liegt die Querdehnzahl aus dieser Arbeit nur 13 % darüber. Dies bestätigt den höheren Wert der Querdehnzahl  $\nu_{RT}$  aus dieser Arbeit. Eine vollständige Gegenüberstellung mit den Literaturwerten ist in Tabelle 2-5 zu sehen.

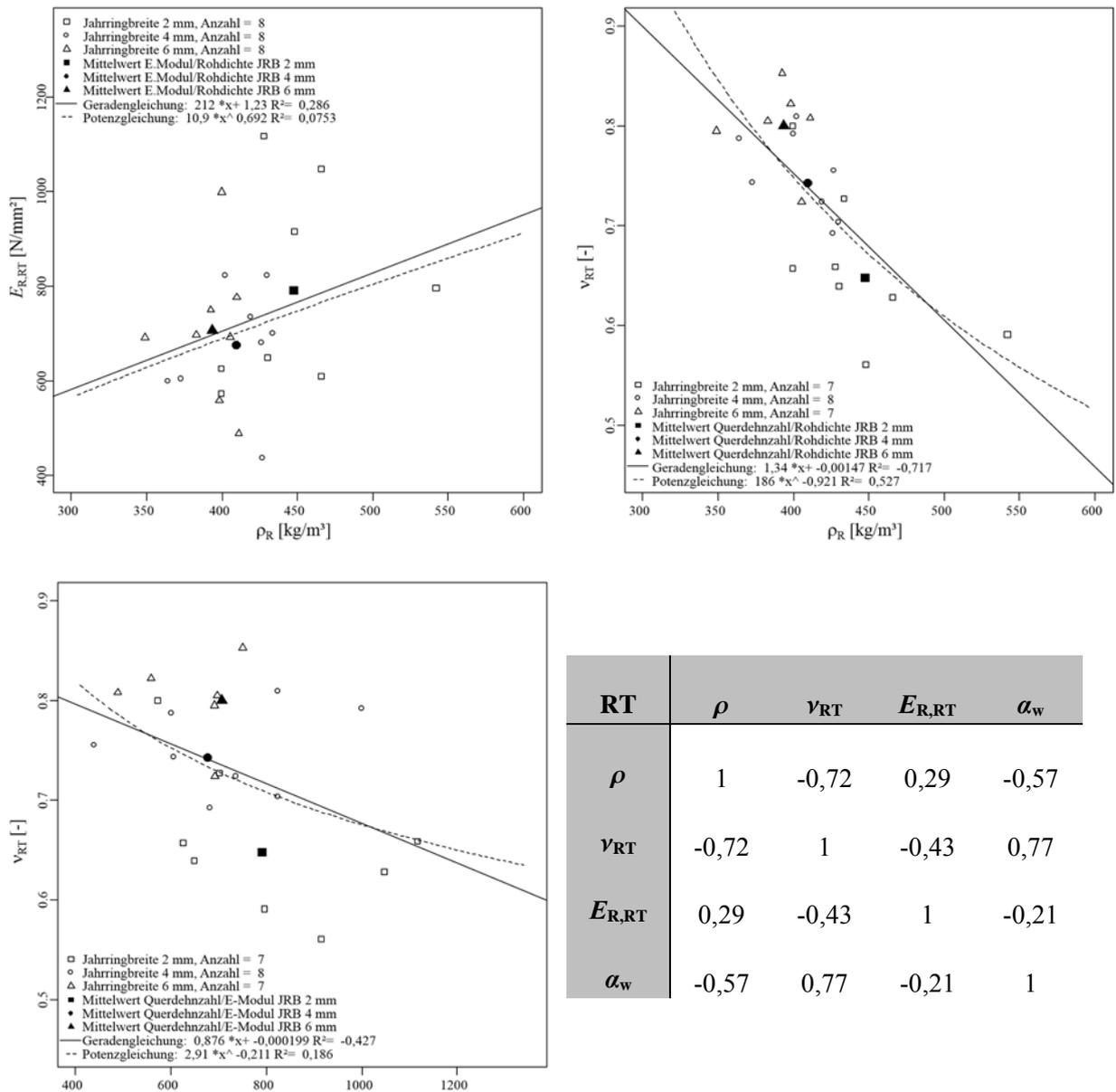
**Tabelle 4-6:** Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche RT; oben links: Jahrringgruppe  $a_w = 2 \text{ mm}$ ; oben rechts: Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$ ; unten links: Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$ ; unten rechts: alle Jahrringgruppen

RT_2_xx				RT_4_xx			
	Rohdichte	$E_{R,RT}$	$\nu_{RT}$		Rohdichte	$E_{R,RT}$	$\nu_{RT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7	Anzahl	8	8	8
Min	400	572	0,561	Min	364	438	0,693
Median	439	722	0,639	Median	422	691	0,736
Max	542	1117	0,800	Max	433	824	0,810
<b>Mittelwert</b>	<b>447</b>	<b>791</b>	<b>0,648</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>409</b>	<b>676</b>	<b>0,743</b>
Standartabw.	46	213	0,076	Standartabw.	27	129	0,040
COV	10%	27%	12%	COV	7%	19%	5%

RT_6_xx				RT_Gesamt			
	Rohdichte	$E_{R,RT}$	$\nu_{RT}$		Rohdichte	$E_{R,RT}$	$\nu_{RT}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
Anzahl	8	8	7	Anzahl	24	24	22
Min	349	488	0,724	Min	349	438	0,561
Median	399	695	0,805	Median	410	695	0,736
Max	411	999	0,853	Max	542	1117	0,853
<b>Mittelwert</b>	<b>391</b>	<b>688</b>	<b>0,791</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>409</b>	<b>727</b>	<b>0,740</b>
Standartabw.	20	152	0,039	Standartabw.	39	168	0,081
COV	5%	22%	5%	COV	10%	23%	11%

Der E-Modul und die Rohdichte korrelieren nur schwach in dieser Prüfserie mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,29 (vgl. Abbildung 4-14, oben links). Dafür besteht ein starker, jedoch negativer Zusammenhang zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte. Wie Abbildung 4-14 (oben rechts) zeigt, beträgt der Korrelationskoeffizient -0,72. Auch die Korrelation zwischen der Querdehnzahl und dem E-Modul ist mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,43 erkennbar (vgl. Abbildung 4-14, unten links).



**Abbildung 4-14:** Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche RT; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix

## 4-2 VERHALTEN DER E-MODUL

In diesem Abschnitt werden die Verhältnisse der E-Moduln je Belastungsrichtung ( $E_T$ ,  $E_L$  und  $E_R$  (vgl. Abschnitt 3-1)) untereinander verglichen und mit den Ergebnissen aus der Literatur gegenübergestellt. Weiter wird der Zusammenhang des jeweiligen E-Moduls mit der Rohdichte untersucht.

Das Verhältnis der E-Moduln  $E_T : E_R : E_L$  wurde zu  $1 : 1,57 : 27,6$  ermittelt. Zum Vergleich mit der Literatur geben z.B. Neuhaus [3] ein Verhältnis von  $1 : 1,9 : 28,5$  oder Niemz und Caduff [32] eines von  $1 : 2,43 : 25,4$  an, welche in einer ähnlichen Größenordnung resultieren. Tabelle 4-7 zeigt eine Gegenüberstellung der Mittelwerte aus dieser Arbeit mit den Mittelwerten aus der Literatur. Wie zu erkennen ist, liegen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nahe an den Literaturwerten.

**Tabelle 4-7:** Gegenüberstellung der Literatur E-Moduln (Mittelwert aller Literaturwerte (vgl. Tabelle 2-5) mit den eigenen Messungen

	$E_T$	$E_L$	$E_R$
Mittelwert Literaturwerte	377 <sup>1)</sup>	12615 <sup>1)</sup>	881 <sup>1)</sup>
Eigene Messungen	484	13343	763

<sup>1)</sup> Mittelwerte der Versuche mit Fichtenholz aus der Literatur

In den weiteren Abschnitten 4-2.1 bis 4-2.3 werden die einzelnen E-Moduln nach Belastungsrichtung (T, L, R) dargestellt und diskutiert.

### 4-2.1 E-MODUL $E_T$ IN TANGENTIALER HAUPTRICHTUNG

Der E-Modul in tangentialer Richtung weist einen Mittelwert von  $E_T = 484 \text{ N/mm}^2$  auf und bewegt sich zwischen  $E_{T, \min} = 304 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{T, \max} = 1152 \text{ N/mm}^2$ . Zum Vergleich beträgt der Literaturmittelwert  $E_{T, \text{Lit}} = 377 \text{ N/mm}^2$ . Die Rohdichte liegt zwischen  $\rho_{T, \min} = 355 \text{ kg/m}^3$  und  $\rho_{T, \max} = 550 \text{ kg/m}^3$  und weist einen Mittelwert von  $\rho_T = 417 \text{ kg/m}^3$ .

Das Verhältnis  $E_L/E_T$  liegt bei 27,6. Zum Vergleich geben z.B. Neuhaus [3] ein Verhältnis von  $E_L/E_T$  von 28,5 und Niemz und Caduff [32] ein Verhältnis von  $E_L/E_T$  25,4 an. Somit kommt der E-Modul Wert dieser Arbeit zwischen den Literaturwerten zu liegen.

In Abbildung 4-15 ist der Zusammenhang zwischen dem E-Modul in tangentialer Richtung  $E_T$  und der Rohdichte dargestellt. Hier lässt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,68 beobachten. Dies ist zugleich der am stärksten ausgeprägte Zusammenhang zwischen E-Modul und Rohdichte von den drei Hauptrichtungen in dieser Arbeit. Auch bei der Betrachtung der Mittelwerte je Jahrringgruppe (vgl. Abbildung 4-16) ist ein starker Korrelationskoeffizient von 0,98 zu beobachten. In Verbindung mit dem Streudiagramm (siehe Abbildung 4-16) erkennt man aber, dass hier der Mittelwert der Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$  von der Trendlinie abweicht und nahe dem, der Jahrringgruppe  $a_w = 6 \text{ mm}$  zu liegen kommt. Dieses Ereignis wurde auch schon in Abschnitt 4-1.1 diskutiert.

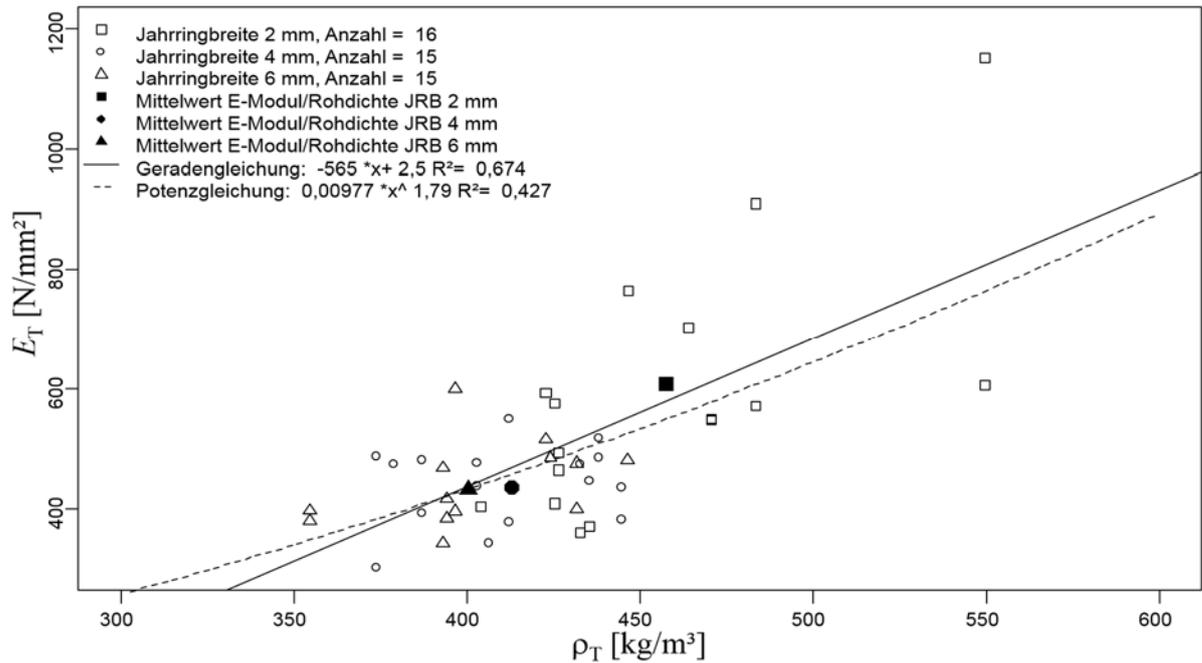


Abbildung 4-15: Streudiagramm E-Modul  $E_T$  / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen

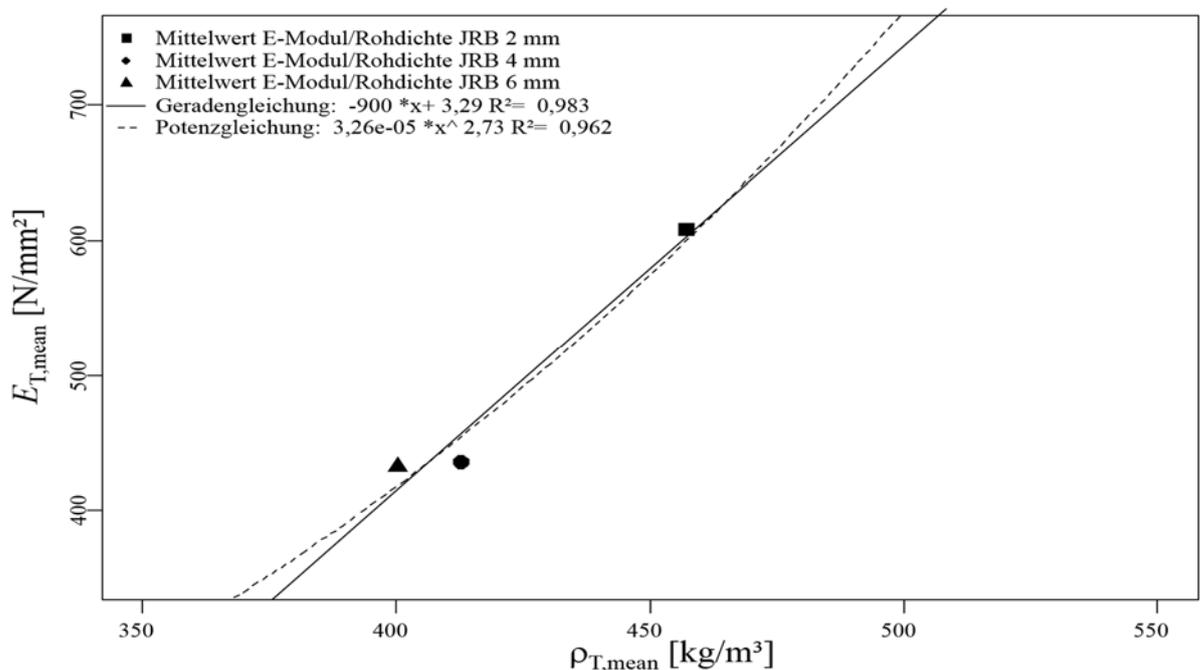


Abbildung 4-16: Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul  $E_{T,mean}$  / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen

## 4-2.2 E-MODUL $E_L$ IN LONGITUDINALER HAUPTRICHTUNG

Der E-Modul in longitudinaler Richtung  $E_L$  in dieser Arbeit bewegt sich zwischen  $E_{L, min} = 8492 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{L, max} = 24521 \text{ N/mm}^2$ . Im Mittel beträgt  $E_L = 13343 \text{ N/mm}^2$  und stimmt sehr gut mit dem Mittelwert aus der Literatur  $E_{L, Lit} = 12615 \text{ N/mm}^2$  überein.

Die Rohdichte der Prüfkörper in longitudinaler Hauptrichtung weist ein Minimum von  $\rho_{L, min} = 353 \text{ kg/m}^3$  und ein Maximum von  $\rho_{L, max} = 558 \text{ kg/m}^3$  auf. Die mittlere Rohdichte dieser Prüfkörper beträgt  $\rho_L = 414 \text{ kg/m}^3$ .

Abbildung 4-17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem E-Modul in longitudinaler Hauptrichtung und der Rohdichte. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,4, somit besteht nur eine schwache Korrelation zwischen diesen Kennwerten. Zum Vergleich findet man in der Diplomarbeit von Spitzer [59] eine Korrelation zwischen den Zug-E-Modul und der Rohdichte von 0,34. Dieser Korrelationskoeffizient ist nur geringfügig kleiner, als der in dieser Arbeit. Dabei ist aber zu bedenken, dass die Versuche aus [59] in Bauteilgröße durchgeführt wurden. Betrachtet man sich aber die Mittelwerte der jeweiligen Jahrringgruppen isoliert (vgl. Abbildung 4-18) so erhält man einen Zusammenhang zwischen E-Modul und Rohdichte mit einem Korrelationskoeffizienten von nahe 1.

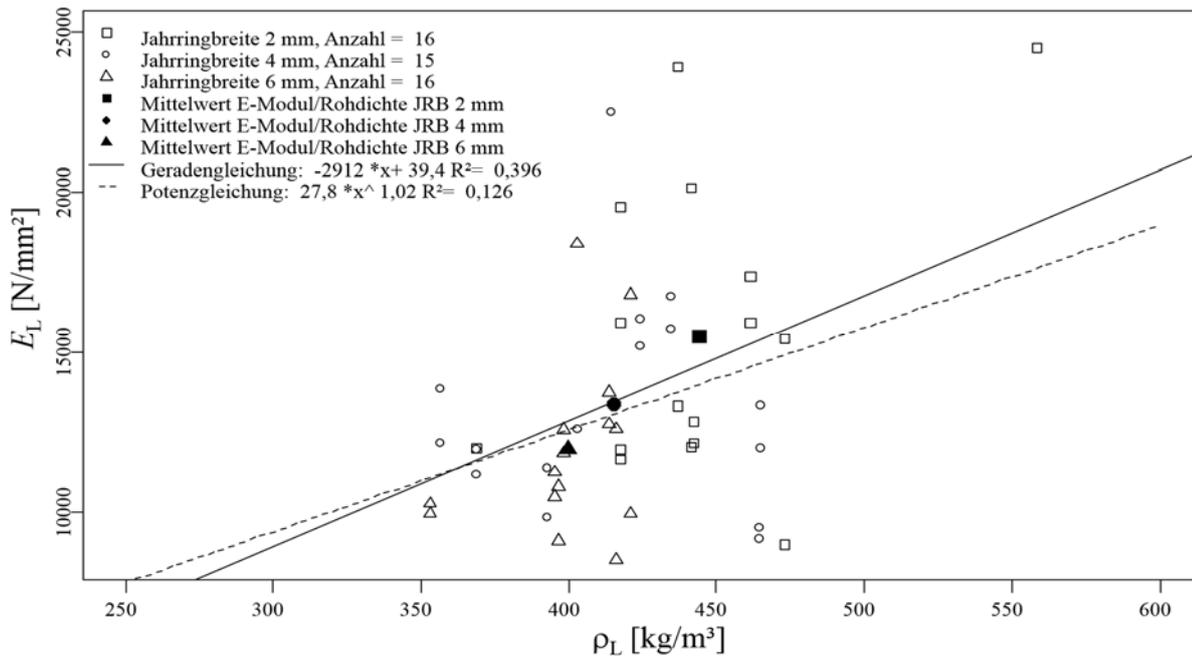


Abbildung 4-17: Streudiagramm E-Modul  $E_L$  / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen

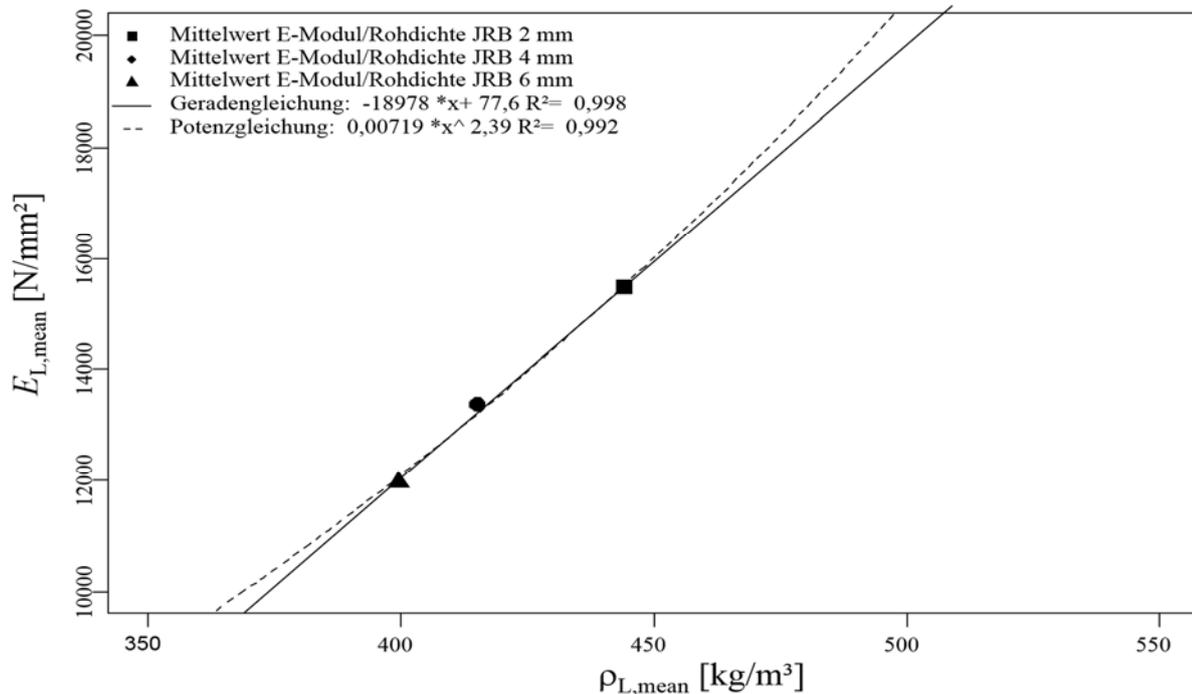


Abbildung 4-18: Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul  $E_{L,mean}$  / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen

### 4-2.3 E-MODUL $E_R$ IN RADIALER HAUPTRICHTUNG

Der Mittelwert des E-Moduls in radialer Richtung beträgt  $E_R = 763 \text{ N/mm}^2$  und liegt somit tiefer als der Mittelwert aus der Literatur mit  $E_{R, \text{Lit}} = 881 \text{ N/mm}^2$ . Bei den Messungen dieser Arbeit sind E-Modulwerte für die Radialrichtung zwischen  $E_{R, \text{min}} = 438 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{R, \text{max}} = 1595 \text{ N/mm}^2$  gemessen worden. Die Rohdichte liegt zwischen  $\rho_{R, \text{min}} = 349 \text{ kg/m}^3$  und  $\rho_{R, \text{max}} = 542 \text{ kg/m}^3$  und weist einen Mittelwert von  $\rho_R = 409 \text{ kg/m}^3$ .

Das Verhältnis  $E_L/E_R$  beträgt 17,5. Zum Vergleich geben z.B. Neuhaus [3] ein Verhältnis von  $E_L/E_R$  von 14,7 und Niemz und Caduff [32] ein Verhältnis von  $E_L/E_R$  10,4 an. Das  $E_L/E_R$  Verhältnis dieser Arbeit liegt deutlich über den Literaturwerten. Dies lässt auf eine stärker ausgeprägte Anisotropie dieser Prüfkörper schließen.

In radialer Richtung lässt sich zwischen dem E-Modul und der Rohdichte nur eine sehr schwache Korrelation erkennen. In Abbildung 4-19 ist das Streudiagramm zwischen E-Modul und Rohdichte dargestellt. der Korrelationskoeffizient beträgt 0,34. Auch die isolierte Betrachtung der Mittelwerte der einzelnen Jahrringgruppen (siehe Abbildung 4-20) lässt hier keinen eindeutigen Zusammenhang erkennen. Der Korrelationskoeffizient beträgt zwar 0,84, aber ein Blick auf das Streudiagramm der Mittelwerte (vgl. Abbildung 4-20) zeigt eine starke Abweichung der Jahrringgruppe  $a_w = 4 \text{ mm}$ , welche keine deutliche Aussage zulässt. Wie schon in Abschnitt 4-1.1 und in Abschnitt 4-2.1 erwähnt, liegen die Mittelwerte der Jahrguppe  $a_w = 4 \text{ mm}$  und  $a_w = 6 \text{ mm}$  nahe aneinander.

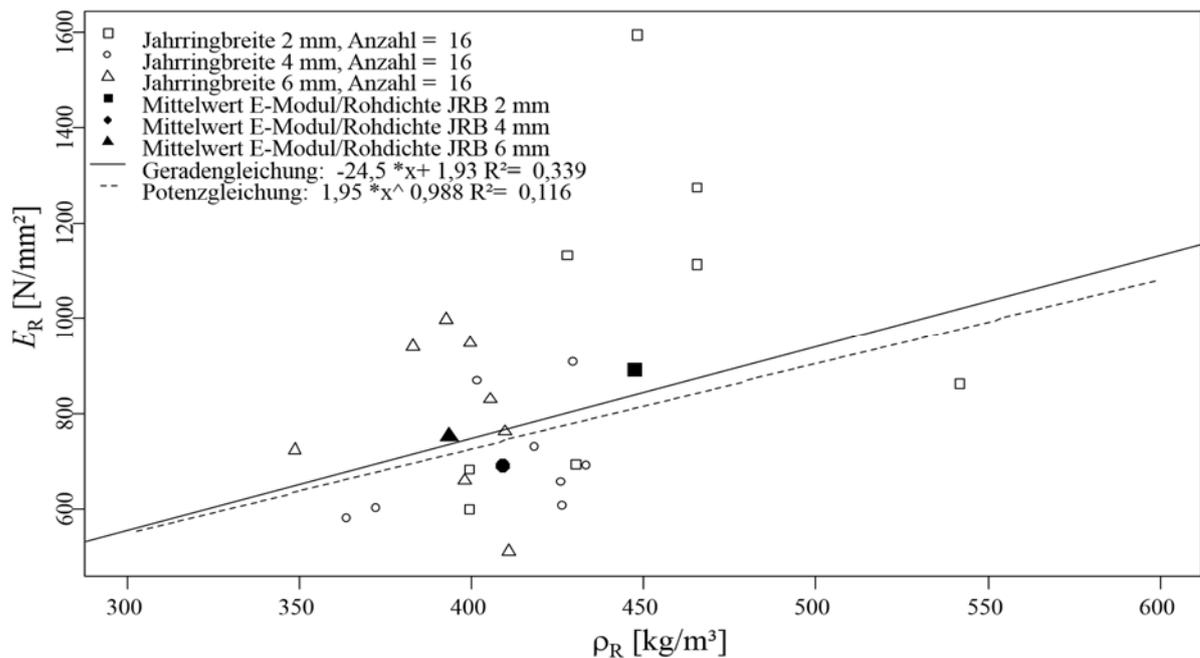


Abbildung 4-19: Streudiagramm E-Modul  $E_R$  / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen

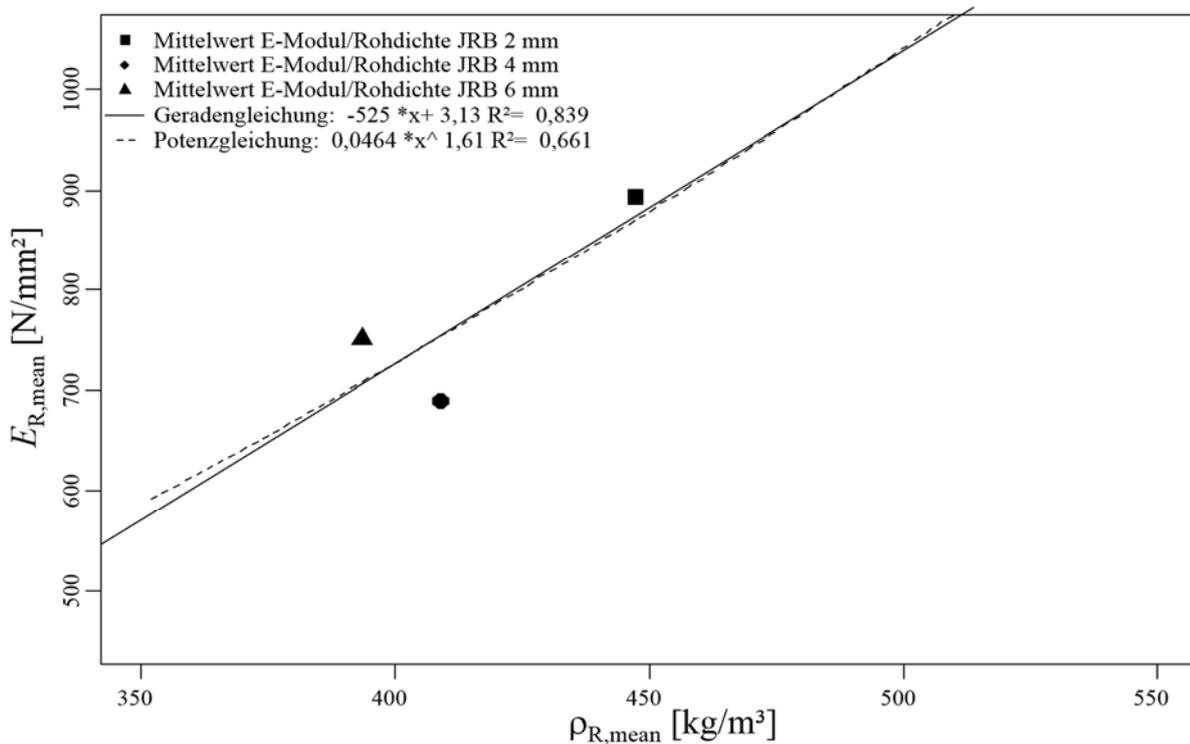


Abbildung 4-20: Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul  $E_{R,mean}$  / Rohdichte unterteilt in Jahrringgruppen

### 4-3 ZUSAMMENFASSUNG DER ELASTIZITÄTSZAHLEN

Da es unter anderem auch ein Ziel dieser Arbeit ist, Materialkennwerte für die Berechnung in Finite-Elementen-Programmen bereitzustellen, werden im Folgenden die Materialmatrix aus Abschnitt 2-2 mit den, in dieser Arbeit gemessenen Werten, dargestellt.

Fasst man die Ergebnisse aus Abschnitt 4-1 zusammen und bringt sie in Form der Nachgiebigkeitsmatrix aus Gleichung (2.8) erhält man:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} \\ -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00206 & 0,000034 & 0,00097 \\ 0,00027 & 0,000075 & 0,00015 \\ 0,00085 & 0,000042 & 0,00131 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Die hier dargestellte Matrix entspricht nicht der Anforderung an die Symmetrie. Dies liegt zum einen an den in Abschnitten 4-1.2 und 4-1.5 besprochenen Problemen bei der Messung der Längsdehnung während einer Belastung quer zur Faser und an der inhomogenen Messoberfläche aufgrund ungleichmäßiger Schichtung von Früh- und Spätholz. Zum anderen sind Asymmetrien auch auf Mikrorisse im Holzgewebe zurückzuführen. Da für die Rissbildung Energie aufgewendet wird, steht nicht mehr die vollständige Energie für die Rückverformung zur Verfügung. Dies bedeutet, dass sich das Material nicht vollkommen elastisch verhält.

Verwendet man die Zusammenhänge aus Abschnitt 2-2.3.1 so erhält man mit den errechneten Werten die Nachgiebigkeitsmatrix zu:

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00206 & 0,000034 & 0,00097 \\ 0,00028 & 0,000075 & 0,00005 \\ 0,00085 & 0,000042 & 0,00131 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Die rot markierten Einträge,  $-s_{21}$  und  $-s_{23}$ , sind hier mit  $\nu_{TL, calc} = 0,014$  und  $\nu_{RL, calc} = 0,040$  berechnet worden. Dadurch ergibt sich zwar die Symmetrie in der Matrix, doch bleibt es fraglich, wie realitätsnah diese Methode ist, da sich im Vergleich von Gleichung (4.1) und Gleichung (4.2) ein erheblicher Unterschied bemerkbar macht.

Nachfolgend wird entsprechend der Gleichung (4.1), welche die Werte für den kompletten Datensatz enthält, die Nachgiebigkeitsmatrix gesondert nach Jahrringgruppe  $a_w = 2$  mm,  $a_w = 4$  mm und  $a_w = 6$  mm dargestellt.

Gleichung (4.3) zeigt die Nachgiebigkeitsmatrix mit den Daten der Jahrringgruppe  $a_w = 2$  mm. Die mittleren Rohdichtewerte dieser Gruppe sind  $\rho_T = 454$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_L = 456$  kg/m<sup>3</sup> und  $\rho_R = 447$  kg/m<sup>3</sup>.

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00165 & 0,0000329 & 0,000726 \\ 0,000300 & 0,0000637 & 0,000155 \\ 0,000753 & 0,0000357 & 0,001120 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Gleichung(4.3) zeigt die Nachgiebigkeitsmatrix mit den Daten der Jahrringgruppe  $a_w = 4$  mm, mit den Rohdichtemittelwerten  $\rho_T = 413$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_L = 415$  kg/m<sup>3</sup> und  $\rho_R = 409$  kg/m<sup>3</sup>.

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00227 & 0,0000395 & 0,00108 \\ 0,000197 & 0,0000750 & 0,00018 \\ 0,000955 & 0,0000458 & 0,00145 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Gleichung(4.3) zeigt die Nachgiebigkeitsmatrix mit den Daten der Jahrringgruppe  $a_w = 6$  mm. Die mittleren Rohdichtewerte dieser Gruppe sind  $\rho_T = 400$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_L = 399$  kg/m<sup>3</sup> und  $\rho_R = 391$  kg/m<sup>3</sup>.

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,002328 & 0,0000287 & 0,001087 \\ 0,000237 & 0,0000848 & 0,000135 \\ 0,000921 & 0,0000441 & 0,001373 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Betrachtet man Abbildung 4-21 bis Abbildung 4-24 lassen sich für die Elastizitätszahlen, des gesamten Datensatzes nur mittlere ( $|0,62|$ ) bis nahezu keine ( $|0,0125|$ ) Korrelationen mit der Rohdichte erkennen. Um den Materialparameter der Rohdichte in eine FEM-Berechnung mit einzubeziehen, kann man dies anhand der in Abbildung 4-21 bis Abbildung 4-24 dargestellten Geradengleichung, bewerkstelligen. Eine Nachgiebigkeitsmatrix mit Abhängigkeit von der Rohdichte hat die Gestalt von:

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & -s_{13} \\ -s_{21} & s_{22} & -s_{23} \\ -s_{31} & -s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho 0,00532 - 7,46 \cdot 10^{-6} & -\rho 3,13 \cdot 10^{-5} - 1,54 \cdot 10^{-8} & -\rho 0,00263 + 3,75 \cdot 10^{-6} \\ -\rho 0,000215 - 3,72 \cdot 10^{-8} & \rho 0,000143 - 1,55 \cdot 10^{-7} & -\rho 0,000122 - 5,37 \cdot 10^{-8} \\ -\rho 0,00131 + 7,33 \cdot 10^{-7} & -\rho 7,99 \cdot 10^{-5} + 9,95 \cdot 10^{-8} & \rho 0,00251 - 2,73 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Diese Matrix ist ein Grundelement für weitere Arbeiten, in denen die modellierten Ergebnisse durch Versuche kontrolliert werden sollten.

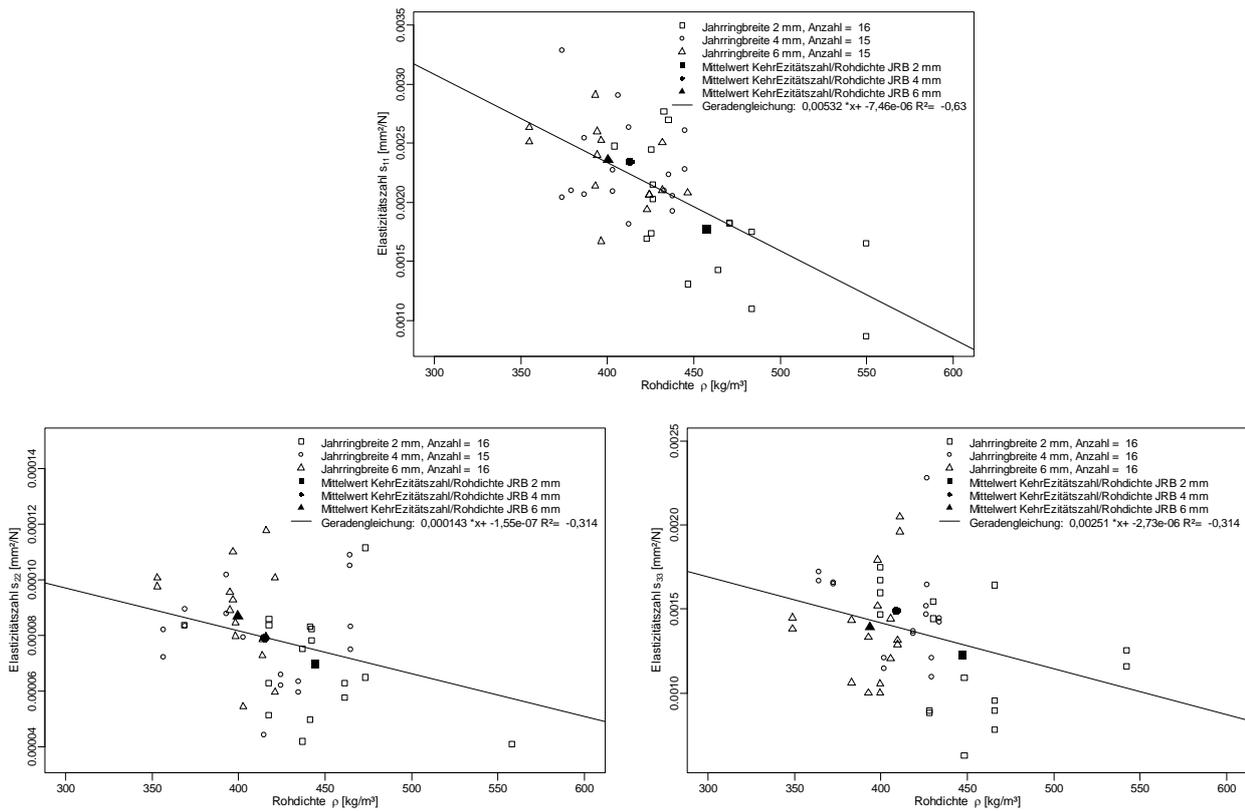


Abbildung 4-21: Streudiagramme Elastizitätszahlen; oben: Elastizitätszahl  $s_{11}$  / Rohdichte; unten links: Elastizitätszahl  $s_{22}$  / Rohdichte; unten rechts: Elastizitätszahl  $s_{33}$  / Rohdichte

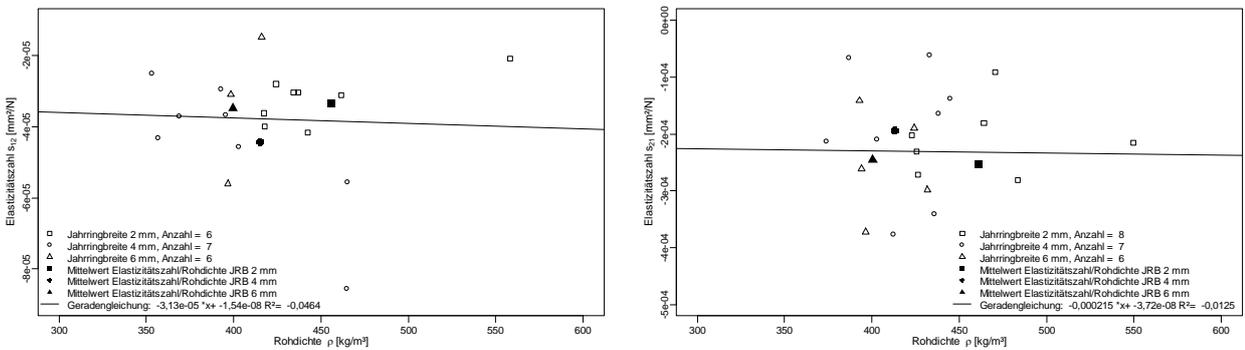


Abbildung 4-22: Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl  $s_{12}$  / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl  $s_{21}$  / Rohdichte

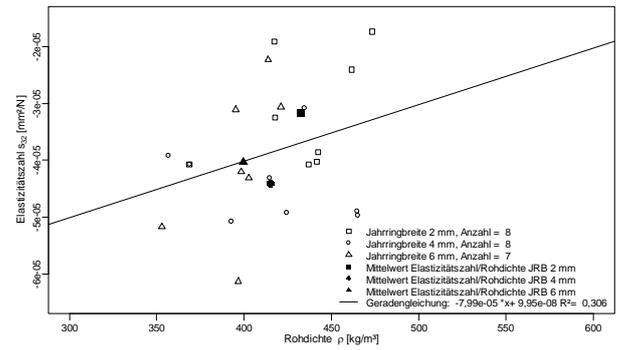
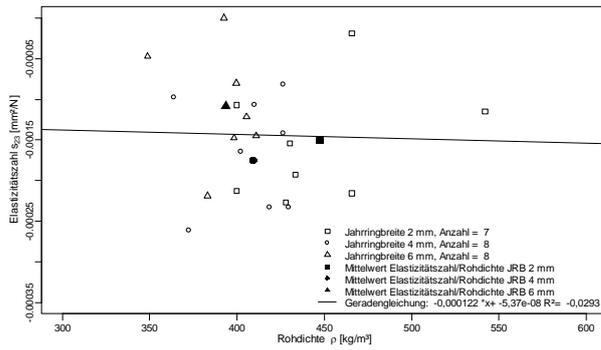


Abbildung 4-23: Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl  $s_{23}$  / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl  $s_{32}$  / Rohdichte

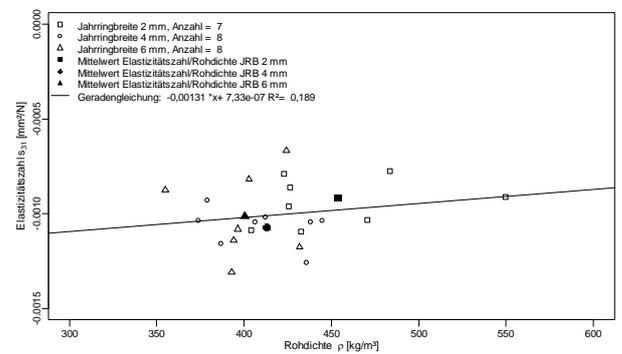
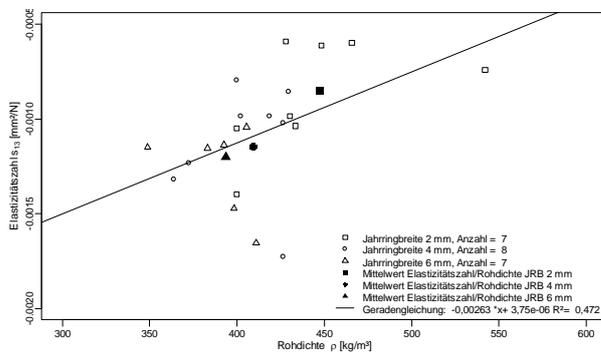


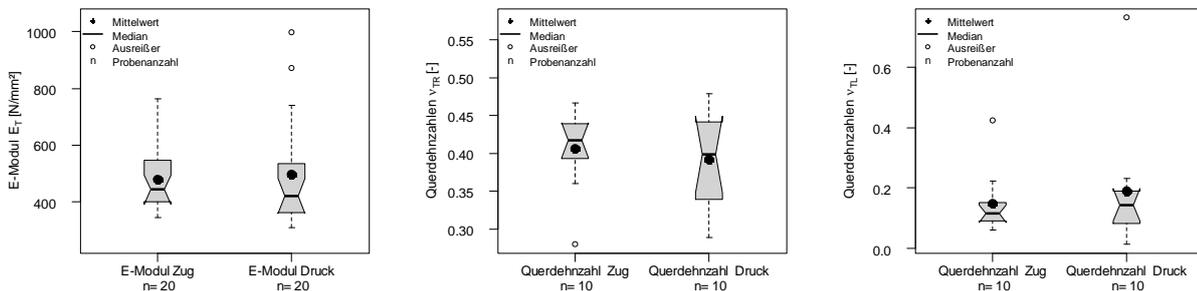
Abbildung 4-24: Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl  $s_{13}$  / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl  $s_{31}$  / Rohdichte

## 4-4 ZUG- / DRUCKVERGLEICH

Ein weiterer Teil der Aufgabenstellung dieser Arbeit war der Vergleich des E-Moduls und der Querdehnzahl eines Prüfkörpers bei Zug- und Druckbelastung. Dazu wurden ausgewählte Prüfkörper, deren Kennwerte in Abschnitt 4-1 diskutiert wurden, einem zusätzlichen Druckversuch unterworfen. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt. An den folgenden Einzelergebnissen sind, je nach Orientierung stärker oder schwächer ausgeprägt, größere Unterschiede zwischen Druck- und Zugversuch festzustellen. Diese Abweichungen sind größtenteils auf die anatomischen Abnormitäten wie inhomogene Schichtung von Früh- und Spätholz, sowie der große Steifigkeitsunterschied in den Versuchsserien TL und RL zurückzuführen.

### 4-4.1 BELASTUNG IN TANGENTIALER HAUPTRICHTUNG

In Abbildung 4-25 sind die Boxplots der Prüfungen in tangentialer Richtung dargestellt. In Abbildung 4-25 (links) sind der E-Modul  $E_T$  aus dem Zug und Druckversuch gegenübergestellt. Beim E-Modul  $E_T$  handelt es sich um den gesamten E-Modul aus den Prüferien TL und TR. Abbildung 4-25 (Mitte) zeigt den Vergleich der Querdehnzahlen  $\nu_{TR}$  zwischen Zug- und Druckversuch. Die Querdehnzahlen  $\nu_{TL}$  sind in Abbildung 4-25 (rechts) zu sehen. Wie die überlappenden Notches in den Boxplots zeigen, sind keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der jeweiligen Mediane festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass es im elastischen Bereich keinen Unterschied zwischen Zug- und Druckbelastung gibt. Tabelle 4-8 zeigt die statistischen Kennwerte der Prüferien TL und TR.



**Abbildung 4-25:** Boxplot-Gegenüberstellung von Zug- und Druckversuch; links: E-Modul  $E_T$ ; Mitte: Querdehnzahl  $\nu_{TR}$ ; rechts: Querdehnzahl  $\nu_{TL}$

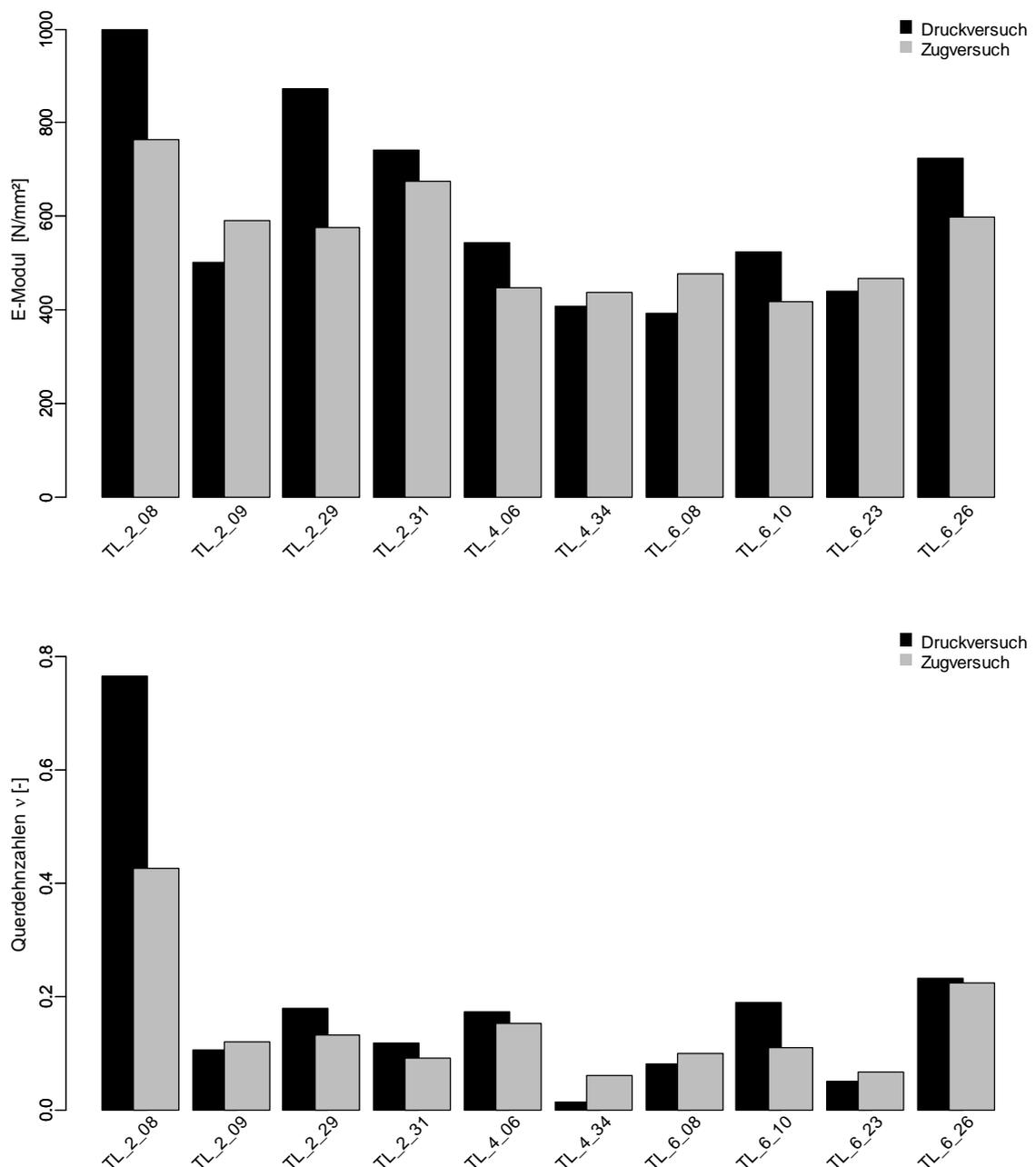
**Tabelle 4-8:** Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüferien TL und TR

	Prüfserie TL				Prüfserie TR			
	$E_{T, TL}$ Druck	$E_{T, TL}$ Zug	$\nu_{TL}$ Druck	$\nu_{TL}$ Zug	$E_{T, TR}$ Druck	$E_{T, TR}$ Zug	$\nu_{TR}$ Druck	$\nu_{TR}$ Zug
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	394	417	0,013	0,060	311	344	0,213	0,280
<b>Median</b>	<b>535</b>	<b>527</b>	<b>0,145</b>	<b>0,115</b>	<b>362</b>	<b>400</b>	<b>0,399</b>	<b>0,418</b>
Max	998	707	0,764	0,339	426	516	0,479	0,467
<b>Mittelwert</b>	<b>615</b>	<b>540</b>	<b>0,191</b>	<b>0,139</b>	<b>371</b>	<b>413</b>	<b>0,384</b>	<b>0,406</b>
Standartabw.	208	104	0,212	0,084	41	52	0,075	0,054
COV	34%	19%	112%	60%	11%	13%	20%	13%

### 4-4.1.1 Prüfserie TL

Bei der Prüfserie TL mussten, gleich wie bei den Zugprüfungen, einige Prüfungen aufgrund unbrauchbarer Ergebnisse wiederholt werden. Die ist auf die oftmals inhomogenen Messfläche (ungleiche Anteile von Früh- und Spätholz) zurückzuführen.

Abbildung 4-26 zeigt die Gegenüberstellung des Druck- und Zugversuches der dafür ausgewählten Prüfkörper der Prüfserie TL. In Abbildung 4-26 (oben) ist der Vergleich des E-Moduls dargestellt. Man erkennt, dass die Abweichungen bis auf wenige Prüfkörper nicht sehr groß sind. Der Mittelwert des E-Modul aus dem Druckversuch beträgt  $E_{T, TL, Druck} = 615 \text{ N/mm}^2$  mit einem Variationskoeffizienten von  $COV = 34 \%$ . Dem gegenüber resultiert ein E-Modul von  $E_{T, TL, Zug} = 540 \text{ N/mm}^2$  mit einer Streuung von  $COV = 19 \%$  aus dem Zugversuch.



**Abbildung 4-26:** Zug- / Druckvergleich der Prüfserie TL; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

Die Querdehnzahl ergibt  $\nu_{TL, Druck} = 0,191$  (COV = 112 %) aus dem Druckversuch und aus dem Zugversuch  $\nu_{TL, Zug} = 0,0,139$  (COV = 60 %). Die hohen Streuungen resultieren aus den in Abschnitt 4-1.2 besprochenen Problem der inhomogenen Schichtung von Früh- und Spätholz. Alle weiteren statistischen Kennwerte sind Tabelle 4-8 zu entnehmen.

#### 4-4.1.2 Prüfsérie TR

In Abbildung 4-27 und Tabelle 4-8 sind die Einzelergebnisse der Prüfsérie TR dargestellt. Auch bei dieser Prüfsérie lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen Zug- und Druckbelastung feststellen. Hier ergibt sich aus dem Zugversuch ein mittlerer E-Modul von  $E_{T, TR Zug} = 413 \text{ N/mm}^2$ , COV = 13 % und aus dem Druckversuch  $E_{T, TR, Druck} = 371 \text{ N/mm}^2$ , COV = 11 %.

Der Mittelwert der Querdehnzahl aus dem Druckversuch ergibt  $\nu_{TR, Druck} = 0,384$  (COV = 20 %) und aus dem Zugversuch  $\nu_{TR, Zug} = 0,406$  (COV = 13 %). Diese Werte liegen eng beisammen und auch die niedrigen Streuungsmaße deuten auf keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem Druck- und Zugversuch hin.

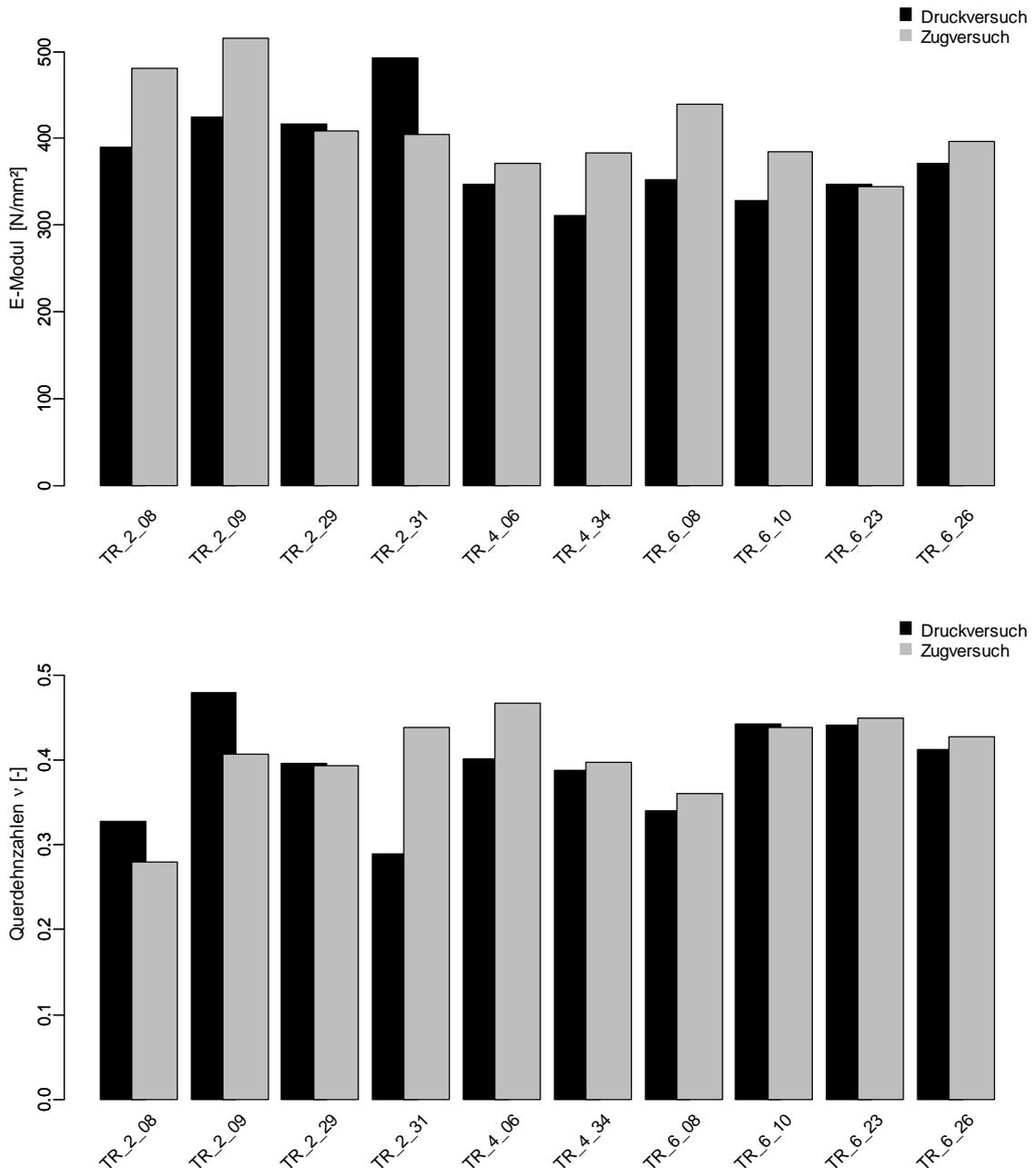


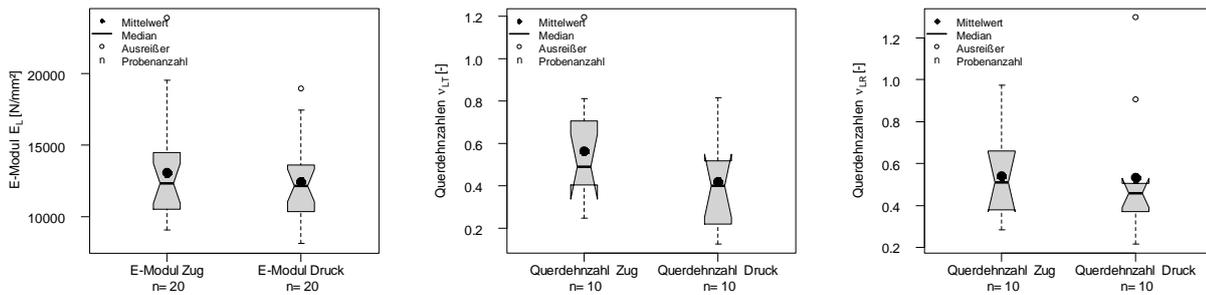
Abbildung 4-27: Zug- / Druckvergleich der Prüfserie TR; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

#### 4-4.2 BELASTUNG IN LONGITUDINALER HAUPTRICHTUNG

Die Druckprüfungen in Längsrichtung wurden mit geringeren Lastsprüngen ( $a$  100 N) durchgeführt, um ein mögliches Knicken der Probe zu verhindern. Nach [7] kann man bei Kleinproben von einer Druckfestigkeit von 40 N/mm<sup>2</sup> ausgehen. Somit ergibt sich für diese Versuche eine Maximalbelastung von 2,8 N/mm<sup>2</sup>, dies entspricht etwa 7 % der erwartenden Maximaldruckfestigkeit. Im Vergleich dazu betrug die Belastung der Zugproben (vgl. Abschnitt 3-3.3.3) 14 % der zu erwartenden Bruchlast. Dadurch konnten auch geringere Relaxationserscheinungen festgestellt werden.

In Abbildung 4-28 sind die Boxplots dieser Versuchsreihe dargestellt. Dabei ist in Abbildung 4-28 (links), der E-Modul beider Messungen (LT und LR) dargestellt. In Abbildung 4-28 (Mitte) ist die Querdehnzahl

der Prüferie LT in Abhängigkeit der Belastungsrichtung abgebildet. Abbildung 4-28 (rechts) zeigt die Querdehnzahl der Zug- und Druckversuche für die Orientierung LR. Wie beim E-Modul und der Querdehnzahl zu sehen ist, sind Ausreißer ausgewiesen. Es wurde hier aber darauf verzichtet Ausreißer zu eliminieren um eine ganzheitliche Gegenüberstellung darzustellen. Tabelle 4-9 zeigt statistischen Kennwerte der Prüferien LT und LR.



**Abbildung 4-28:** Boxplot-Vergleich der Zug- und Druckprüfungen in Längsrichtung; links: E-Modul ( $E_L$  aller Längsversuche); Mitte: Querdehnzahlen  $\nu_{LT}$ ; rechts: Querdehnzahlen  $\nu_{LR}$

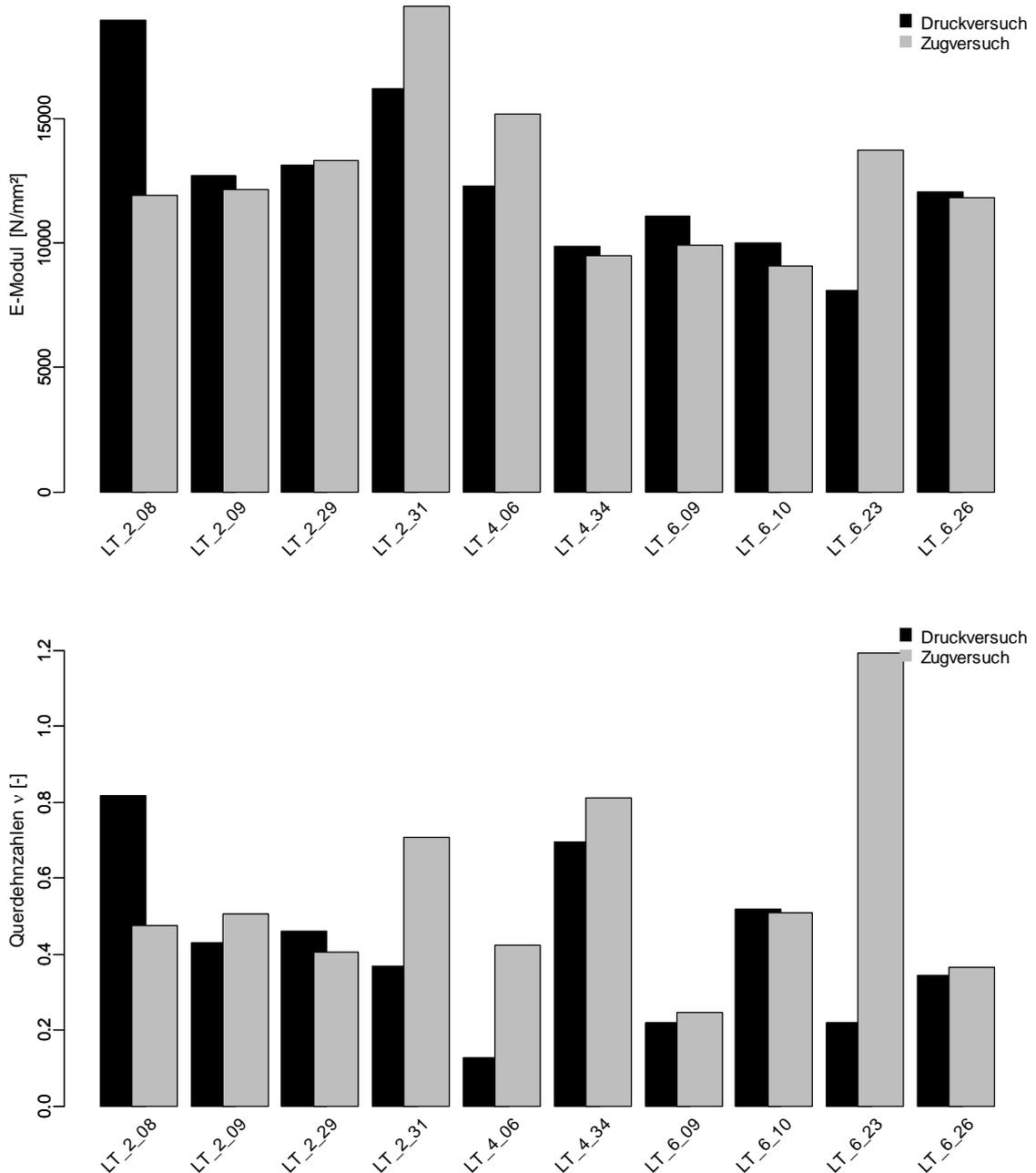
**Tabelle 4-9:** Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüferien LT und LR

	Prüferie LT				Prüferie LR			
	$E_{L,LT}$ Druck	$E_{L,LT}$ Zug	$\nu_{LT}$ Druck	$\nu_{LT}$ Zug	$E_{L,LR}$ Druck	$E_{L,LR}$ Zug	$\nu_{LR}$ Druck	$\nu_{LR}$ Zug
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	8115	9087	0,126	0,248	8138	9168	0,214	0,284
<b>Median</b>	<b>12173</b>	<b>12041</b>	<b>0,400</b>	<b>0,491</b>	<b>12198</b>	<b>12637</b>	<b>0,459</b>	<b>0,511</b>
Max	18951	19541	0,818	1,194	17431	23929	1,298	0,975
<b>Mittelwert</b>	<b>12445</b>	<b>12620</b>	<b>0,420</b>	<b>0,565</b>	<b>12463</b>	<b>13583</b>	<b>0,534</b>	<b>0,539</b>
Standartabw.	3173	3106	0,216	0,274	2734	4262	0,326	0,217
COV	25%	25%	51%	49%	22%	31%	61%	40%

#### 4-4.2.1 Prüferie LT

Abbildung 4-29 zeigt die Ergebnisse des E-Moduls und der Querdehnzahl aus den Druck- und Zugversuchen der Prüferie LT. Wie zuvor erwähnt sind alle Extrema in der Auswertung erhalten. Die statistischen Kennwerte können Tabelle 4-9 entnommen werden. Hier berechnet sich der mittlere E-Modul aus dem Druckversuch zu  $E_{L,LT,Druck} = 12445 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 25 \%$ . Der mittlere E-Modul aus dem Zugversuch beträgt zum Vergleich  $E_{L,LT,Zug} = 12620 \text{ N/mm}^2$ ,  $\text{COV} = 25 \%$ .

Die mittlere Querdehnzahl aus dem Druckversuch beträgt  $\nu_{LT,Druck} = 0,420$  ( $\text{COV} = 51 \%$ ). Dem gegenüber steht die mittlere Querdehnzahl aus dem Zugversuch  $\nu_{LT,Zug} = 0,565$  ( $\text{COV} = 49 \%$ )

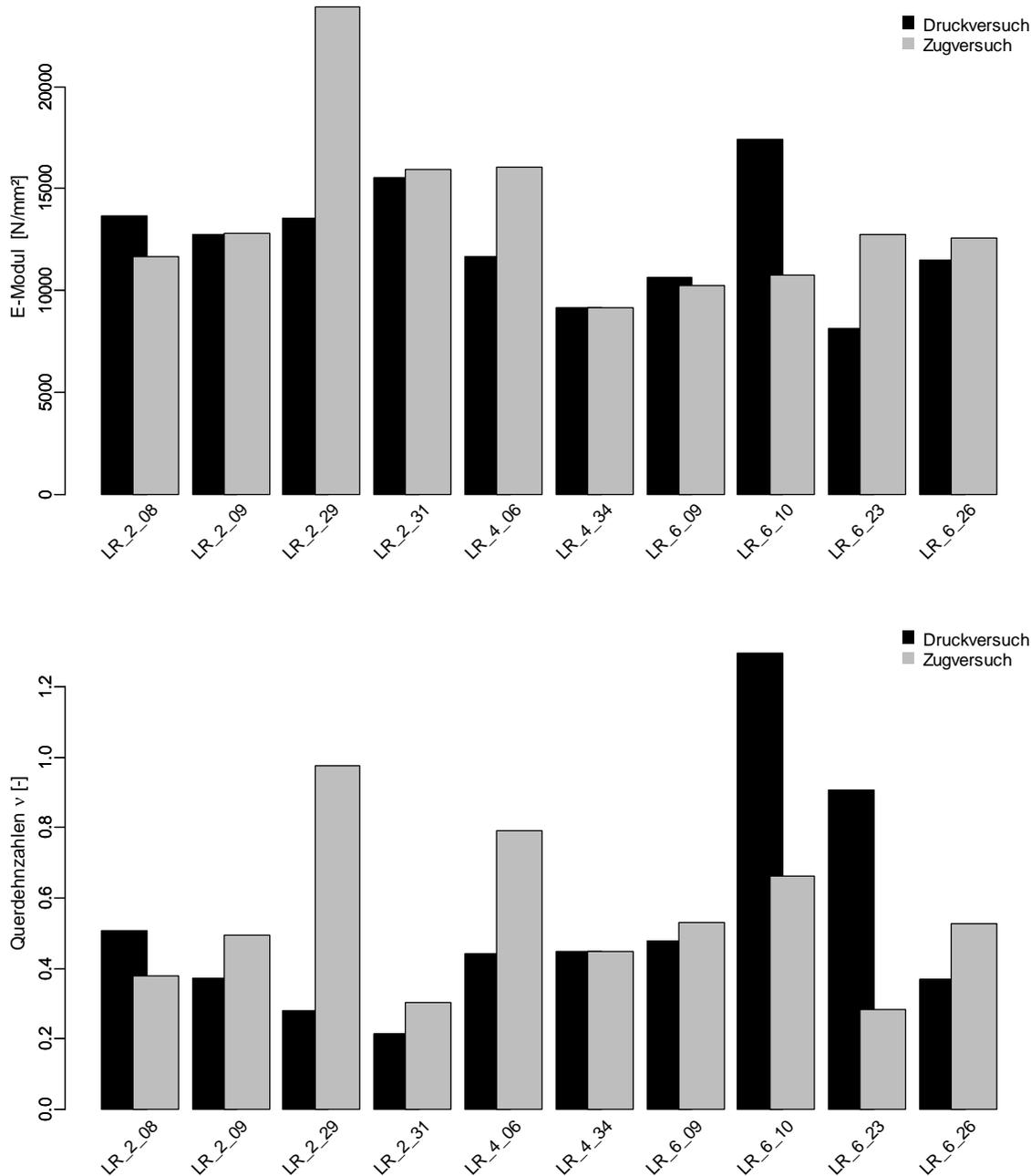


**Abbildung 4-29:** Zug- / Druckvergleich der Prüferserie LT; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

#### 4-4.2.2 Prüferserie LR

Auch hier wurde wieder, wie bei allen Druckversuchen, auf eine Ausreißer Elimination verzichtet. Die statistischen Kennwerte dieser Prüferserie sind in Tabelle 4-9 abgebildet. Der Mittelwert des E-Moduls aus dem Druckversuch beträgt  $E_{L, LR, Druck} = 12463 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 22 \%$ . Dem gegenüber steht der mittlere E-Modul aus den Zugversuchen von  $E_{L, LR, Zug} = 13583 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 31 \%$ .

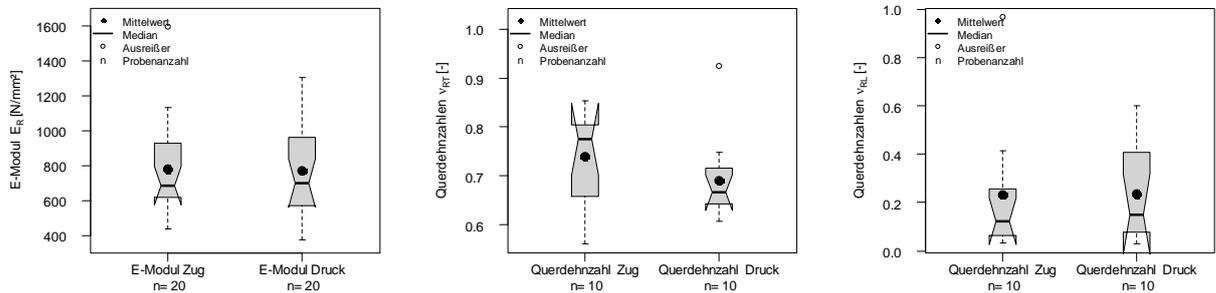
Die mittlere Querdehnzahl aus dem Druckversuch ergibt sich zu  $\nu_{LR, Druck} = 0,534$ ,  $COV = 61 \%$  und aus dem Zugversuch zu  $\nu_{LR, Zug} = 0,539$ ,  $COV = 40 \%$ .



**Abbildung 4-30:** Zug- / Druckvergleich der Prüferserie LR; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

### 4-4.3 BELASTUNG IN RADIALER HAUPTRICHTUNG

Auch ausgewählte Prüfkörper der Prüferserien RT und RL wurden Druckprüfungen unterzogen, um einen Vergleich zwischen Zug- und Druckbelastung in radialer Belastungsrichtung zu erhalten. Wie in Abbildung 4-31 zu sehen ist, sind auch hier Ausreißer ausgewiesen, doch auf eine Datenbereinigung wurde auch hier, so wie im gesamten Zug- / Druckvergleich verzichtet. Die E-Moduln in Abbildung 4-31 (links) zeigen die gesamten Werte aus der Prüferserie RT und RL. In Abbildung 4-31 (Mitte) sind die Boxplots der Querdehnzahlen des Druck- und Zugversuches der Prüferserie RT dargestellt. Abbildung 4-31 (rechts) zeigt die Boxplots der Prüferserie RL.



**Abbildung 4-31:** Boxplot-Gegenüberstellung von Zug- und Druckversuch; links: E-Modul  $E_R$ ; Mitte: Querdehnzahl  $v_{RT}$ ; rechts: Querdehnzahl  $v_{RL}$

Tabelle 4-10 zeigt eine Übersicht über die statistischen Kennwerte der Druck- und Zugprüfungen der Prüferien RT und RL

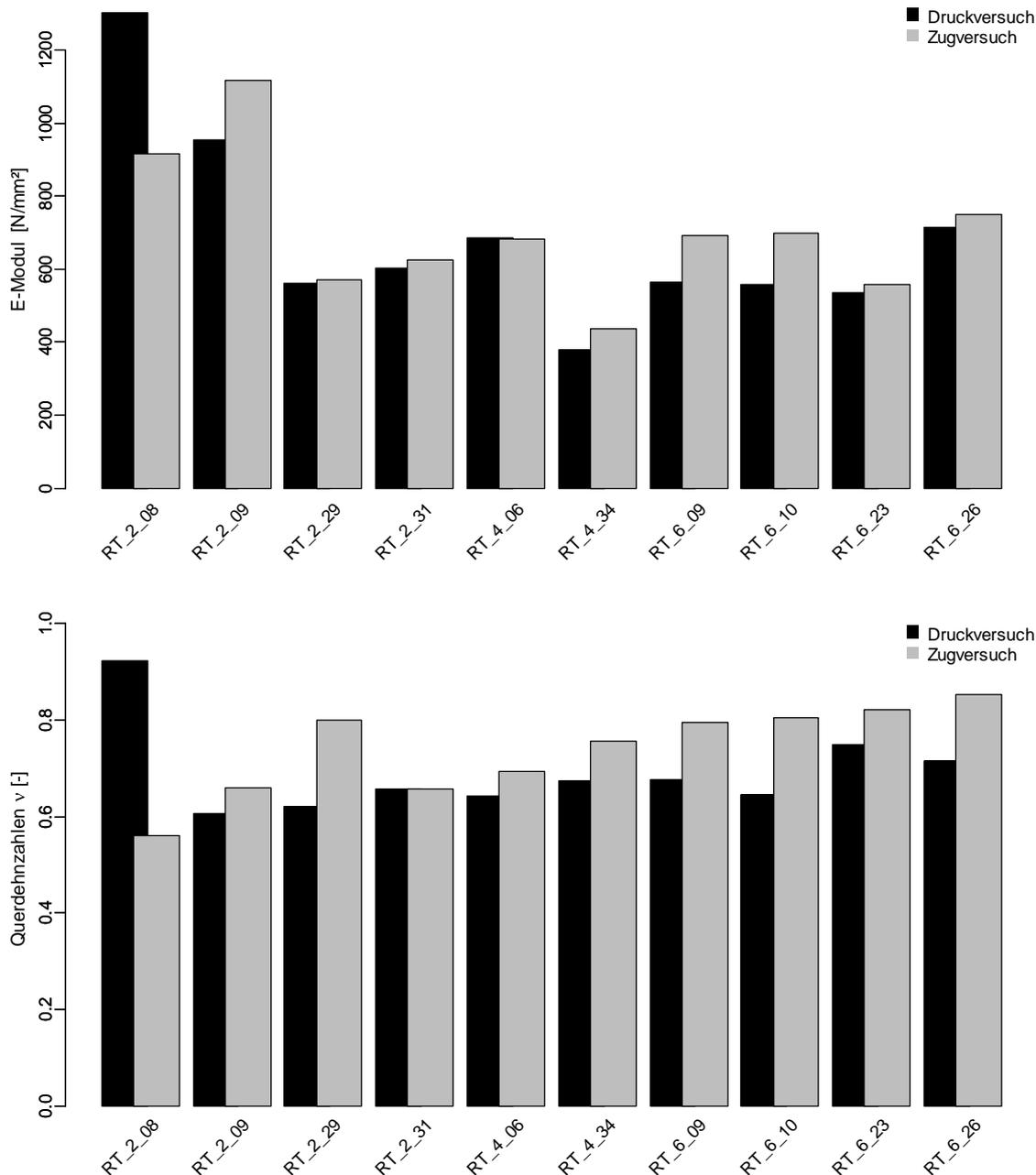
**Tabelle 4-10:** Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüferien RT und RL

	Prüfserie RT				Prüfserie RL			
	$E_{R, RT}$ Druck	$E_{R, RT}$ Zug	$v_{RT}$ Druck	$v_{RT}$ Zug	$E_{R, RL}$ Druck	$E_{R, RL}$ Zug	$v_{RL}$ Druck	$v_{RL}$ Zug
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
Anzahl	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	378	438	0,607	0,561	577	598	0,028	0,034
<b>Median</b>	<b>584</b>	<b>694</b>	<b>0,666</b>	<b>0,798</b>	<b>812</b>	<b>703</b>	<b>0,151</b>	<b>0,121</b>
Max	1302	1117	0,924	0,822	1160	1595	0,599	0,967
<b>Mittelwert</b>	<b>715</b>	<b>835</b>	<b>0,713</b>	<b>0,724</b>	<b>897</b>	<b>860</b>	<b>0,240</b>	<b>0,233</b>
Standartabw.	263	193	0,092	0,093	205	317	0,209	0,283
COV	37%	23%	13%	13%	23%	37%	87%	122%

#### 4-4.3.1 Prüfserie RT

Abbildung 4-32 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Prüfungen der Prüferie RT aus dem Druck- und Zugversuch. Hier erkennt man in Abbildung 4-32 (oben), dass der E-Modul des Prüfkörpers RT\_2\_08 aus dem Druckversuch wesentlich höher ist, als im Zugversuch. Das gleiche Ereignis ist bei den Querdehnzahlen zu erkennen (vgl. Abbildung 4-32, unten). Aus den Druckversuchen geht ein mittlerer E-Modul von  $E_{R, RT, Druck} = 715 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 37 \%$  hervor. Dem gegenüber steht ein Mittelwert von  $E_{R, RT, Zug} = 835 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 23 \%$  aus den Zugversuchen.

Die mittlere Querdehnzahl aus den Druckversuchen errechnet sich zu  $v_{RT, Druck} = 0,713$ ,  $COV = 13 \%$  und aus den Zugversuchen zu  $v_{RT, Zug} = 0,724$ ,  $COV = 13 \%$ .



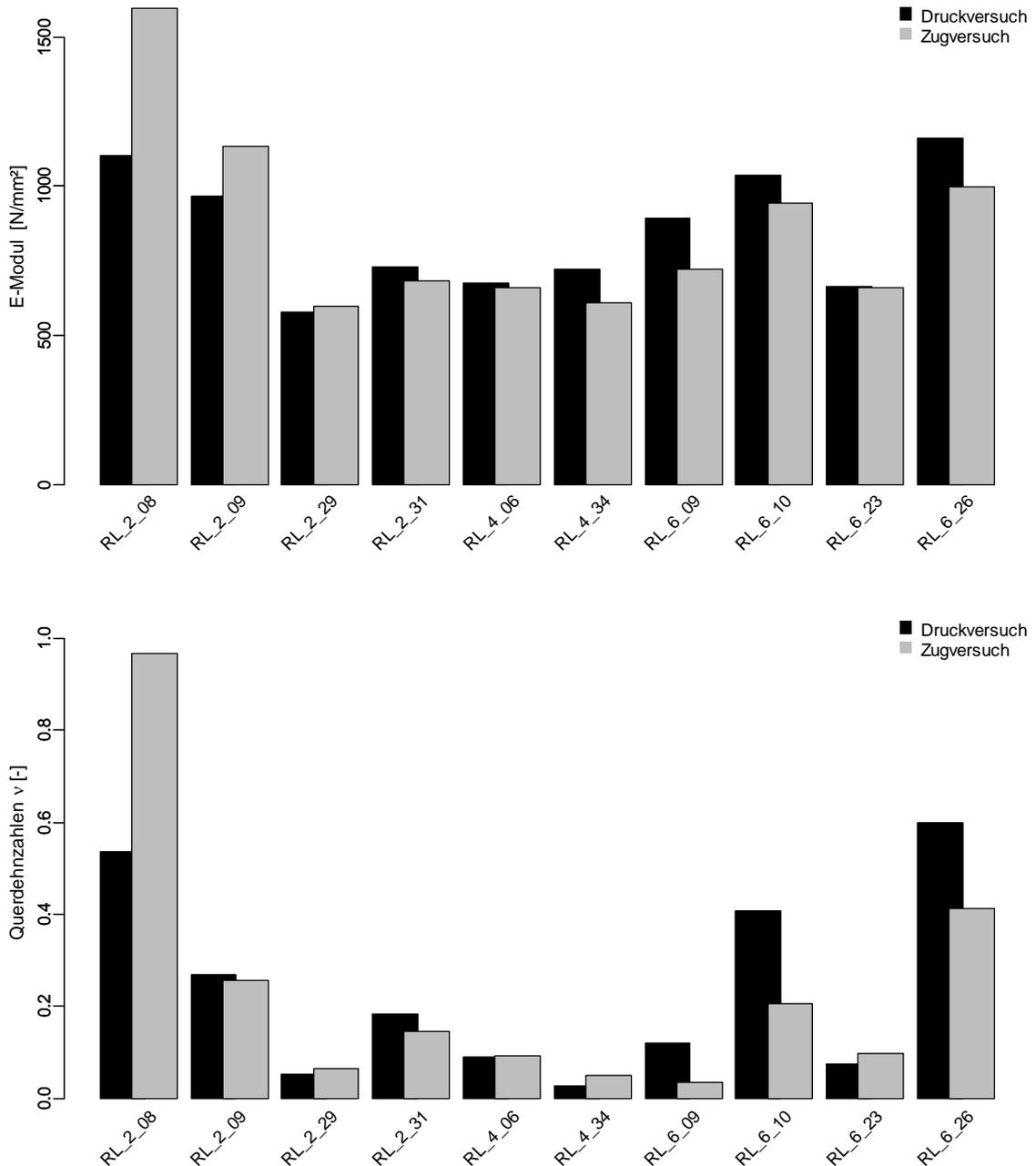
**Abbildung 4-32:** Zug- / Druckvergleich der Prüfsérie RT; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

### 4-4.3.2 Prüfsérie RL

Die Einzelergebnisse der Druck- und Zugversuche der Prüfsérie RL sind in Abbildung 4-33 abgebildet. Wie Abbildung 4-33 (oben) zeigt, gibt es bis auf den Prüfkörper RL\_2\_08 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Druck- und Zugversuche.

Bei den Querdehnzahlen (vgl. Abbildung 4-33, unten) weisen neben dem Prüfkörper RL\_2\_08 auch noch die Ergebnisse der Prüfkörper RL\_6\_10 und RL\_6\_26 markante Abweichungen zueinander auf. Die Mittelwerte aus Druck- und Zugversuche liegen aber wieder nahe aneinander. So ergibt sich für den Mittelwert des E-Moduls aus dem Druckversuch  $E_{R,RL,Druck} = 897 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 23 \%$  und aus dem Zugversuch  $E_{R,RL,Zug} = 860 \text{ N/mm}^2$ ,  $COV = 37 \%$ .

Die Streuung für Querdehnzahlen liegt für diese Prüferserie mit  $COV = 87\%$  aus dem Druckversuch und  $COV = 122\%$  aus dem Zugversuch sehr hoch. Dies ist größtenteils den, in Abschnitt 4-1.2, aufzeigten Problemen der Messung einer Längsdehnung bei Belastung in Querrichtung geschuldet. So ergibt sich die mittlere Querdehnzahl aus dem Druckversuch zu  $v_{RL, Druck} = 0,240$ ,  $COV = 87\%$  und aus dem Zugversuch zu  $v_{RT, Zug} = 0,233$ ,  $COV = 122\%$ .



**Abbildung 4-33:** Zug- / Druckvergleich der Prüferserie RL; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen

## KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG, RESÜMEE UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Bestimmung der Elastizitätszahlen von merkmalfreien Kleinproben aus Fichtenholz, welche mittels der Auswertung des linear-elastischen Quer- und Längsdehnungszustandes des Materials bei einer einachsigen Zug- bzw. Druckbeanspruchung erfolgte. Für die Ermittlung dieser Dehnungen wurden zwei an den gegenüberliegenden Seiten der Proben situierte, optische ESPI-Messsysteme verwendet, welche in der Lage sind, die Quer- und Längsdehnungen auf der jeweiligen Probenoberfläche simultan zu erfassen. Neben der aus der angenommenen Orthotropie des Materials resultierenden Orientierungskonfigurationen TR, TL, LT, LR, RL und RT wurde ferner dessen Rohdichte (Sortierung in drei Klassen mittels Jahrringgruppierung) als möglicher maßgebender Einflussparameter variiert. Zudem erfolgte eine Variation der Belastungsrichtung; neben der hierfür üblicherweise angewendeten Zugprüfung (Längsdehnung, Querstauchung) wurden ausgesuchte Proben in einem zweiten Durchgang einer Druckprüfung (Längsstauchung, Querdehnung) unterzogen. Weitere mögliche Einflussparameter wie etwa die Holzfeuchte, Holzart, Probengröße und –geometrie wurden konstant belassen.

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, stimmen die Prüfergebnisse der Elastizitätszahlen durchaus mit den Werten aus der Literatur überein. Lediglich die Querdehnzahlen für die Orientierungen TL (Tangential – Longitudinal) und RL (Radial – Longitudinal) weichen stark von den Ergebnissen aus der Literatur ab. Dies ist auf das ansatzweise orthotrope Verhalten von Holz zurückzuführen, welches bei einer Zug- oder Druckbeanspruchung in Richtung T oder R zu sehr geringen Querdehnungen führt, während in Belastungsrichtung bereits vergleichsweise große Dehnungs- bzw. Spannungswerte erreicht werden. Eine Erhöhung der Querdehnungen zufolge Erhöhung der Belastung ist aufgrund der geringen Festigkeit des Holzes bei Querbeanspruchung auszuschließen. Die daher verfügbaren Messwerte der Querdehnung führen aufgrund ihrer geringen Größe zu Messungenauigkeiten, welche auf die Lagerung und Belastung der Proben (möglicher additiver Dehnungsanteil zufolge Zwangsverformung der Proben) sowie auf die Unschärfe des Messsystems an sich zurückzuführen sind. Es kann daher der Schluss gezogen werden, dass eine exakte Bestimmung der Querdehnzahlen  $\nu_{TL}$  und  $\nu_{RL}$  mit Hilfe eines solchen optischen Messverfahrens generell schwer zu realisieren ist. Zudem sei hier anzumerken, dass die Orientierungen TL und RL größtenteils in der Literatur als Rechenwerte (hergeleitet mittels Symmetriebedingungen und dem Vorliegen anderer Elastizitätszahlen) publiziert wurden, wohingegen die hier vorgestellten auf Messwerten beruhen. Eine Gegenüberstellung der Literaturergebnisse mit Rechenwerten, welche auf eigenen Prüfergebnissen basieren, zeigt auch für diese Orientierungen eine gute Übereinstimmung der so bestimmten Querdehnzahlen.

Die weitgehende Übereinstimmung der in dieser Arbeit bestimmten Prüfergebnisse mit jenen aus der Literatur unterstreicht die grundsätzliche Eignung des ESPI-Messsystems zur Bestimmung von Elastizitätszahlen von Holz im Allgemeinen. Auf Basis der hier gemachten Erfahrungen sind jedoch zwei Punkte zu beachten: Neben der zuvor erläuterten Problematik der geringen Querdehnungen bei TL und RL, weist die erstgenannte Orientierung (wie auch LT) zudem das Problem alternierender Früh- und Spätholzanschnitte auf der Messoberfläche des Prüfkörpers auf, wodurch stark inhomogene Dehnungszustände beobachtet wurden, welche teilweise zu unbrauchbaren Resultaten führten.

Zudem war zu beobachten, dass sich bei den Prüfserien LT und LR (Belastung in Längsrichtung) in den Haltezeiten Relaxationserscheinungen gezeigt haben. Demnach musste darauf geachtet werden, dass die ESPI-Bilder unmittelbar nach Erreichen der Haltephase erstellt wurden, um Verfälschungen der Messergebnisse zu vermeiden.

Die Zusammenhänge der in dieser Arbeit gemessenen Kennwerte sind teilweise sehr unterschiedlich ausgeprägt. So gibt es bei den Prüfserien TR (vgl. Abschnitt 4-1.1) und TL (vgl. Abschnitt 4-1.2) starke Korrelationen sowohl zwischen E-Modul und Rohdichte als auch zwischen Querdehnzahl und Rohdichte. Auch die Abhängigkeit von Querdehnzahl und E-Modul ist deutlich ersichtlich. Die Prüfserien LT (vgl. Abschnitt 4-1.3) und LR (siehe Abschnitt 4-1.4) zeigen hingegen nur eine mittlere bis schwache Korrelation. Ein Zusammenhang zwischen E-Modul und Querdehnzahl ist bei diesen Serien ebenfalls erkennbar, doch dieser ist aufgrund der Lage der Messpunkte zueinander (vgl. Abbildung 4-8, unten links und Abbildung 4-10, unten links) kritisch zu betrachten. Weiter fällt bei der Prüfserie LR eine negative Korrelation zwischen der Querdehnzahl und der Rohdichte auf (vgl. Abbildung 4-10, oben rechts und unten rechts). Zusammenhänge mit unterschiedlichen Vorzeichen zeigen sich auch sehr stark in der Prüfserie RT (vgl. Abschnitt 4-1.6 und Abbildung 4-14, oben rechts, unten links und unten rechts). Auffallend bei dieser Serie ist auch der starke Zusammenhang zwischen der Querdehnzahl und der Jahrringgruppe mit einem positiven Korrelationskoeffizienten. Eine mögliche Begründung, meiner Meinung nach, kann der Schichtaufbau von Früh- und Spätholz mit den variierten Schichtstärken sein, der aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten Einfluss auf die Dehnungen hat.

**Tabelle 5-1:** Zusammenfassung der Mittelwerte der gemessenen Ergebnisse, getrennt nach Jahrringgruppe und für die Gesamtheit; die Klammerausdrücke stellen den Variationskoeffizienten dar

	Orientierung	Querdehnzahl	E-Modul		Rohdichte
		[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]		[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>a<sub>w</sub> = 2 mm</b>	TL	v <sub>TL</sub> = 0,182 (67 %)	E <sub>T,TL</sub> = 714 (31 %)	E <sub>T</sub> = 607 (31 %)	ρ <sub>T</sub> = 454 (10 %)
	TR	v <sub>TR</sub> = 0,460 (16 %)	E <sub>T,TR</sub> = 500 (15 %)		
	LR	v <sub>LR</sub> = 0,560 (58 %)	E <sub>L,LR</sub> = 15584 (58 %)	E <sub>L</sub> = 15704 (28 %)	ρ <sub>L</sub> = 456 (10 %)
	LT	v <sub>LT</sub> = 0,517 (20 %)	E <sub>L,LT</sub> = 15808 (33 %)		
	RL	v <sub>RL</sub> = 0,138 (69 %)	E <sub>R,RL</sub> = 994 (35 %)	E <sub>R</sub> = 893 (32 %)	ρ <sub>R</sub> = 447 (10 %)
	RT	v <sub>RT</sub> = 0,648 (12 %)	E <sub>R,RT</sub> = 791 (27 %)		
<b>a<sub>w</sub> = 4 mm</b>	TL	v <sub>TL</sub> = 0,087 (76 %)	E <sub>T,TL</sub> = 486 (8 %)	E <sub>T</sub> = 437 (15 %)	ρ <sub>T</sub> = 413 (7 %)
	TR	v <sub>TR</sub> = 0,420 (14 %)	E <sub>T,TR</sub> = 394 (15 %)		
	LR	v <sub>LR</sub> = 0,610 (30 %)	E <sub>L,LR</sub> = 14059 (30 %)	E <sub>L</sub> = 13374 (25 %)	ρ <sub>L</sub> = 415 (10 %)
	LT	v <sub>LT</sub> = 0,526 (31 %)	E <sub>L,LT</sub> = 12592 (20 %)		
	RL	v <sub>RL</sub> = 0,127 (45 %)	E <sub>R,RL</sub> = 706 (18 %)	E <sub>R</sub> = 691 (17 %)	ρ <sub>R</sub> = 409 (7 %)
	RT	v <sub>RT</sub> = 0,743 (5 %)	E <sub>R,RT</sub> = 676 (19 %)		
<b>a<sub>w</sub> = 6 mm</b>	TL	v <sub>TL</sub> = 0,102 (50 %)	E <sub>T,TL</sub> = 454 (14 %)	E <sub>T</sub> = 433 (15 %)	ρ <sub>T</sub> = 400 (6 %)
	TR	v <sub>TR</sub> = 0,400 (14 %)	E <sub>T,TR</sub> = 406 (12 %)		
	LR	v <sub>LR</sub> = 0,519 (34 %)	E <sub>L,LR</sub> = 12559 (27 %)	E <sub>L</sub> = 11935 (22 %)	ρ <sub>L</sub> = 400 (5 %)
	LT	v <sub>LT</sub> = 0,338 (44 %)	E <sub>L,LT</sub> = 11013 (15 %)		
	RL	v <sub>RL</sub> = 0,098 (54 %)	E <sub>R,RL</sub> = 769 (22 %)	E <sub>R</sub> = 751 (21%)	ρ <sub>R</sub> = 391 (5 %)
	RT	v <sub>RT</sub> = 0,791 (5 %)	E <sub>R,RT</sub> = 688 (22 %)		
<b>Gesamt</b>	TL	v <sub>TL</sub> = 0,129 (71 %)	E <sub>T,TL</sub> = 539 (33 %)	E <sub>T</sub> = 484 (34 %)	ρ <sub>T</sub> = 417 (10 %)
	TR	v <sub>TR</sub> = 0,412 (16 %)	E <sub>T,TR</sub> = 439 (18%)		
	LR	v <sub>LR</sub> = 0,565 (41 %)	E <sub>L,LR</sub> = 14002 (29 %)	E <sub>L</sub> = 13343 (32 %)	ρ <sub>L</sub> = 414 (10 %)
	LT	v <sub>LT</sub> = 0,458 (33 %)	E <sub>L,LT</sub> = 11376 (34 %)		
	RL	v <sub>RL</sub> = 0,117 (59 %)	E <sub>R,RL</sub> = 886 (29 %)	E <sub>R</sub> = 763 (29 %)	ρ <sub>R</sub> = 409 (10 %)
	RT	v <sub>RT</sub> = 0,740 (11 %)	E <sub>R,RT</sub> = 727 (23 %)		

Was das Verhalten der Querdehnzahlen und E-Moduln in Abhängigkeit der Belastungsrichtung (Zug vs. Druck) betrifft, so wurden – wie in Abschnitt 4-4 dargestellt – bei einzelnen Prüfkörpern erhebliche Unterschiede festgestellt, welche jedoch auf die zuvor genannten Schwierigkeiten bei der Messung zurück zu führen sind. Im Vergleich der Mediane der jeweiligen Prüfserien konnten jedoch keine signifikant unterschiedlichen Ergebniswerte beobachtet werden. Auf Basis der hier vorliegenden Ergebnisse ist somit ein Einfluss der Belastungsrichtung auf die experimentell bestimmte Größe der Querdehnzahlen und E-Moduln auszuschließen.

Die in Abschnitt 4-3 ausgewiesene Nachgiebigkeitsmatrix auf Basis der gemessenen Querdehnzahlen und E-Moduln lässt sich nicht mit den Symmetriebedingungen vereinbaren. Auch hier sind wieder die zuvor genannten Probleme mit der Messbarkeit einzelner Orientierungen als ein möglicher Grund anzuführen. Ein anderer wäre die Bildung von Mikrorissen im Holzgewebe während der Messungen. Das würde bedeuten, dass Holz nicht als vollkommen elastisch anzusehen ist. Es sind demnach noch weitere Untersuchungen in diesem Bereich notwendig, um diese Fragestellungen zu beantworten. Dies betrifft im Wesentlichen eine Variation des Messsystems (z. B. Video- und Laserextensometer, vgl. [34]) für die beiden Orientierungen RL und TL.

Durch die Anwendung des ESPI-Messsystems sind aber auch neue Fragen bzw. Möglichkeiten entstanden. So sollte es mit den vorliegenden Ergebnissen möglich sein, nicht nur den einzelnen Kennwert für die merkmalfreie Kleinprobe als Mittelwert der Ergebnisse des gesamten Messfelds, sondern auch dessen Verlauf über die darin enthaltene Jahrringstruktur (alternierende Zonen von Früh- und Spätholz) darzustellen. Auch zu diesem Punkt ist noch weitere Forschungsarbeit zu leisten.

## ANHANG A VERZEICHNISSE

### A-1 Literaturverzeichnis

---

- [1] H. Hörig, in *Ingenieur-Archiv*, 1. Heft, Vol. 6, Springer-Verlag, Berlin **1935**.
- [2] E. Krabbe, Messungen von Gleit- und Dehnungszahlen an Holzstäbchen mit rechteckigen Querschnitten, *Hannover, T. H., F. f. Bauw., Diss. v. 14. Juni 1960* **1960**.
- [3] F.-H. Neuhaus, *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen / Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 81-8, Bochum **1981**.
- [4] O. Wommelsdorff, Dehnungs- und Querdehnungszahlen von Hölzern, *Hannover, T. H., F. f. Bauw., Diss. v. 28. März 1966* **1966**.
- [5] J. Stamer, *Ingenieur-Archiv* **1935**, 6 (1), 1 – 8.
- [6] U. Müller, A. Ringhofer, R. Brandner, G. Schickhofer, *Wood Sci Technol* **2015**, 49 (6), 1123 – 1136. DOI: 10.1007/s00226-015-0755-3.
- [7] Gerhard Schickhofer, *Holzbau: Der Roh- und Werkstoff Holz*, 04th ed., Fachbereich Ingenieurbaukunst (IBK) an der TU Graz, Graz **2006**.
- [8] R. Wimmer, *Fostnahe Holzforschung: Forschung an der Schnittstelle von Wald und Holz*, Knet-Fachseminar "Holzeigenschaften und Strukturrharchien **2002**.
- [9] Zimmerman Tanja, Sell j, *Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Lauhhölzern* **1997**.
- [10] K. Mägdefrau, *Botanik*, Winters Studienführer, Winter, Heidelberg **1951**.
- [11] D. Grosser, *Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehratlas*, Dr. Kessel, Remagen **2007**.
- [12] Franz Kollman, *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit*, 2nd ed. **1951**.
- [13] R. Wagenfuehr, *Anatomie des Holzes unter besonderer Beruecksichtigung der Holztechnik. Mit 143 Bildern, 50 Tab. u. einem Bildanh. <146 Fotos>. 4., neubearb. Aufl*, Fachbuchverl., Leipzig **1989**.
- [14] *Schnittholz / Holz Abbildung 1*, <http://www.tis-gdv.de/tis/ware/holz/schnitt/abb1.htm> **2014**.
- [15] D. E. Kretschmann, *Properties of juvenile Wood: TECHLINE, Properties and use of wood, composites, and fiber products* **1998**, 9.
- [16] Österreichisches Normungsinstitut, *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz: Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 79.040; 79.060.99; 91.080.20 (ÖNORM EN 408).
- [17] J. Bodig, B. A. Jayne, *Mechanics of wood and wood composites*, Krieger Publ, Malabar Fla. **1993**.
- [18] M. Grimsel, *Mechanisches Verhalten von Holz: Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes*, Dresdner Forschungen Maschinenwesen, Bd. 1, w.e.b.-Univ.-Verl., Dresden **1999**.
- [19] J. Bodig, J. R. Goodman, *Wood Science* **1973**, 5 (4), 249 – 264.
- [20] *Lehrbuch zur Experimentalphysik Band 2: Kontinuumsmechanik und Thermodynamik*, Lehrbuch (Eds: J. Heintze, P. Bock), Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg **2016**.
- [21] P. A. Tipler, G. Mosca, M. Basler, *Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure ; [der Begleiter bis zum Bachelor]*, 6th ed., Lehrbuch, Springer Spektrum, Berlin **2012**.
- [22] Deutsches Institut für Normung, *Biegeversuch* **1978** (52186).
- [23] Deutsches Institut für Normung, *Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser* **1979** (52188).
- [24] Deutsches Institut für Normung, *Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser* **1976** (52185).
- [25] P. Glos, *Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung*, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, H. 61, Sonderforschungsbereich 96; LKI, München **1981**.

- [26] P. Niemz, *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Holz, DRW-Verl., Leinfelden-Echterdingen **1993**.
- [27] W. Voigt, *Lehrbuch der Kristallphysik: (mit Ausschluss der Kristalloptik)*, 1st ed., B. G. Teubners Sammlung von Lehrbüchern auf dem Gebiete der mathematischen Wissenschaften, Vol. 34, Teubner, Leipzig u.a. **1928**.
- [28] H. Hörig, *Ingenieur-Archiv* **1937**, 8 (3), 174 – 182.
- [29] H. Hörig, *Annalen der Physik* **1943**, 435 (4), 285 – 295.
- [30] *Prüf- und Meßeinrichtungen*, Handbuch der Werkstoffprüfung (Eds: R. Berthold et al.), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l. **1940**.
- [31] J. R. Goodman, J. Bodig, *Journal of the Structural Division* **1970**, 96 (11), 2301 – 2319.
- [32] P. Niemz, D. Caduff, *Holz Roh Werkst* **2008**, 66 (1), 1 – 4. DOI: 10.1007/s00107-007-0188-2.
- [33] D. Keunecke, S. Hering, P. Niemz, *Wood Sci Technol* **2008**, 42 (8), 633 – 647. DOI: 10.1007/s00226-008-0192-7.
- [34] Kumpenza, C., Matz, P., Halbauer, P., Grabner, M., Feist, F., & Müller, U., *Measuring Poisson's ratio: Mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques (Under Review)* **2018**.
- [35] R. Schlüter, *Elastische Messungen an Fichtenholz*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden **1932**.
- [36] R. F.S. Hearmon, *Mechanical Properties of Wood and Paper* **1953**, 19.
- [37] R. F.S. Hearmon, *Forest Prod J* **1964**, 14, 357 – 359.
- [38] R. F. S. Hearmon, A. A. Maradudin, *Physics Today* **1961**, 14 (10), 48. DOI: 10.1063/1.3057153.
- [39] R. Keylwerth, *Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagerhölzer*, VDI-Forschungsheft **1951**.
- [40] F. Kollmann, *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Zweiter Band: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, Spanabhebende und Spanlose Holzbearbeitung Holzverbindungen*.
- [41] F. Kollmann, *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*, VDI-Forschungsheft, Vol. 520, VDI-Verl., Düsseldorf **1967**.
- [42] Lekhnitskii, *Acta Cryst* **1964**, 17 (6), 793. DOI: 10.1107/S0365110X64002171.
- [43] K. Persson, *Micromechanical modelling of wood and fibre properties* **2000**.
- [44] R. Wagenführ, *Holz atlas*, 6th ed., Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl., Leipzig **2007**.
- [45] D. Bimberg, in *Meßtechniken mit Lasern: Interferometrie, Holographie, Anemometrie, Speckles*, Kontakt & Studium, Vol. 378 (Eds: Prof. Dr.-Ing Wilfried J. Bartz), Expert-Verl. Ehningen bei Böblingen **1993**.
- [46] M. Gingerl, *Realisierung eines optischen Deformationsmesssystems zur experimentellen Untersuchung des orthotropen Materialverhaltens von Holz bei biaxialer Beanspruchung*, Dissertationen der Technischen Universität Wien, Vol. 88, Österr. Kunst- und Kulturverl., Wien **2000**.
- [47] A. Purde, *Speckle-Interferometrie zur Formvermessung unstetiger Oberflächen*.
- [48] J. Eberhardsteiner, *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz: Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*, Springer Vienna, Vienna, s.l. **2002**.
- [49] H. J. Tiziani, in *Meßtechniken mit Lasern: Interferometrie, Holographie, Anemometrie, Speckles*, Kontakt & Studium, Vol. 378 (Eds: Prof. Dr.-Ing Wilfried J. Bartz), Expert-Verl. Ehningen bei Böblingen **1993**.
- [50] Peter Niemz, *Zur Orthotropie der physikalisch - mechanischen Eigenschaften von Fichtenholz*, Forestry and Wood Technology **2017**.
- [51] Purbond AG, *Datenblatt Purbond HB S309: 1K-Polyurethanklebstoff zur Herstellung von tragenden Holzbauteilen*, 6203 Sempach Station **2011**.
- [52] M. Sachs, *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieurstudenten an Fachhochschulen: Mit 35 Bildern, 93 Beispielen und 71 Aufgaben*, 4th ed., Mathematik-Studienhilfen, Hanser, München **2013**.
- [53] E. Stadlober, J. Schauer, *Statistik - Bakkalaureat*, 6th ed., Technische Universität Graz, Graz **2012**.
- [54] R. Brandner, *Risiko im konstruktiven Ingenieurbau: Skript zur Vorlesung*, Graz **2018**.
- [55] Österreichisches Normungsinstitut, *Holzbauwerke - Verechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien **2016**, 79.040; 91.080.20 (ÖNORM EN 14358).

- [56] R. Brandner, *Stochastic system actions and effects in engineered timber products and structures*, Monographic series TU Graz, Vol. 2, Verl. der Techn. Univ, Graz **2013**.
- [57] D. Wozabal, *Regressionanalyse in R: Session 6*, Uni Wien, Wien **2007**.
- [58] Österreichisches Normungsinstitut, *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz: Bestimmung durch Darrverfahren*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien **2004**, les 79.040 (ÖNORM EN 13183-1).
- [59] Spitzer Georg, *VORRATSPROGNOSEN UND SYSTEMATISCHE ERMITTLUNG CHARAKTERISTISCHER KENNGRÖSSEN FÜR FICHTENSTARKHOLZ AUS DER STEIERMARK*, Technische Universität Graz, Graz **2004**.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2-1:</b>	<i>Schematischer Überblick über die Strukturebenen des Holzes [8] .....</i>	<i>4</i>
<b>Abbildung 2-2:</b>	<i>"Neues" Zellwandmodell nach [9] .....</i>	<i>6</i>
<b>Abbildung 2-3:</b>	<i>Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche) [10] .....</i>	<i>8</i>
<b>Abbildung 2-4:</b>	<i>Holzkeil einer vierjährigen Kiefer mit den charakteristischen makroskopischen Erkennungsmerkmalen [14] .....</i>	<i>10</i>
<b>Abbildung 2-5:</b>	<i>Stammquerschnitt einer Lärche (links) und einer Fichte (rechts) [7] .....</i>	<i>11</i>
<b>Abbildung 2-6:</b>	<i>Eigenschaften von juvenilen und adulten Nadelholz [7] (in Anlehnung an [15]) .....</i>	<i>11</i>
<b>Abbildung 2-7:</b>	<i>Darstellung der drei anatomischen Hauptschnittrichtungen.....</i>	<i>13</i>
<b>Abbildung 2-8:</b>	<i>Bezeichnung der Hauptrichtungen .....</i>	<i>14</i>
<b>Abbildung 2-9:</b>	<i>Spannungs-Dehnungs-Diagramm für fehlerfreies Holz (in Anlehnung an [7]).....</i>	<i>15</i>
<b>Abbildung 2-10:</b>	<i>Symmetrieebenen, aufgespannt durch die Normalvektoren <math>x_1</math>, <math>x_2</math> und <math>x_3</math> (in Anlehnung an [7]).....</i>	<i>17</i>
<b>Abbildung 2-11:</b>	<i>symmetrisches System aus der Baustatik (entnommen aus [7]).....</i>	<i>18</i>
<b>Abbildung 2-12:</b>	<i>Vorzeichendefinition von Symmetrieebene 1 (in Anlehnung an [7]) .....</i>	<i>18</i>
<b>Abbildung 2-13:</b>	<i>Vorzeichendefinition der Normalverzerrungen (in Anlehnung an [7]) .....</i>	<i>19</i>
<b>Abbildung 2-14:</b>	<i>Vorzeichendefinition der Schubverzerrungen (in Anlehnung an [7]).....</i>	<i>19</i>
<b>Abbildung 2-15:</b>	<i>Schematische Darstellung der Dehnungen bei einaxialem Zug (in Anlehnung an [21]).....</i>	<i>21</i>
<b>Abbildung 2-16:</b>	<i>Gegenüberstellung von Kleinstproben (Normzugprobe) und Proben in Bauteilgröße.....</i>	<i>22</i>
<b>Abbildung 2-17:</b>	<i>Superposition von Wellen; links: Addition von Wellen mit unterschiedlichen Phasen (konstruktive Überlagerung); rechts: Auslöschung durch Addition von zwei Wellen, die genau um 180 ° verschoben sind (destruktive Überlagerung) .....</i>	<i>27</i>
<b>Abbildung 2-18:</b>	<i>Addition von Wellen mit verschiedenen Amplituden, Frequenzen und Phasen .....</i>	<i>28</i>
<b>Abbildung 2-19:</b>	<i>schematische Darstellung eines Michelson – Interferometers (in Anlehnung an [45]).....</i>	<i>29</i>
<b>Abbildung 2-20:</b>	<i>Speckle Bild [47] .....</i>	<i>30</i>
<b>Abbildung 2-21:</b>	<i>Entstehungsprinzip des Speckle-Effekts; links: objektiver Speckle-Effekt; rechts: subjektiver Speckle-Effekt (in Anlehnung an [46]) .....</i>	<i>31</i>
<b>Abbildung 2-22:</b>	<i>Grundprinzip der Beleuchtungssituation; links: In-plane-Verfahren; rechts: out-of-plane-Verfahren (in Anlehnung an [46]).....</i>	<i>31</i>
<b>Abbildung 2-23:</b>	<i>Änderung des Lichtweges aufgrund einer Verschiebung <math>u</math> (in Anlehnung an [46]).....</i>	<i>32</i>
<b>Abbildung 2-24:</b>	<i>Sensitivitätsvektor; links: in-plane Verfahren; rechts: out-of-plane Verfahren (in Anlehnung an [46]).....</i>	<i>33</i>
<b>Abbildung 2-25:</b>	<i>Messfeld (140 x 140 mm<sup>2</sup>) eines Holzprobekörpers (entnommen aus Eberhardsteiner [48]); a): Speckle-Interferogramm, b): Interferenzstreifen c): moduliertes Phasenbild .....</i>	<i>35</i>
<b>Abbildung 2-26:</b>	<i>Modulo-2<math>\pi</math>-Phasenbild; links: ungestörte Aufnahme; rechts: deutlich erkennbare Dekorrelation [46] .....</i>	<i>37</i>
<b>Abbildung 2-27:</b>	<i>Schlierenbildung bedingt durch Wärmekonvektion [46] .....</i>	<i>37</i>
<b>Abbildung 2-28:</b>	<i>Phasenschiebefehler in einem Modulo-2<math>\pi</math>-Phasenbild [46].....</i>	<i>38</i>
<b>Abbildung 2-29:</b>	<i>Darstellung einer a) fehlerfreien und b) bzw. c) fehlerhaften Demodulation [46].....</i>	<i>39</i>

<b>Abbildung 2-30:</b>	<i>Moduliertes Phasenbild; links: schwache Filterung; rechts: starke Filterung [46]</i> .....	39
<b>Abbildung 2-31:</b>	<i>In-plane-Aufbau, Messempfindlichkeit gegenüber der Out-of-plane-Richtung (in Anlehnung an [46])</i> .....	40
<b>Abbildung 3-1:</b>	<i>Auswahl an Rohmaterial zur Prüfkörperherstellung</i> .....	43
<b>Abbildung 3-2:</b>	<i>Ergebnis der Spannungsanalyse im R-FEM (Version 5.04.0024) von Dlubal; links: Spannungsverlauf über den Prüfkörper; rechts: Detail des Messbereiches mit FE-Netz</i> .....	44
<b>Abbildung 3-3:</b>	<i>Geometrie der Probekörper; links: Probekörper mit Faserorientierung parallel zur Hauptachse; rechts: Probekörper mit Faserorientierung normal zur Hauptachse</i> .....	45
<b>Abbildung 3-4:</b>	<i>Rohlinge der Prüfkörper für die longitudinale Belastungsrichtung</i> .....	46
<b>Abbildung 3-5:</b>	<i>Rohlinge der Prüfkörper für die tangentielle Belastungsrichtung; links: während des Verklebens mit der Lasteinleitung aus Buche; rechts: nach dem Ausspannen</i> .....	47
<b>Abbildung 3-6:</b>	<i>Einzelkomponenten der Prüfkörper mit radialer Belastungsrichtung; links: nach dem Formatieren; rechts: nach dem Verkleben</i> .....	48
<b>Abbildung 3-7:</b>	<i>Weiterverarbeitung zu Prüfkörpern mit radialer Belastungsrichtung; links: während des Verklebens mit der Lasteinleitung; rechts: nach dem Ausspannen</i> .....	48
<b>Abbildung 3-8:</b>	<i>Frässhablonen; oben: Grundplatte mit Mittelsteg; unten: Frässhablonen mit Spanndeckel und Spannschrauben</i> .....	50
<b>Abbildung 3-9:</b>	<i>Tischfräse der Firma Knapp</i> .....	50
<b>Abbildung 3-10:</b>	<i>Aufnahme während der Fräsarbeit</i> .....	51
<b>Abbildung 3-11:</b>	<i>Prüflabor der BOKU mit Universalprüfmaschine, den Speckle-Kameras und den Computern für Steuerung und Auswertung</i> .....	52
<b>Abbildung 3-12:</b>	<i>Schematischer Aufbau einer in-plane Messung in eine Messrichtung (in Anlehnung an [46])</i> . 53	
<b>Abbildung 3-13:</b>	<i>Zentrische Einspannung mittels mechanischer Klemmbacken / Speckle-Kameras, Prüfkörper ohne Lichtblende</i> .....	53
<b>Abbildung 3-14:</b>	<i>Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Ansicht und Schnitt</i> .....	54
<b>Abbildung 3-15:</b>	<i>Darstellung der Berandung, der Bezugskordinaten und des Messfeldes</i> .....	55
<b>Abbildung 3-16:</b>	<i>links: Bildaufnahme mit den Kameras; rechts: Am aufgenommenen Bild wird anhand der markierten Koordinaten die Berandung eingerichtet</i> .....	56
<b>Abbildung 3-17:</b>	<i>Definition der Laststufen der Zugversuche; links: Laststufen für Messungen in Faserrichtung; rechts: Laststufen für Messungen quer zur Faserrichtung</i> .....	57
<b>Abbildung 3-18:</b>	<i>Definition der Laststufen; links: Laststufen für die Druckmessungen in Faserrichtung; rechts: Laststufen für die Druckmessungen quer zur Faser</i> .....	57
<b>Abbildung 3-19:</b>	<i>Idealisierter Schnitt durch ein Phasenbild; (a) modulierte; (b) demodulierte Interferenzphasenänderung (in Anlehnung an [46, 48])</i> .....	58
<b>Abbildung 3-20:</b>	<i>Auswerteprozedur vom ESPI-Fringe bis zu den messbaren Dehnungen</i> .....	59
<b>Abbildung 3-21:</b>	<i>Last- Verformungskurve zur Bestimmung des E-Moduls</i> .....	60
<b>Abbildung 3-22:</b>	<i>Beschreibung eines Boxplots</i> .....	63
<b>Abbildung 3-23:</b>	<i>Beispiele für Linear- und Potenzregression, Interpretation für lineare Korrelation; oben links: starke Korrelation (<math>R^2 = 0,996</math>); oben rechts: starke Korrelation (<math>R^2 = -0,996</math>) mit fallenden Zusammenhang; unten links: sehr schwache Korrelation (<math>R^2 = 0,0099</math>); unten rechts: starke Korrelation (<math>R^2 = 0,8445</math>)</i> .....	65
<b>Abbildung 4-1:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR, getrennt nach Jahrringgruppe sowie für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl</i> .....	68
<b>Abbildung 4-2:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche TL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix</i> .....	70
<b>Abbildung 4-3:</b>	<i>Ansichten verschiedener Prüfkörper mit inhomogenen Früh- bzw. Spätholzanteil im Messfeld; links: TL_2_24; Mitte: TL_4_17; rechts: TL_6_23</i> .....	71

<b>Abbildung 4-4:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL, getrennt nach Jahrringgruppen sowie für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl.....</i>	72
<b>Abbildung 4-5:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche TL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix.....</i>	74
<b>Abbildung 4-6:</b>	<i>Ansichten verschiedener Prüfkörper mit inhomogenen Früh- bzw. Spätholzanteil im Messfeld; links: LT_2_30; Mitte: LT_4_06; rechts: LT_6_26.....</i>	75
<b>Abbildung 4-7:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl.....</i>	76
<b>Abbildung 4-8:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche LT; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix.....</i>	78
<b>Abbildung 4-9:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl.....</i>	79
<b>Abbildung 4-10:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche LR; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix.....</i>	81
<b>Abbildung 4-11:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl.....</i>	82
<b>Abbildung 4-12:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche RL; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix.....</i>	84
<b>Abbildung 4-13:</b>	<i>Boxplots der logarithmierten Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; oben: Rohdichte; unten links: E-Modul; unten rechts: Querdehnzahl.....</i>	85
<b>Abbildung 4-14:</b>	<i>Streudiagramme und Korrelationsmatrix der bereinigten Ergebnisse der Zugversuche RT; links oben: Streudiagramm E-Modul - Rohdichte; rechts oben: Streudiagramm Querdehnzahl - Rohdichte; links unten: Streudiagramm Querdehnzahl - E-Modul; rechts unten: Korrelationsmatrix.....</i>	87
<b>Abbildung 4-15:</b>	<i>Streudiagramm E-Modul <math>E_T</math> / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen.....</i>	89
<b>Abbildung 4-16:</b>	<i>Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul <math>E_{T,mean}</math> / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen..</i>	89
<b>Abbildung 4-17:</b>	<i>Streudiagramm E-Modul <math>E_L</math> / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen.....</i>	90
<b>Abbildung 4-18:</b>	<i>Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul <math>E_{L,mean}</math> / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen..</i>	90
<b>Abbildung 4-19:</b>	<i>Streudiagramm E-Modul <math>E_R</math> / Rohdichte, unterteilt in Jahrringgruppen.....</i>	91
<b>Abbildung 4-20:</b>	<i>Streudiagramm der Mittelwerte E-Modul <math>E_{R,mean}</math> / Rohdichte unterteilt in Jahrringgruppen... </i>	92
<b>Abbildung 4-21:</b>	<i>Streudiagramme Elastizitätszahlen; oben: Elastizitätszahl <math>s_{11}</math> / Rohdichte; unten links: Elastizitätszahl <math>s_{22}</math> / Rohdichte; unten rechts: Elastizitätszahl <math>s_{33}</math> / Rohdichte.....</i>	94
<b>Abbildung 4-22:</b>	<i>Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl <math>s_{12}</math> / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl <math>s_{21}</math> / Rohdichte.....</i>	94
<b>Abbildung 4-23:</b>	<i>Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl <math>s_{23}</math> / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl <math>s_{32}</math> / Rohdichte.....</i>	95
<b>Abbildung 4-24:</b>	<i>Streudiagramme Elastizitätszahlen; links: Elastizitätszahl <math>s_{13}</math> / Rohdichte; rechts: Elastizitätszahl <math>s_{31}</math> / Rohdichte.....</i>	95
<b>Abbildung 4-25:</b>	<i>Boxplot-Gegenüberstellung von Zug- und Druckversuch; links: E-Modul <math>E_T</math>; Mitte: Querdehnzahl <math>\nu_{TR}</math>; rechts: Querdehnzahl <math>\nu_{TL}</math>.....</i>	96

<b>Abbildung 4-26:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie TL; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	97
<b>Abbildung 4-27:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie TR; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	99
<b>Abbildung 4-28:</b>	Boxplot-Vergleich der Zug- und Druckprüfungen in Längsrichtung; links: E-Modul ( $E_L$ aller Längsversuche); Mitte: Querdehnzahlen $\nu_{LT}$ ; rechts: Querdehnzahlen $\nu_{LR}$ .....	100
<b>Abbildung 4-29:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie LT; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	101
<b>Abbildung 4-30:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie LR; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	102
<b>Abbildung 4-31:</b>	Boxplot-Gegenüberstellung von Zug- und Druckversuch; links: E-Modul $E_R$ ; Mitte: Querdehnzahl $\nu_{RT}$ ; rechts: Querdehnzahl $\nu_{RL}$ .....	103
<b>Abbildung 4-32:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie RT; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	104
<b>Abbildung 4-33:</b>	Zug- / Druckvergleich der Prüfserie RL; oben: Vergleich der E-Moduln; unten: Vergleich der Querdehnzahlen.....	105

### A-3 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2-1:</b>	Übersicht der chemischen Bestandteile des Holzes [7].....	5
<b>Tabelle 2-2:</b>	Übersicht Holzgewebe und Holzzellen .....	7
<b>Tabelle 2-3:</b>	Übersicht der Zellarten und deren Funktion des Nadelholzes [11] .....	9
<b>Tabelle 2-4:</b>	Gegenüberstellung von Festigkeitswerten von Kleinproben und Proben in Bauteilgröße [25, 26] .....	23
<b>Tabelle 2-5:</b>	Zusammenfassung der Literaturwerte laut Autoren, Rohdichte- und Feuchtwerte sind Mittelwerte; Zum Vergleich mit den eigenen Messungen sind in der Zeile „Mittelwert“ die Mittelwerte der hier angeführten Literaturwerte abgebildet.....	26
<b>Tabelle 3-1:</b>	Übersicht Prüfprogramm .....	42
<b>Tabelle 3-2:</b>	Übersicht der verwendeten Materialkennwerte nach Niemz [50].....	43
<b>Tabelle 3-3:</b>	Rohdichte, E-Modul und Zugfestigkeit von merkmalfreien Fichtenholz in Abhängigkeit der Schnittrichtung, nach Niemz [50].....	51
<b>Tabelle 4-1:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche TR; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	69
<b>Tabelle 4-2:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche TL; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	73
<b>Tabelle 4-3:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche LT; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	77
<b>Tabelle 4-4:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche LR; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	80
<b>Tabelle 4-5:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche RL; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	83
<b>Tabelle 4-6:</b>	Zusammenfassende Übersicht der statistischen Auswertung der Zugversuche RT; oben links: Jahrringgruppe $a_w = 2$ mm; oben rechts: Jahrringgruppe $a_w = 4$ mm; unten links: Jahrringgruppe $a_w = 6$ mm; unten rechts: alle Jahrringgruppen .....	86
<b>Tabelle 4-7:</b>	Gegenüberstellung der Literatur E-Moduln (Mittelwert aller Literaturwerte (vgl. Tabelle 2-5) mit den eigenen Messungen.....	88

<b>Tabelle 4-8:</b>	<i>Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüfserien TL und TR .....</i>	<i>96</i>
<b>Tabelle 4-9:</b>	<i>Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüfserien LT und LR .....</i>	<i>100</i>
<b>Tabelle 4-10:</b>	<i>Vergleich der statistischen Kennwerte zwischen Druck- und Zugversuch der Prüfserien RT und RL .....</i>	<i>103</i>
<b>Tabelle 5-1:</b>	<i>Zusammenfassung der Mittelwerte der gemessenen Ergebnisse, getrennt nach Jahrringgruppen und für die Gesamtheit; die Klammerausdrücke stellen den Variationskoeffizienten dar .....</i>	<i>107</i>
<b>Tab. B-1:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>VIII</i>
<b>Tab. B-2:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>IX</i>
<b>Tab. B-3:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>X</i>
<b>Tab. B-4:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>XI</i>
<b>Tab. B-5:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>XII</i>
<b>Tab. B-6:</b>	<i>Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt .....</i>	<i>XIII</i>
<b>Tab. B-7:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie TR .....</i>	<i>XIV</i>
<b>Tab. B-8:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie TL .....</i>	<i>XIV</i>
<b>Tab. B-9:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie LR .....</i>	<i>XV</i>
<b>Tab. B-10:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie LT .....</i>	<i>XV</i>
<b>Tab. B-11:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie RT .....</i>	<i>XVI</i>
<b>Tab. B-12:</b>	<i>Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfserie RL .....</i>	<i>XVI</i>

## ANHANG B EINZELERGEBNISSE

### B-1 Ergebnisse aus den Zugversuchen

#### B-1.1 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR

*Tab. B-1: Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TR, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt*

Bezeichnung		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl [-]
TR	<del>_2_08</del>	447	481	<del>0,280</del>
TR	_2_09	423	516	0,407
TR	_2_10	471	549	0,567
TR	_2_12	483	571	0,442
TR	_2_24	550	605	0,552
TR	_2_29	426	409	0,393
TR	_2_30	426	465	0,401
TR	_2_31	404	404	0,439
TR	_4_04	433	361	0,395
TR	_4_06	435	371	0,467
TR	_4_13	412	379	0,385
TR	_4_17	387	393	0,455
TR	_4_23	438	486	0,506
TR	_4_24	379	476	0,441
TR	_4_28	374	304	0,315
TR	_4_34	445	383	0,397
TR	_6_05	406	344	0,358
TR	_6_08	403	440	0,360
TR	_6_09	355	380	0,333
TR	_6_10	394	385	0,439
TR	_6_13	432	399	0,469
TR	_6_14	424	485	0,324
TR	_6_23	393	344	0,45
TR	_6_26	397	396	0,428

## B-1.2 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL

**Tab. B-2:** *Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung TL, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt*

Bezeichnung		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl [-]
TL	_2_08	447	707	0,339
TL	_2_09	423	592	0,12
TL	_2_10	471	548	0,05
TL	_2_12	483	910	0,256
TL	_2_24	550	1152	0,248
TL	_2_29	426	576	0,133
TL	_2_30	426	494	0,134
TL	_2_31	404	675	0,092
TL	_4_04	433	476	0,029
TL	_4_06	435	447	0,152
TL	_4_13	412	550	0,207
TL	_4_17	387	483	0,032
TL	_4_23	438	519	0,085
TL	_4_24	379	<del>321</del>	0,023
TL	_4_28	374	489	0,104
TL	_4_34	445	438	0,06
TL	_6_05	406	<del>875</del>	0,129
TL	_6_08	403	478	0,1
TL	_6_09	355	398	<del>0,027</del>
TL	_6_10	394	417	0,109
TL	_6_13	432	476	0,142
TL	_6_14	424	485	0,092
TL	_6_23	393	468	0,066
TL	_6_26	397	599	0,223

### B-1.3 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT

**Tab. B-3:** Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LT, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt

Bezeichnung		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl [-]
LT	_2_08	418	11938	0,476
LT	_2_09	442	12144	0,506
LT	_2_10	462	15924	0,496
LT	_2_12	473	8963 <sup>1)</sup>	<del>0,076<sup>3)</sup></del>
LT	_2_24	558	24521	0,510
LT	_2_29	437	13297	0,404
LT	_2_30	442	20137	1,470
LT	_2_31	417	19541	0,707
LT	_4_04	414	<del>30255</del>	<del>1,644</del>
LT	_4_06	424	15170	0,424
LT	_4_13	434	16769	0,508
LT	_4_17	393	11374	0,334
LT	_4_23	465	11993	0,666
LT	_4_24	369	11159	0,413
LT	_4_28	356	12170	0,524
LT	_4_34	464	9509	0,813
LT	_6_05	403	12570	0,573
LT	_6_08	395	11234	0,410
LT	_6_09	353	9935	0,248
LT	_6_10	397	9087	0,509
LT	_6_13	421	9504 <sup>2)</sup>	<del>0,045<sup>3)</sup></del>
LT	_6_14	416	12577	0,186
LT	_6_23	414	13741	<del>1,194</del>
LT	_6_26	398	11833	0,365
<sup>1)</sup> E-Modul nur von der Tullner-Messung <sup>2)</sup> E-Modul nur von der Wiener-Messung <sup>3)</sup> Diese Messdaten aus den Messungen wurden schon vor der stat. Auswertung aufgrund Plausibilität verworfen				

## B-1.4 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR

**Tab. B-4:** *Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung LR, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt*

Bezeichnung		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl [-]
LR	_2_08	418	11638	0,378
LR	_2_09	442	12790	0,494
LR	_2_10	462	17367	0,418
LR	_2_12	473	15417	0,268
LR	_2_24	558	33625	1,158
LR	_2_29	437	23929	0,975
LR	_2_30	442	12018	0,484
LR	_2_31	417	15932	0,304
LR	_4_04	414	22528	0,97
LR	_4_06	424	16075	0,791
LR	_4_13	434	15740	0,484
LR	_4_17	393	9816	0,498
LR	_4_23	465	13347	0,663
LR	_4_24	369	11963	0,487
LR	_4_28	356	13836	0,542
LR	_4_34	464	9168	0,448
LR	_6_05	403	18403	0,793
LR	_6_08	395	10470	0,326
LR	_6_09	353	10248	0,530
LR	_6_10	397	10781	0,661
LR	_6_13	421	16807	0,515
LR	_6_14	416	8492 <sup>1)</sup>	<del>0,174<sup>2)</sup></del>
LR	_6_23	414	12725	0,284
LR	_6_26	398	12548	0,527
1) E-Modul nur von der Tullner-Messung				
2) Diese Messdaten aus den Messungen wurden schon vor der stat. Auswertung aufgrund Plausibilität verworfen				

## B-1.5 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL

**Tab. B-5:** *Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RL, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt*

Bezeichnung		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl [-]
RL	<del>_2_08</del>	448	1595	<del>0,967</del>
RL	_2_09	428	1133	0,257
RL	_2_10	466	1275	0,275
RL	_2_12	466	1114	0,021
RL	_2_24	542	862	0,099
RL	_2_29	400	598	0,064
RL	_2_30	430	693	0,107
RL	_2_31	400	682	0,145
RL	_4_04	433	690	0,133
RL	_4_06	426	658	0,093
RL	_4_13	418	731	0,170
RL	_4_17	402	871	0,143
RL	_4_23	429	909	0,211
RL	_4_24	372	603	0,157
RL	_4_28	364	580	0,056
RL	_4_34	426	607	0,049
RL	_6_05	410	761	0,081
RL	_6_08	400	948	0,076
RL	_6_09	349	723	0,034
RL	_6_10	383	941	0,206
RL	_6_13	406	830	0,101
RL	_6_14	411	510	0,074
RL	_6_23	398	659	0,097
RL	_6_26	393	999	<del>0,413</del>

## B-1.6 Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT

*Tab. B-6: Ergebnisse der Zugversuche der Orientierung RT, eliminierte Daten sind durchgestrichen dargestellt*

<b>Bezeichnung</b>	<b>Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Querdehnzahl [-]</b>
RT _2_08	448	915	0,561
RT _2_09	428	1117	0,659
RT _2_10	466	609	<del>0,300</del>
RT _2_12	466	1048	0,628
RT _2_24	542	796	0,591
RT _2_29	400	572	0,800
RT _2_30	430	648	0,639
RT _2_31	400	626	0,657
RT _4_04	433	701	0,727
RT _4_06	426	681	0,693
RT _4_13	418	736	0,724
RT _4_17	402	824	0,810
RT _4_23	429	824	0,704
RT _4_24	372	605	0,744
RT _4_28	364	599	0,788
RT _4_34	426	438	0,756
RT _6_05	410	776	<del>0,655</del>
RT _6_08	400	999	0,793
RT _6_09	349	691	0,795
RT _6_10	383	697	0,805
RT _6_13	406	693	0,724
RT _6_14	411	488	0,808
RT _6_23	398	558	0,822
RT _6_26	393	750	0,853

## B-2 Ergebnisse aus den Druckversuchen

### B-2.1 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung TR

Tab. B-7: Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfsrie TR

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{T,TR}$		Querdehnzahl $\nu_{TR}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
TR _2_08	447	390	481	0,328	0,280
TR _2_09	423	424	516	0,479	0,407
TR _2_29	426	417	409	0,396	0,393
TR _2_31	404	426	404	0,213	0,439
TR _4_06	435	347	371	0,401	0,467
TR _4_34	445	311	383	0,388	0,397
TR _6_08	403	352	440	0,340	0,360
TR _6_10	394	328	385	0,442	0,439
TR _6_23	393	347	344	0,441	0,450
TR _6_26	397	371	396	0,413	0,428

### B-2.2 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung TL

Tab. B-8: Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfsrie TL

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{T,TL}$		Querdehnzahl $\nu_{TL}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
TL _2_08	447	998	707	0,764	0,339
TL _2_09	423	501	592	0,106	0,120
TL _2_29	426	872	576	0,179	0,133
TL _2_31	404	742	675	0,117	0,092
TL _4_06	435	544	447	0,172	0,152
TL _4_34	445	407	438	0,013	0,060
TL _6_08	403	394	478	0,082	0,100
TL _6_10	394	525	417	0,189	0,109
TL _6_23	393	441	468	0,051	0,066
TL _6_26	397	725	599	0,232	0,223

### B-2.3 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung LR

**Tab. B-9:** *Einzelergbnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prfserie LR*

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{L,LR}$		Querdehnzahl $\nu_{LR}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
LR _2_08	418	13636	11638	0,507	0,378
LR _2_09	442	12728	12790	0,373	0,494
LR _2_29	437	13556	23929	0,281	0,975
LR _2_31	417	15523	15932	0,214	0,304
LR _4_06	424	11668	16075	0,441	0,791
LR _4_34	464	9826	9168	0,476	0,448
LR _6_09	353	10642	10248	0,478	0,530
LR _6_10	397	17431	10781	1,298	0,661
LR _6_23	414	8138	12725	0,907	0,284
LR _6_26	398	11480	12548	0,369	0,527

### B-2.4 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung LT

**Tab. B-10:** *Einzelergbnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prfserie LT*

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{L,LT}$		Querdehnzahl $\nu_{LT}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
LT _2_08	418	18951	11938	0,818	0,476
LT _2_09	442	12692	12144	0,430	0,506
LT _2_29	437	13154	13297	0,461	0,404
LT _2_31	417	16233	19541	0,370	0,707
LT _4_06	424	12288	15170	0,126	0,424
LT _4_34	464	9868	9509	0,696	0,813
LT _6_09	353	11070	9935	0,220	0,248
LT _6_10	397	10018	9087	0,518	0,509
LT _6_23	414	8115	13741	0,219	1,194
LT _6_26	398	12058	11833	0,343	0,365

## B-2.5 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung RT

**Tab. B-11:** Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfsrie RT

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{R,RT}$		Querdehnzahl $\nu_{RT}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
RT _2_08	448	1302	915	0,924	0,561
RT _2_09	428	955	1117	0,607	0,659
RT _2_29	400	560	572	0,620	0,800
RT _2_31	400	604	626	0,657	0,657
RT _4_06	426	684	681	0,643	0,693
RT _4_34	426	378	438	0,675	0,756
RT _6_09	349	563	691	0,677	0,795
RT _6_10	383	559	697	0,645	0,805
RT _6_23	398	534	558	0,749	0,822
RT _6_26	393	714	750	0,716	0,853

## B-2.6 Ergebnisse der Druckversuche der Orientierung RL

**Tab. B-12:** Einzelergebnisse aus den Druck- und Zugversuchen der Prüfsrie RL

Bezeichnung	Rohdichte	E-Modul $E_{L,LR}$		Querdehnzahl $\nu_{LR}$	
		Druck	Zug	Druck	Zug
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]
RL _2_08	448	1101	1595	0,537	0,967
RL _2_09	428	966	1133	0,269	0,257
RL _2_29	400	577	598	0,051	0,064
RL _2_31	400	730	682	0,182	0,145
RL _4_06	426	674	658	0,089	0,093
RL _4_34	426	722	607	0,028	0,049
RL _6_09	349	893	723	0,120	0,034
RL _6_10	383	1036	941	0,408	0,206
RL _6_23	398	664	659	0,076	0,097
RL _6_26	393	1160	999	0,599	0,413

Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl