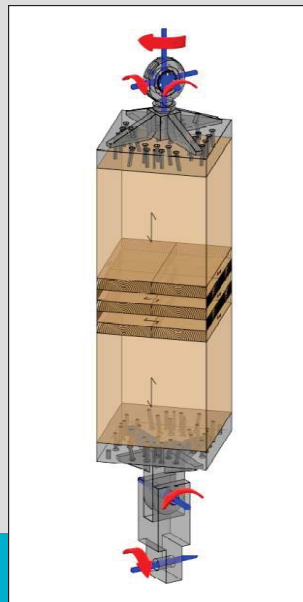


# Querzugkenngrößen von Brettsperrholz (BSP)

M-4-03/2020



**Lukas Jantscher, BSc BSc**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Lukas Jantscher, BSc BSc

# Querzugkenngrößen von Brettsperrholz (BSP)

## MASTERARBEIT

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

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Assoc.Prof. DI(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
DI Severin Zimmer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, März 2020





*... die Seele der Bäume lebt im Holz weiter!*

Ethymios Warlamis



## **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

An dieser Stelle möchte ich mich bei all meinen „Holzweg“-Begleitern bedanken. Vorweg danke ich dem großartigen Team des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz für den fachlichen Input.

Namentlich möchte ich Univ.-Prof. Gerhard Schickhofer für die Themenfindung und Ermöglichung der Arbeit erwähnen. Großer Dank gebührt Assoc.Prof. Reinhard Brandner für die unermüdliche fachliche Unterstützung samt menschlichem Feingefühl.

Hrn. DI Severin Zimmer möchte ich für den prüftechnischen Support und die ergänzende Betreuung danken. Hr. Bernd Heissenberger gilt es für den besonderen Erfahrungsschatz in der Werkstätte und an der Prüfmaschine hervorzuheben. Den Mitarbeitern des Labors für konstruktiven Ingenieurbau, insbesondere Uwe Fülöp, sei für die messtechnische Unterstützung gedankt. Für die Beistellung des Prüfmaterials wird die Firma Hasslacher Norica Timber dankend erwähnt.

Danke sagen möchte ich weiters meinem privaten Umfeld für den guten Verbund auch in *flammenden* und *stürmischen* Zeiten. Ich danke meinen Eltern und Geschwistern, die mich stets auf meinem *Weg mit dem Holz* begleitet und unterstützt haben.

Für seelische und moralische Unterstützung sorgten meine Frau Mathea und unser Sohn Moritz, der mit seiner fröhlichen und aufgeweckten Art jeden Tag die Sonne scheinen lässt.



## Kurzfassung

Brettsperrholz ist ein international stark aufstrebendes Holzbauprodukt. Es punktet neben den aktuell brisanten Themen des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit auch in ökonomischen und technischen Belangen. Aufgrund hoch technologisierter Fertigungsprozesse und orthogonaler Schichtung der einzelnen Lagen, mutiert der CO<sub>2</sub> – neutrale und nachwachsende Rohstoff zum maßhaltigen Hochleistungsbaustoff.

Seit der Entwicklung und der Markteinführung in der letzten Dekade des vorigen Jahrhunderts folgten zwei Dezennien intensiver Forschung am Produkt und Weiterentwicklung der Bauweise mit Brettsperrholz. Die meisten Festigkeiten und Steifigkeiten konnten bis dato hinreichend untersucht werden, bis auf das Zugverhalten normal zur Plattenebene. Genau hier setzt diese Arbeit an, um die Basis für umfangreiche, systematische Untersuchungen zum Thema Querkzugfestigkeit bei Brettsperrholz zu bilden.

Basierend auf umfangreichen Literaturrecherchen zum Querkzugverhalten von Holz, insbesondere von Brettschichtholz, werden Finite Elemente Analysen für die Findung der Prüfserien durchgeführt. In Anlehnung an Prüfkonfigurationen von Querkzuguntersuchungen bei Brettschichtholz wird eine detaillierte Prüfplanung durchgeführt. Neben der Auswirkung der Schichtanzahl auf die Querkzugfestigkeit, wird auch der Einfluss von Systemeffekten, bei der parallelen Belastung mehrerer Lamellen, untersucht. Es wird auch die Auswirkung einer Schichtstärkenvariation auf die Zugkenngrößen quer zur Faser validiert. Ferner werden die Unterschiede zwischen Brettsperrholz und Brettschichtholz bei Querkzugversagen erörtert.

Insgesamt wurden sieben Prüfserien mit in Summe mehr als 160 Prüfkörpern untersucht, um die Forschungsfragen hinreichend beantworten zu können. Aussagekräftige Ergebnisse geben einen Einblick in das Zugverhalten aus der Brettsperrholzebene.





## **Abstract**

Cross laminated timber (CLT) is an internationally emerging engineered wood product. In addition to the current hot topics of environmental protection and sustainability, CLT has also promising characteristics in respect to economic and technical issues. Due to the high-tech manufacturing process and the orthogonal layering of the individual layers, the carbon-neutral and renewable raw material transforms into a dimensionally stable, high-performing building material.

Since the development and market launch in the last decade of the last century, two decades of intensive product research and advancements of the construction methods with cross laminated timber have followed. Meanwhile, most of its strength and stiffness properties are well known except the tensile behaviour perpendicular to the plane direction. At this point this work comes in and forms the basis for extensive, systematic studies on the tensile behaviour perpendicular to the plane of CLT.

Based on an extensive literature study on the tensile behaviour of wood / timber and timber products perpendicular to the grain, with focus on glulam, finite element analyses are carried out to define the test series. These involve also detailed planning of the test configurations for CLT based on available experience with glulam. In addition to the effect of the number of layers on the tensile properties perpendicular to the plane, also the influence of system effects, as consequence of parallel stressed lamellas, is examined. The influence of a layer thickness variation on the tensile properties out of the plane is also validated. Regarding these properties, finally, differences between cross laminated timber and glulam are discussed.

A total of seven test series with overall more than 160 test specimens are examined in order to be able to adequately answer these research questions. The results provide an insight into the tension behaviour out of the plane of cross laminated timber.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1-1 HOLZ ALS MODERNER BAU- UND WERKSTOFF .....	1
1-1.1 Wald und Holz in Österreich .....	1
1-1.1.1 Lebensgrundlage und aktiver Klimaschutz .....	1
1-1.2 Rohstoff Holz .....	2
1-1.3 Mechanische Eigenschaften des Holzes .....	6
1-1.3.1 Elastische Eigenschaften .....	6
1-1.3.2 Festigkeitseigenschaften .....	8
1-1.4 Holz als Werkstoff .....	9
1-1.5 Brettsperrholz (BSP) .....	10
1-2 PROBLEMSTELLUNG .....	11
1-2.1 Gekrümmtes Brettsperrholz .....	13
1-3 STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS .....	14
1-3.1 Einflüsse auf die Querzeigeneigenschaften .....	14
1-3.1.1 clear-wood .....	14
1-3.1.2 Vollholz (Holz in Bauteilgröße) .....	17
1-3.1.3 Brettschichtholz .....	22
1-3.1.4 Brettsperrholz .....	26
1-3.2 Versagensarten .....	27
1-3.2.1 Interfacebruch .....	27
1-3.2.2 Lamellenbruch .....	28
1-3.3 Bisherige Untersuchungen .....	29
1-3.4 Forschungsfragen .....	31
<b>KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>32</b>
2-1 FINITE ELEMENTE MODELL UND SERIENDEFINITION .....	32
2-1.1 Eingangparameter .....	32
2-1.1.1 Koordinatensystem .....	32
2-1.1.2 Belastung und Modellierung .....	33
2-1.1.3 Materialparameter .....	33
2-1.1.4 Implementierung .....	34
2-1.2 Variation des Lasteinleitungsblockes .....	35
2-1.2.1 Lasteinleitungsblock Fichte GL24h .....	35
2-1.2.2 Lasteinleitungsblock Buche GL75 .....	35
2-1.2.3 Lasteinleitungsblock Stahl .....	35
2-1.2.4 Auswertung .....	36
2-1.3 Einfluss orthogonaler Schichtung .....	37
2-1.4 Variation der Schichtaufbauten .....	38

2-1.5	Änderung des Probenvolumens .....	40
2-1.6	Defintion der Prüfserien.....	41
2-2	PRÜFPLANUNG .....	42
2-2.1	Prüfkonfiguration für Querschnitt 150 <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> .....	42
2-2.2	Prüfkonfiguration 300 <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> .....	43
2-2.2.1	Werkplanung der Lasteinleitungsplatten 300 <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> .....	44
2-2.3	Prüfkörperassembling .....	48
2-2.3.1	Serie 1 (1s).....	49
2-2.3.2	Serie 2 (5sGL).....	49
2-2.3.3	Serie 3 (3sCL).....	49
2-2.3.4	Serie 4 (5sCL).....	50
2-2.3.5	Serie 5 (7sCL).....	50
2-2.3.6	Serie 6 (5sCL300 <sup>2</sup> ).....	51
2-2.3.7	Serie 7 (5sVL).....	51
2-3	PRODUKTION DER PRÜFKÖRPER.....	52
2-3.1	Vorbereitung der Rohware.....	52
2-3.1.1	Vorbereiten der Lasteinleitungsblöcke .....	53
2-3.2	Vorbereitung für die Verklebung.....	53
2-3.2.1	Aufnahme der Materialparameter .....	54
2-3.2.2	„Assembling“ .....	55
2-3.3	Verklebung & Formatierung.....	55
2-3.4	Aufkleben der Lasteinleitungsblöcke .....	56
2-3.4.1	Serie 6 (5sCL300 <sup>2</sup> ).....	57
2-4	DÜRCHFÜHRUNG DER PRÜFUNGEN .....	58
2-4.1	Prüftechnik.....	58
2-4.1.1	Messtechnik .....	58
2-4.2	Prüfkörpereinbau.....	60
2-4.3	Versuchsablauf.....	61
2-4.4	Datenerfassung.....	62
2-4.5	Holzfeuchtigkeit.....	62
2-5	AUSWERTEMETHODIK .....	63
2-5.1	Ermittlung von Kenngrößen .....	63
2-5.1.1	Querzugfestigkeit $f_{t,90}$ .....	63
2-5.1.2	Querzug-E-Modul $E_{t,90}$ .....	64
2-5.1.3	Rohdichte .....	65
2-5.2	Korrekturen .....	66
2-5.2.1	Eigengewicht .....	66
2-5.2.2	Rohdichte .....	67
2-5.3	Teilversagen.....	67

2-5.4	Prüfkörperselektion .....	68
2-5.5	statistische Verteilung der Daten .....	69
2-5.5.1	Log-Normalverteilung .....	69
2-5.5.2	Weibull-Verteilung .....	69
2-5.5.3	Schätzung der Parameter .....	70
2-5.6	Korrelation.....	71
2-5.7	Subserienanalyse .....	71
2-5.8	Berechnung charakteristischer Werte .....	72
2-6	VERSAGENSARTEN .....	73
2-6.1	Interfacebrüche .....	73
2-6.1.1	Interfacebruch Lasteinleitung (IFL) .....	73
2-6.1.2	Interfacebruch im Prüfkörper (IFP) .....	74
2-6.1.3	Mischbruch Lasteinleitung (MBL).....	74
2-6.2	Lamellenbrüche .....	75
2-6.2.1	W-Bruch (WB).....	75
2-6.2.2	Jahrringbruch (JB).....	75
2-6.2.3	Markröhrenbruch (MR) .....	76
2-6.2.4	Mischbruch Prüfkörper (MBP).....	76
2-6.3	Klebstoffversagen Lasteinleitung (KV).....	77
	<b>KAPITEL 3: ERGEBNISSE .....</b>	<b>78</b>
3-1	EMPIRISCHE VERTEILUNGSFUNKTIONEN .....	78
3-2	MATERIALKENNWERTE.....	80
3-2.1	Querzugfestigkeit .....	80
3-2.2	Querzug-E-Modul.....	81
3-2.3	Rohdichte.....	82
3-3	SUBSERIENANALYSE.....	84
3-3.1	Querzugfestigkeit .....	84
3-3.2	Querzug-E-Modul.....	85
3-3.3	Rohdichte.....	86
3-3.4	Equikorrelation.....	88
3-4	REGRESSIONSANALYSE.....	89
3-5	TEILVERSAGEN .....	89
3-6	VOLUMENEFFEKT .....	90
3-7	BEOBACHTUNGEN.....	91
	<b>KAPITEL 4: DISKUSSION &amp; CONCLUSIO .....</b>	<b>92</b>
4-1	DISKUSSION .....	92
4-1.1	Grösseneffekte .....	92
4-1.2	Vergleich mit Bidakov [42].....	95
4-1.3	Brettsperrholz vs. Brettschichtholz.....	96

4-1.4	charakteristische Kennwerte .....	98
4-2	CONCLUSIO.....	99
4-3	AUSBLICK .....	100
<b>ANHANG A</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>I</b>
<b>ANHANG B</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>V</b>
B-1	FEM AUSWERTUNGEN .....	V
B-1.1	Variation der Schichtaufbauten.....	V
B-2	EMPIRISCHE VERTEILUNGSFUNKTIONEN.....	VII
B-3	KRAFT-VERFORMUNGSKURVEN .....	X
B-4	PRÜFKÖRPERSELEKTION.....	XVIII
B-4.1	Serie 3 (3sCL).....	XVIII
B-4.2	Serie 5(7sCL).....	XIX
B-4.3	Serie 6 (5sCL300 <sup>2</sup> ).....	XX
B-4.4	Serie 7 (5sVL).....	XXI
B-5	SUBSERIENANALYSE .....	XXIII
B-6	REGRESSIONSANALYSE .....	XXV
B-7	EINZELAUSWERTUNGEN .....	XXVII
<b>ANHANG C</b>	<b>DIVERSE ANDERE ANHÄNGE .....</b>	<b>XXXI</b>
C-1.1	Schraubenbemessung.....	XXXI
C-1.2	Sortierpläne .....	XXXII
<b>ANHANG D</b>	<b>PLÄNE.....</b>	<b>XXXVII</b>
D-1.1	Zuschnittplan .....	XXXVII
D-1.2	Werkplanung Lasteinleitungsplatte 300 <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> .....	XXXIX
D-1.3	Pläne Prüfserien .....	XLV

# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 HOLZ ALS MODERNER BAU- UND WERKSTOFF

### 1-1.1 WALD UND HOLZ IN ÖSTERREICH

Die Forst- und Holzwirtschaft hat in Österreich eine lange Tradition und gilt als ein bedeutender Wirtschaftsfaktor. Seit mehr als 250 Jahren betreibt Österreich nachhaltige Forstwirtschaft und prägt damit auch den modernen Begriff der Nachhaltigkeit, also nicht mehr Holz zu ernten als zuwächst.

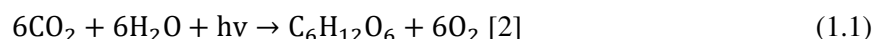
*„Vor genau 160 Jahren ist mit „kaiserlichem Patente“ am 1. Jänner 1853 für die österreichischen Kronländer ein umfassendes Forstgesetz erlassen worden, das den sorgsamem Umgang mit dem Waldbestand regelt.“ [1]*

Der Sektor Wald & Holz erwirtschaftet einen jährlichen Produktionswert von rund 12 Milliarden Euro, dies entspricht rund 4 Prozent des österreichischen Bruttoinlandsprodukts (BIP). Mit einer Exportquote von 70 Prozent ist die Holzwirtschaft nach dem Tourismus der zweitgrößte Aktivposten des österreichischen Außenhandels (vgl. [1]).

Eine aktive und nachhaltige Waldbewirtschaftung gilt als Basis für einen gesunden, zukunftsfiten Wald. Gesunde Waldbestände stellen neben der *Nutzfunktion* auch die weiteren *Funktionen des Waldes* sicher. Diese sind zum einen die *Schutzfunktion* für Siedlungen und infrastrukturelle Einrichtungen (bebaute Umwelt), indem sie Elementar-(Natur-)gefahren abwehren bzw. ihre Auswirkungen mindern. Des Weiteren filtert ein intakter Wald Wasser und Luft und stellt damit mit der Trinkwasserversorgung und frischem Sauerstoff auch die *Wohlfahrtsfunktion* sicher. Immer größere Bedeutung bekommt die *Erholungsfunktion* in der modernen Gesellschaft.

#### 1-1.1.1 Lebensgrundlage und aktiver Klimaschutz

Betrachtet man die Wohlfahrtsfunktion näher, sieht man, dass Wald mit seiner Fähigkeit Luft zu filtern, einen elementaren Baustein für gegenwärtiges irdisches Dasein darstellt.



Dabei sind:

CO<sub>2</sub> ..... Kohlendioxid  
H<sub>2</sub>O ..... Wasser  
hv ..... Lichtenergie  
C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> . Hexose  
O<sub>2</sub> ..... Sauerstoff

Bäume absorbieren Kohlendioxid mit ihren Blättern aus der Luft und bauen mithilfe von Wasser und Lichtenergie im Prozess der *Photosynthese* Hexose auf, welche die Basis für Holz darstellt. Zusätzlich desorbieren die Blätter lebensnotwendigen Sauerstoff. Durch diesen Vorgang sind Bäume in der Lage, Kohlenstoff aus der Luft im Holz zu speichern. Wird Holz stofflich genutzt, wirkt dies klimaentlastend und senkt die Treibhausgasemissionen des Bausektors, der ein wesentlicher Emittent von Kohlenstoffdioxid ist. 1 m<sup>3</sup> Holz bindet 250 kg Kohlenstoff und entzieht der Atmosphäre dabei ca. 1 t CO<sub>2</sub>. Je länger ein Holzprodukt stofflich genutzt wird, desto länger bleibt die Speicherwirkung aufrecht, denn erst mit der Verbrennung bzw. dem stofflichen Abbau wird wieder der Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid freigegeben (vgl. [3]). Idealerweise passiert dies nach einer kaskadischen Nutzung des Rohstoffes.

## 1-1.2 ROHSTOFF HOLZ

Der Rohstoff Holz ist ein anisotropes, annähernd radial-orthotropes und hierarchisch strukturiertes Material, welches auf unterschiedlichen Skalenebenen zu charakterisieren ist. Mit orthotrop meint man, dass die Materialeigenschaften von den drei Materialhauptrichtungen, nämlich längs, radial und tangential, abhängig sind.

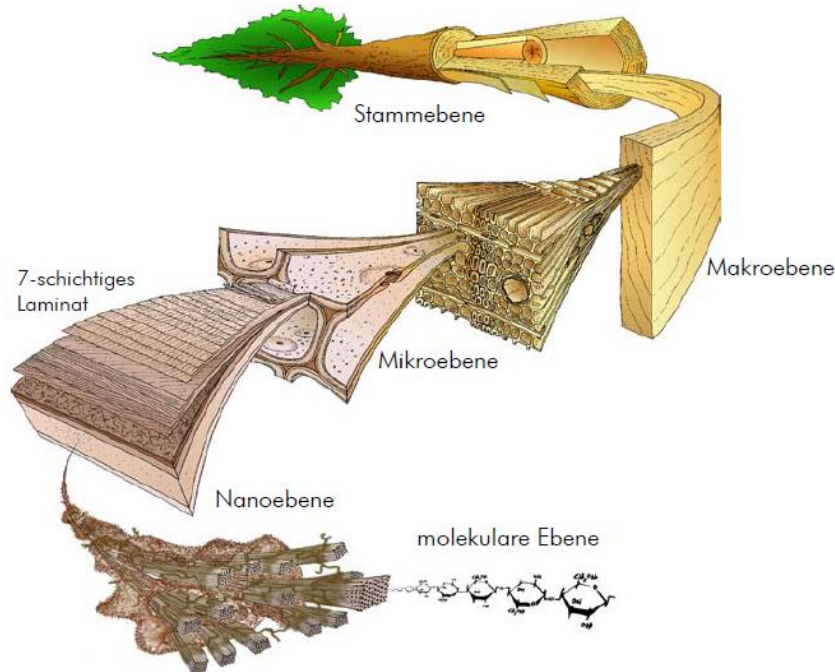


Abbildung 1-1 Strukturebenen des Holzes nach WIMMER [2]

In Abbildung 1-1 sind die verschiedenen Strukturebenen eines Baumstammes illustriert, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

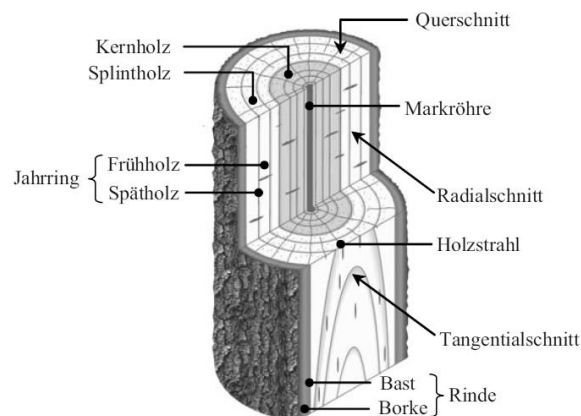


Abbildung 1-2 Stammebene mit Holzschnittrichtungen [4]

Auf *Stammebene* können am Querschnitt mehrere Holzmerkmale (Abbildung 1-2) erkannt werden, die unter anderem auch zur Holzartenbestimmung herangezogen werden können. Neben der Markröhre sind auch Kern- sowie Splintholz zu erkennen. Bei der Markröhre handelt es sich um ein abgestorbenes, parenchymatisches Gewebe, das dem jungen Spross im ersten Lebensjahr die Wasserleitung ermöglicht (vgl. [5]). Die Markröhre zieht sich durch den kompletten Baumstamm und wird jährlich im Zuge des primären Wachstums des Baumes gebildet. Das Kernholz umfasst dabei laut SCHICKHOFER [2] die



inneren Zonen des Stammquerschnittes und enthält keine lebenden Zellen mehr. Somit ist das Kernholz nur noch für die Festigkeit des Stammes und ferner für die Standsicherheit des Baumes von Bedeutung. Das Splintholz umgibt das Kernholz und ist häufig farblich davon zu unterscheiden. Lebende, physiologisch aktive Zellen dienen laut SCHICKHOFER [2] der Wasserleitung. Das Kambium liegt zwischen Splintholz und Rinde und ist für das sekundäre Dickenwachstum verantwortlich. Die Rinde bildet den äußerlichen Abschluss des Stammes und ist mit dem Bast für den Transport der Assimilate von der Krone zu den

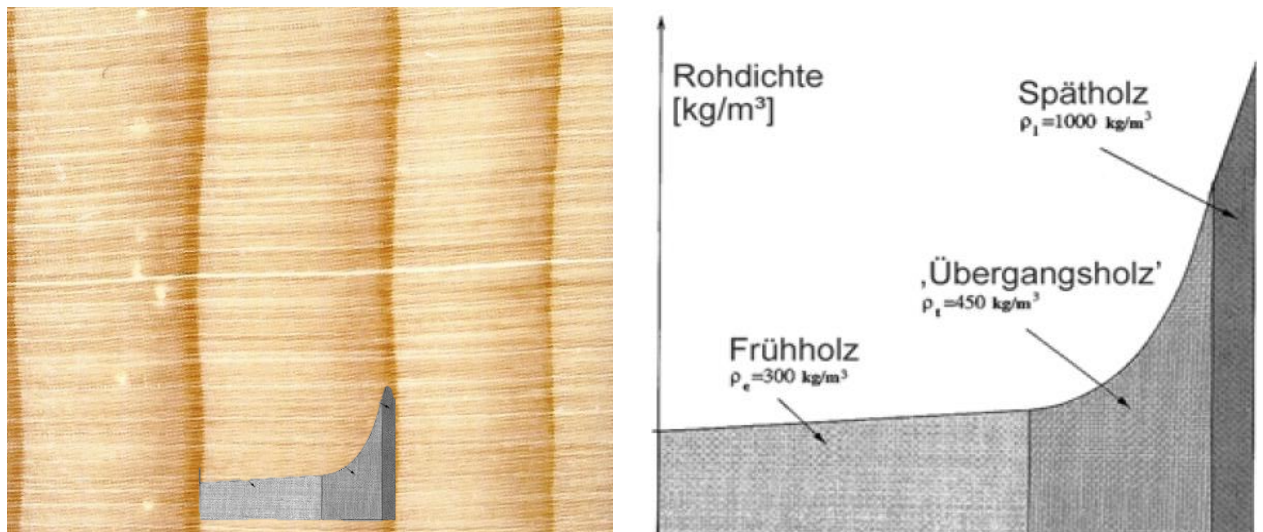
Wurzeln verantwortlich. Des Weiteren gilt es über den Stammquerschnitt zwischen juvenilem und adultem Holz zu unterscheiden. Das juvenile Holz ändert seine Eigenschaften kontinuierlich bis zur 20. Wachstumsperiode, wo es dann in seinen Eigenschaften wesentlich stabilere adulte Holz übergeht. Mit freiem Auge ist das Holz im Stammzentrum lediglich an breiteren Jahrringen und einem geringerem Frühholzanteil vom adulten Holz zu unterscheiden.



**Abbildung 1-3** Änderung der Holzigenschaften vom juvenilen zum adulten Holz nach KRETSCHMANN [2]

Juveniles Holz hat im Vergleich zum adulten Holz unter anderem eine geringere Zelllänge und Zellwanddicke, einen geringeren Cellulose-, aber einen höheren Ligningehalt, einen höheren Mikrofibrillenwinkel, einen geringeren Frühholzanteil und mehr Druckholz. Diese Eigenschaften führen letztendlich zu einer 50 bis 70 % geringeren Steifigkeit und Festigkeit. (vgl. [2])

Die *Makroebene* zeigt neben den Jahrringen auch Holzstrahlen und Harzkanäle und charakterisiert damit die unterschiedlichen Holzarten, wobei auf die Holzstrahlen und die Harzkanäle erst in der Mikroebene eingegangen werden wird.



**Abbildung 1-4** Struktur der gemeinen Fichte (*Picea abies*) im Querschnitt [6] (links: Makroaufnahme Jahrringe [6] mit Rohdichteprofil; rechts: Rohdichteprofil eines Jahrringes [2])

Ein Jahrring widerspiegelt eine Wachstumsperiode, wobei sich in der gemäßigten Zone die Vegetationszeit, je nach Höhenlage, etwa von April bis September, erstreckt. Die Jahrringbreiten sind von verschiedenen wuchsbedingten Faktoren, wie Nährstoff- und Wasserversorgung, Lichtverhältnisse im Bestand, Höhenlage und nicht zuletzt von der Genetik abhängig.

Bei Nadelhölzern ist die Jahrringbreite hauptsächlich von der Ausprägung des Frühholzes abhängig. Das Spätholz hat eine relativ konstante Breite und in etwa eine Rohdichte von  $1.000 \text{ kg/m}^3$ , während das Xylem im Frühjahr nur in etwa  $300 \text{ kg/m}^3$  aufweist. Das Spätholz kann bei gleicher Breite im „Verbundquerschnitt“-Jahrring, aufgrund seiner höheren Dichte und der damit verbundenen Zellstruktur (siehe Abbildung 1-5), rund dreimal so hohe Belastungen aufnehmen wie der Frühholzbereich und bildet somit die Tragstruktur des Baumes (vgl. [2]). Dabei sollte man aber zwischen verschiedenen Belastungsrichtungen differenzieren. Den größten Einfluss hat dieser Effekt bei Belastungen in Faserrichtung, den geringsten hingegen bei Zugbelastungen in radialer Richtung. Bei reinem Querszug, bei fehlerfreiem Holz und ohne Einfluss der Jahrringkrümmung, hat dieser Sachverhalt faktisch keinen Einfluss, da das Versagen im Übergangsbereich Spätholz-Frühholz eintritt.

In der *Mikroebene* betrachtet man verschiedene Zellarten, sowie den anatomischen Aufbau von Holz. Dabei gibt es grundlegende Unterschiede zwischen Gymnospermen und Angiospermen, sprich nacktsamigen und bedecktsamigen Holzarten. In dieser Arbeit soll sinngemäß nur auf nacktsamige Nadelhölzer (Koniferen) eingegangen werden.

Die orthotrope Eigenschaft von Holz in der Stamm- und der Makroebene basiert auf anatomischen Eigenschaften in der mikroskopischen Ebene. Daher wird nun die Nadelholzstruktur in der Mikroebene näher beleuchtet.

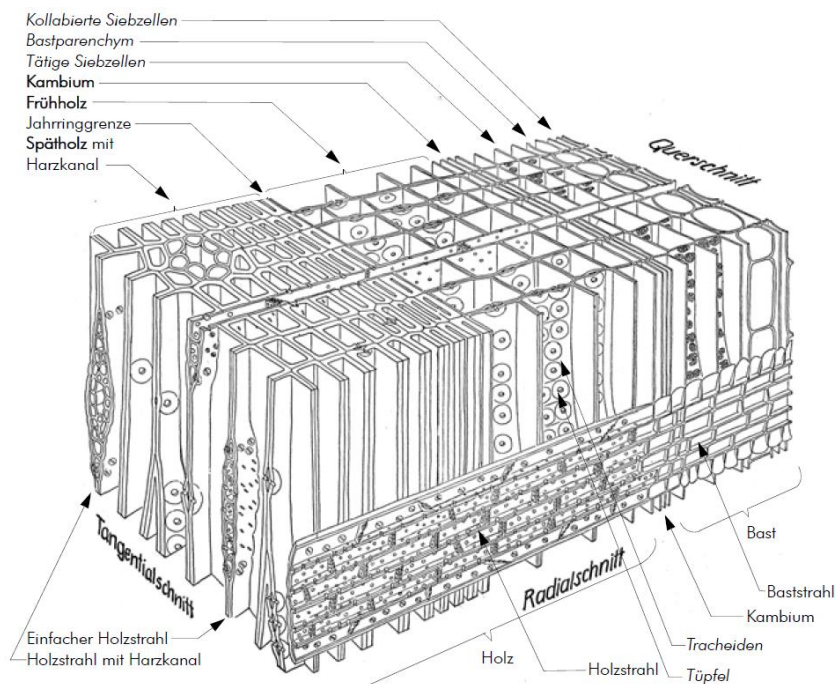


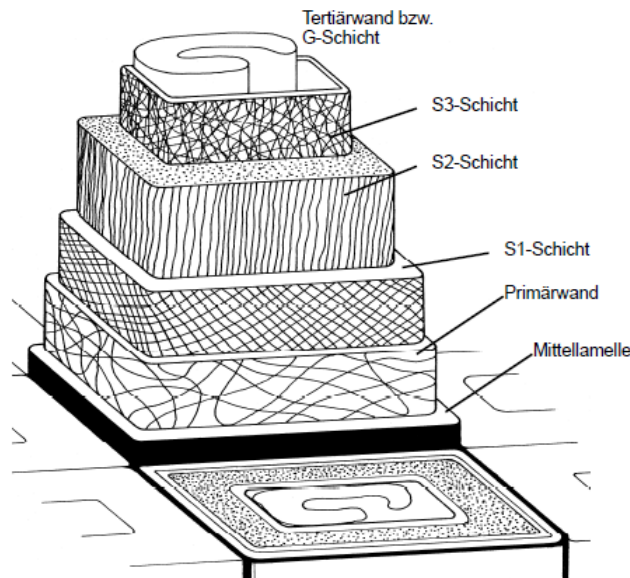
Abbildung 1-5 *Holzanatomie von Nadelhölzern auf Mikroebene nach MÄGDEFRAU [2]*

Das Dauergewebe von Nadelhölzern in Abbildung 1-5 besteht im Wesentlichen aus zwei Zelltypen, nämlich aus Tracheiden und Parenchymzellen. Tracheiden, welche den Hauptbestandteil von Nadelhölzern darstellen, dienen sowohl zur Wasserleitung als auch zur Festigung des Gewebes. Parenchymzellen hingegen dienen vorwiegend zur Speicherspeicherung. Tracheiden sind vorwiegend axial ausgerichtet und werden in der gemäßigten Klimazone im Zuge des sekundären Dickenwachstums jährlich von der Wachstumsschicht, dem Kambium, gebildet. Das Erscheinungsbild der Zellen ändert sich innerhalb einer Wachstumsperiode, wobei die Lumina vom Frühholz zum Spätholz hin abnehmen, während die Zellwanddicken zunehmen. Das Frühholz ist dadurch in der Lage viel Wasser von den Wurzeln in die Krone zu transportieren, wo es zur Bildung der neuen Triebe („Maitriebe“) benötigt wird. Das Spätholz dient überwiegend der Festigkeit und Stabilität des Baumes. Radial verlaufende parenchymatische Zellstränge werden als Holzstrahlen bezeichnet und dienen zur Leitung von Nährstoffen in horizontaler Richtung sowie Speicherung von Reservestoffen (vgl. [5]). Tüpfel stellen Öffnungen in den Zellwänden dar, und verbinden die einzelnen Zellen miteinander.

Neben den bereits erwähnten Tracheiden und Parenchymzellen gibt es auch Epithelzellen, die für die Harzausscheidung verantwortlich sind. Harzkanäle stellen ein Charakteristikum unter anderem der Familie der Kieferngewächse (*Pinaceae*), zu der auch die Gattung der Fichten (*Picea*) gehört, dar. Anhand dieser Harzkanäle wird der Transport von Harz entlang der Stammachse sichergestellt.

Zur vertieften Betrachtung der Holzanatomie und für die Unterschiede zu den Laubhölzern wird auf einschlägige Fachliteratur, z.B. WAGENFÜHR – Anatomie des Holzes; WAGENFÜHR – Holzatlas usw. verwiesen.

Auf der *Nanoebene* wird im Speziellen der Zellaufbau und der Verbund der Zellen miteinander betrachtet.



**Abbildung 1-6** Zellwandmodell [7]

Wie in Abbildung 1-6 zu sehen ist, besteht eine Zellwand laut NIEMZ [7] aus den vier Wandschichten Mittellamelle, Primärwand, Sekundärwand und Tertiärwand, die sich konzentrisch um das Lumen anordnen. Dabei verbindet die Mittellamelle zwei angrenzende Nadelholztracheiden miteinander. Die Primärwand ist laut SCHICKHOFER [2] eine sehr dünne Schicht, die direkt an die Mittellamelle anschließt und häufig auch mit ihr gemeinsam als Mittelschicht zusammengefasst wird. Weiters nimmt die Sekundärwand den größten Anteil der Zellwand ein und besitzt einen lamellaren Schichtenbau mit parallel orientierten Fibrillen. Herausragende Bedeutung hat, aufgrund ihrer Dicke, die zentrale Sekundärwand (S2), die mit ihrer Orientierung der Mikrofibrillen (dem Winkel zwischen Cellulosefibrillen und der Längsrichtung der Zelle) einen wesentlichen Einfluss auf die Holzeigenschaften, insbesondere Festigkeit und Steifigkeit, hat.

Aufgrund der Bedeutung für die mechanischen Holzeigenschaften wird noch auf die Anatomie von Sondergewebe im Holz eingegangen. Als Sondergewebe bezeichnet man laut SCHICKHOFER [2] sekundäre Strukturveränderungen des Holzgewebes, wozu neben Reaktionsholz auch Wundholz zählt. Reaktionsholz ist ein aktives Richtgewebe im Baum, mit dem dieser aus der Normalstellung gebrachte Stamm- bzw. Astbereiche durch exzentrisches Dickenwachstum wieder in die gewünschte Lage orientiert. Bei Nadelhölzern passiert dies immer auf der Druckseite (daher Druckholz). Aufgrund höherer Mikrofibrillenwinkel in der zentralen Sekundärschicht (S2) und runderen dickwandigeren Zellen wirkt sich das bei Nadelhölzern mit einer höheren Druckfestigkeit, aber einer niedrigeren Zugfestigkeit und einem geänderten Schwindverhalten aus. Zudem hat das Druckholz eine höhere Rohdichte und ist dadurch härter und spröder.

Für die Betrachtung der *molekularen Ebene* wird wiederum auf einschlägige Fachliteratur, z.B. FENGEL&WEGENER – Wood, oder KOLLMANN – Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe verwiesen.

## 1-1.3 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES HOLZES

Aufgrund der im Kapitel 1-1.2 beschriebenen, ausgeprägt längs-orientierten Struktur von Holz sind die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Elastizitäts- (E-) und Schub- (G-)module in direktem Zusammenhang mit der Belastungsrichtung zu sehen.

*„The two products – wood in the sense of clear defect-free wood and timber, in the sense of commercial timber – have to be considered as two different materials and that must be respected when strength properties are developed for engineering purposes.“* MADSEN in [2]

Damit meint MADSEN, dass man bei der Bestimmung der Festigkeits- (und Steifigkeits-) werte, fehlerfreie Kleinproben und Bauholz als zwei verschiedene Materialien behandeln sollte.

### 1-1.3.1 Elastische Eigenschaften

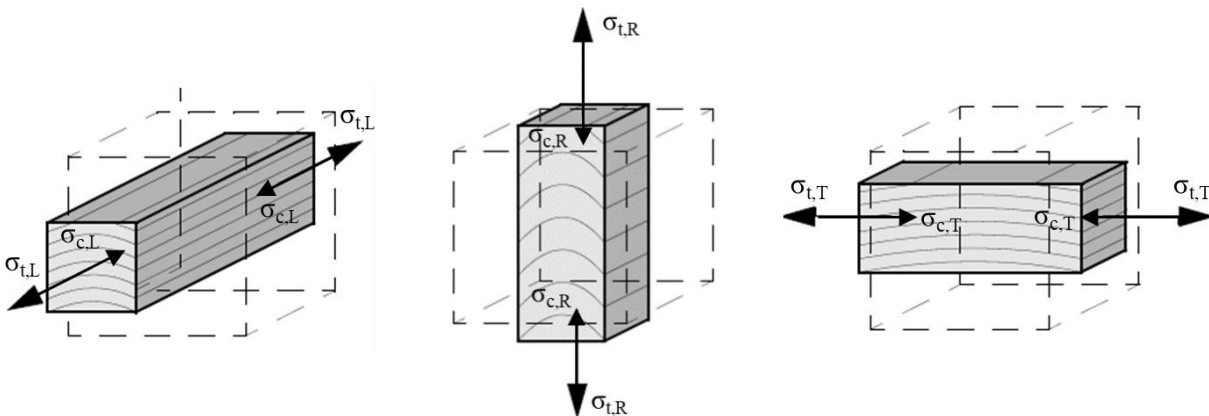


Abbildung 1-7 Normalbeanspruchungen clear-wood (adaptiert aus [2] und [8])  
 (links: longitudinal; mittig: radial; rechts: tangential)

In Abbildung 1-7 sind alle sechs Normalbeanspruchungen bei clear-wood dargestellt. Dabei gilt es zwischen Zug- und Druckbelastungen, in den drei rechtwinklig aufeinander stehenden Koordinatenachsen (orthotrop), zu unterscheiden. Sinngemäß gilt diese Abbildung auch für die dazugehörigen Steifigkeiten ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ ). In Faserrichtung werden aufgrund natürlicher Optimierungsprozesse am Baum die höchsten Festigkeiten und Steifigkeiten erreicht. Die mechanischen Eigenschaften in tangentialer, wie auch radialer Richtung liegen deutlich unter jenen in Faserlängsrichtung. Einen positiven Effekt auf die Zugfestigkeit und den E-Modul in radialer Richtung haben, die unter Kapitel 1-1.2 beschriebenen Holzstrahlen, die als „Querzugarmierung“ betrachtet werden können. Bei tangentialer Belastung gibt es keine Verstärkung anhand von Holzstrahlen, was sich in niedrigeren Festigkeiten und Steifigkeiten auswirkt. Die E-Modulverhältnisse für Nadelhölzer in den orthogonalen Richtungen betragen in etwa  $E_L = 20$ ;  $E_R = 1,7$ ;  $E_T = 1$ . Generell besteht zwischen den elastischen Eigenschaften und den Festigkeiten bei clear-wood ein ausgeprägter, bei Vollholz ein guter Zusammenhang. (ganzer Absatz vgl. [2])

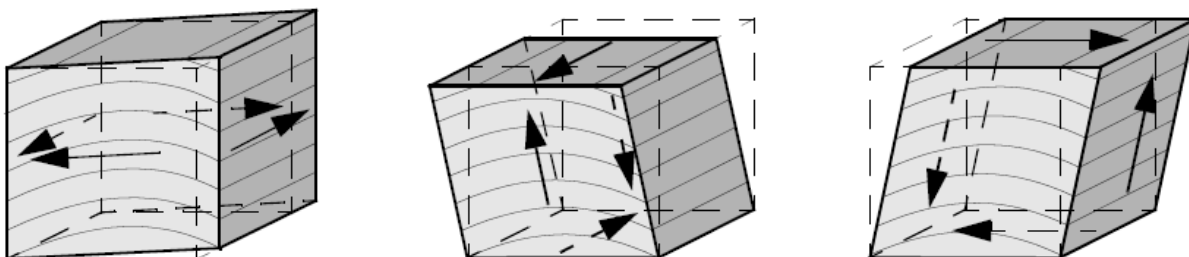


Abbildung 1-8 Schubverzerrungen  
 (links:  $G_{LT}$  &  $G_{TL}$ ; mittig:  $G_{RL}$  &  $G_{LR}$ ; rechts:  $G_{RT}$  &  $G_{TR}$  (Rollschubmodul))

Dieselbe ausgeprägte Richtungsabhängigkeit, wie bei den Festigkeiten und den E-Moduln, tritt auch bei den Schub- (G-)moduln auf. Bei den Schubmoduln ergeben sich die Verhältniszahlen zu  $G_{RL}$  &  $G_{LR} = 10$ :  $G_{LT}$  &  $G_{TL} = 10$ :  $G_{RT}$  &  $G_{TR} = 1$  (vgl. [2]).

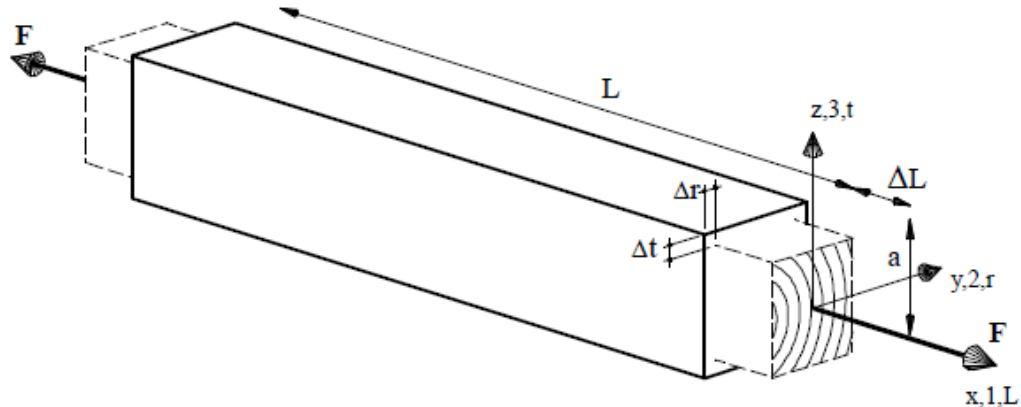


Abbildung 1-9 Querdehnverhalten Holz [9]

Die Querdehnzahl<sup>1</sup>  $\nu_{ij}$  ist laut NIEMZ [10] ein Materialkennwert für die Beschreibung der Querkontraktion bei der Dehnung eines Körpers. Bei Zug oder Druck kommt es demnach zu einer Formänderung in und senkrecht zur Belastungsrichtung.

BOGENSBERGER [9] beschreibt den Zusammenhang der Normalspannungen  $\sigma_{ii}$ , der E-Moduln, der Dehnung  $\epsilon_{ii}$  und der Querdehnzahl  $\nu_{ij}$ , sowie der Gleitung  $\gamma_{ij}$ , den Schub- (G-)moduln und der Schubspannung  $\tau_{ij}$  für orthotropes Material mit folgender Nachgiebigkeitsmatrix:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Dabei ist laut SCHICKHOFER [2] bei der Indizierung der Querdehnzahl  $\nu_{ij}$  zu beachten, dass sich die Indizes an der Lage des Koeffizienten in der Matrix und nicht, wie historisch bedingt, an den Kraft- und Verformungsrichtungen richten. Der erste Index steht demnach für den Querdehnungseffekt in Richtung „i“, der zweite für die Belastung in Richtung der Achse „j“. Zudem gilt es zu beachten, dass die Indizes nicht vertauschbar sind.

Für die vorliegende Matrix gelten laut DANIELSSON [11] drei Symmetriebedingungen:

$$-\frac{\nu_{12}}{E_2} = -\frac{\nu_{21}}{E_1} \quad \text{und} \quad -\frac{\nu_{13}}{E_3} = -\frac{\nu_{31}}{E_1} \quad \text{und} \quad -\frac{\nu_{23}}{E_3} = -\frac{\nu_{32}}{E_2}. \quad (1.2)$$

<sup>1</sup> auch: Poissonzahl, Poisson Konstante, Querkontraktionszahl



Für statische Berechnungen im Holzbau ist lt. SCHICKHOFER et al. [12] eine Unterscheidung der Materialeigenschaften in radialer und tangentialer Richtung nicht zweckmäßig. Außerdem ist bei Holz in Bauteilgröße, aufgrund der vorliegenden Jahrringkrümmung, keine klare Trennung zwischen radialer und tangentialer Richtung möglich. Es kommt daher im Holzbau zu einer transversal isotropen Betrachtungsweise, indem radiale und tangentiale Richtung als „Querrichtung“ zusammengefasst werden.

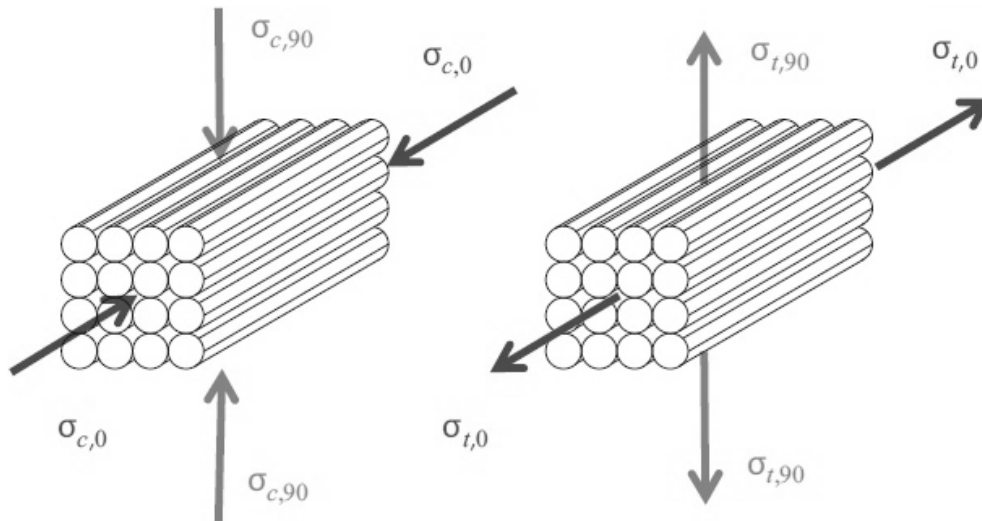


Abbildung 1-10 Holzfaserbündel unter Druck- bzw. Zugbeanspruchung längs und quer zur Faser im Sinne einer vereinfachten transversal-isotropen Betrachtungsweise [8]

### 1-1.3.2 Festigkeitseigenschaften

Wie bei Zug in Faserrichtung, zeigt Holz laut SCHICKHOFER [2] auch bei Querkzugbeanspruchung ein ausgeprägtes sprödes Versagen mit großen Streuungen der Festigkeitskennwerte. Zudem wirken sich festigkeitsbeeinflussende, wachstumsbedingte Merkmale jeglicher Art gravierend auf die Festigkeit aus.

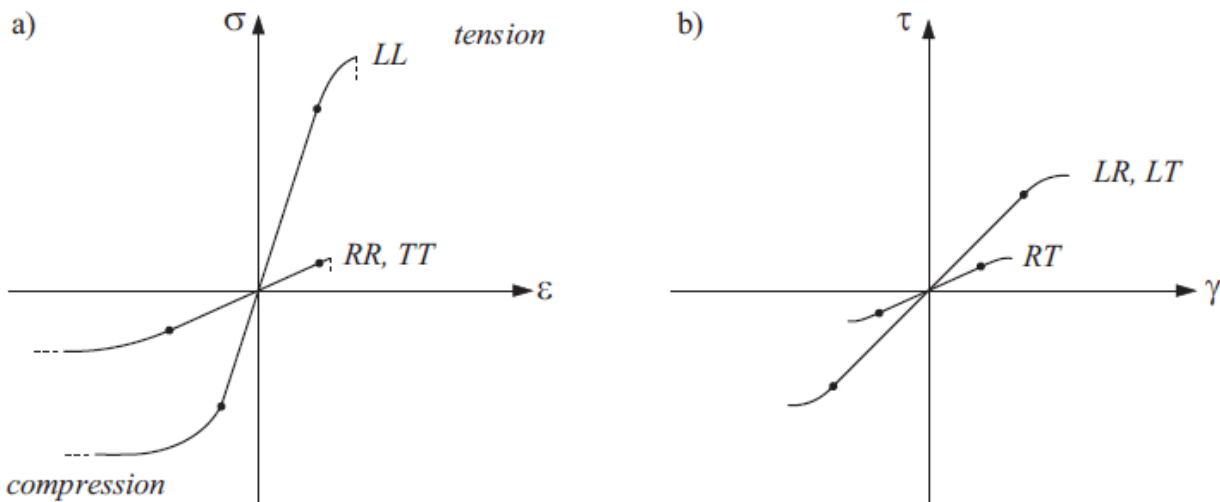


Abbildung 1-11 ideelle Spannungs-Dehnungsdiagramme von Holz [11] (links: Zug/Druck; rechts: Schub)

In Abbildung 1-11-links ist ein ideelles Versagen bei querkzugbeanspruchtem Holz (RR, TT) zu sehen. Es gibt keine Bruchankündigung und das Holz versagt somit beinaheideal spröde. In Abbildung 1-11-rechts ist das Verhalten bei Schubbeanspruchung zu sehen. Dabei erkennt man, dass die Rollschubfestigkeit (RT) deutlich unter der Schubfestigkeit längs zur Faser liegt. Auch beim Schubversagen gibt es, laut EHRHART [8] wie beim Querkzugversagen, quasi keine Duktilität.

## 1-1.4 HOLZ ALS WERKSTOFF

Holzwerkstoffe entstehen laut NIEMZ [7] durch das Zerlegen des Holzes und das anschließende Zusammenfügen der entstandenen Teile in geeigneter Weise, häufig unter Einsatz von Klebstoffen. Neben den Vollholzwerkstoffen, auf die im Speziellen eingegangen wird, wird in der Holzverarbeitenden Industrie auch noch in furnier-, span- und faserbasierte Werkstoffe unterschieden.

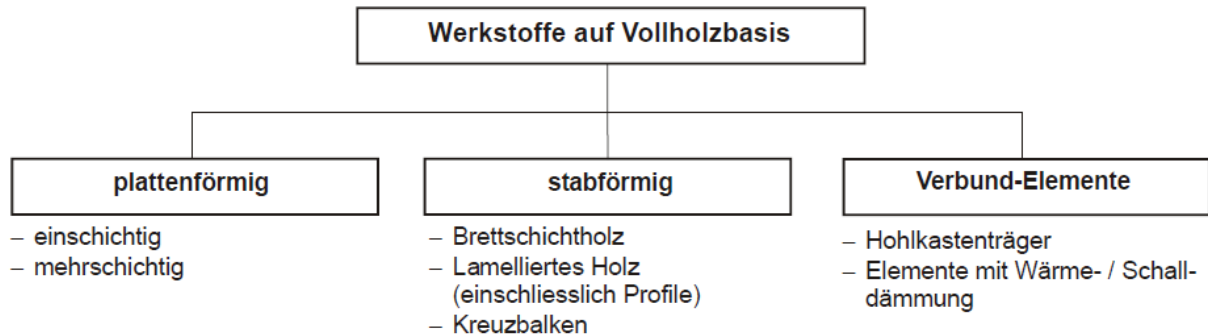


Abbildung 1-12 Einteilung von Werkstoffen auf Vollholzbasis [7]

Bei den Vollholzprodukten unterscheidet man, wie in Abbildung 1-12 dargestellt, in plattenförmige, sowie stabförmige Elemente und in Verbundelemente. Zu den stabförmigen Produkten gehören neben Brettschichtholz und lamelliertem Holz (z.B. Fensterkante) auch Balkenschichtholz (Kreuzbalken). Unter Verbundelement sind neben Hohlkastenträgern auch Rippendecken und gedämmte Elemente zu verstehen.

Bei plattenförmigen Produkten wird in einschichtige und mehrschichtige Bauteile unterschieden, wobei einschichtige Produkte primär dem Möbelbau und der Bautischlerei (insbes. Stiegenbau) vorbehalten bleiben. Einschichtige Platten werden aber immer häufiger auch als Halbprodukte für mehrschichtige Massivholzplatten eingesetzt, da dies immense produktionstechnische Vorteile mit sich bringt. Mehrschichtige Produkte werden sowohl im nichttragenden Bereich, in Form von Dreischicht-Massivholzplatten, als auch für tragende Elemente, in Form von Brettsperrholz (BSP) eingesetzt. Brettsperrholz unterscheidet sich von den Dreischichtplatten primär in den Dimensionen, üblicherweise beträgt die Elementdicke  $> 60$  mm.

Betrachtet man die Entwicklungsgeschichte von Massivholzprodukten in PAULITSCH et.al. [13] sieht man, dass Brettsperrholz einer sehr jungen Entwicklung unterliegt. Schon Anfang des 20. Jahrhunderts gab es mit Hetzer Pioniere im Holzbau, die tragende Holzwerkstoffe entwickelten. Bis zum Ende des Jahrhunderts war man auf den Einsatz von Stäben für sogenannte Stabtragwerke beschränkt, bis mit der Einführung von Brettsperrholz im letzten Dezennium, nun auch zweidimensionale, platten- und scheibenförmige Tragelemente eingesetzt werden konnten und somit auch der Holzmassivbau neu definiert wurde. Traditionell war der Holzmassivbau laut SCHICKHOFER et.al. [14] auf die Stabbauweise (vorwiegend in Skandinavien) und die Blockbauweise (in alpinen Regionen) beschränkt und somit nicht massentauglich.

Durch die intensive und kontinuierliche Forschung und Entwicklung, primär im DACH-Raum, ist man mit dem Produkt Brettsperrholz mittlerweile in der Lage, Holzhochhäuser zu realisieren. Brettschichtholz und Brettsperrholz ergänzen sich im Trag- und Materialverhalten ideal und werden sehr häufig kombiniert eingesetzt.

## 1-1.5 BRETTSPERRHOLZ (BSP)

Brettsperrholz (BSP; engl.: Cross Laminated Timber; CLT)<sup>1</sup> wird aus miteinander kreuzweise verklebten Brettlamellen, schmalseitenverklebten Massivholzplatten bzw. in Kombination dieser mit Holzwerkstoffplatten hergestellt. Dadurch wird das Quellen und Schwinden von Holz zufolge Holzfeuchteänderungen, welches besonders in den Richtungen quer zur Faser (radial und tangential) ausgeprägt ist, in der Fläche dieses Produktes auf nahezu das deutlich geringere Längsquell- bzw. -schwindmaß reduziert (vgl. [13]). Diese Eigenschaft lässt BSP zu einem flächenhaften, maßhaltigen und in der Geometrie flexiblen Hochleistungsbaustoff mutieren. Brettsperrholz kann je nach Hersteller bis zu einer Länge von 24 m und einer Breite von 4 m produziert werden (vgl. [15]), wobei sich transportbedingt die Standardgrößen bei rund 16 m Länge und 3 m Breite bewegen. Je nach statischem Erfordernis kann dieser Holzwerkstoff als Platte, Scheibe als auch als Stab für lastabtragende, raumabschließende Zwecke eingesetzt werden. Die Dicke der Brettsperrholzelemente kann je nach Anforderung, hinsichtlich Statik und Anforderungen der Bauphysik, anhand der Schichtanzahl, Schichtdicke sowie dem Aufbau variieren.

*„Die industrielle Produktion von BSP ermöglicht einen besonders hohen Vorfertigungsgrad bis hin zum Abbund mit bereits eingefrästen Fenster- und Türöffnungen, wobei alle Fertigungsschritte von Anfang an computergesteuert ablaufen und kaum Eingriffe in der Herstellung erfordern.“ [15]*

Dieser hohe Vorfertigungsgrad im Rahmen einer industriellen Produkt- und Elementfertigung lässt schnelle Montagezeiten in situ zu, verlangt aber holzbauspezifisches Know-how in der Planung. *„Holzbaugerecht planen heißt vordenken statt nacharbeiten.“ [16]* Dies führt dazu, dass Gebäude mithilfe digitaler Verfahrenstechniken komplett dreidimensional modelliert werden. Ein funktionierendes CAD<sup>2</sup> Modell ist Grundlage für millimetergenaues Abbinden der Brettsperrholzrohplatten mit CNC<sup>3</sup> Portalbearbeitungszentren. Der Zeitersparnis in der Bauphase steht, laut LATTKE und STIEGLMEIER [17], in aller Regel ein verlängerter Planungsprozess gegenüber. Sie erwähnen weiters, dass der mehrschichtige Aufbau von Holzbauteilen eine integrale Betrachtung sämtlicher Bauteile über alle Schichten nötig macht. Brandschutz, Schallschutz, Feuchte- und Wärmeschutz werden fast immer von Rohbau- und Ausbauelementen gemeinsam geleistet. Die konventionelle, schrittweise und baubegleitende Planung von Rohbau, Fassade und Ausbau funktioniert im Holzbau nicht.

Die hier erörterte Flexibilität im Abbund und in der Geometrie sowie der hohe Vorfertigungsgrad, Argumente des Klimaschutzes (vgl. Kapitel 1-1.1.1) und die behagliche Wirkung von Holz auf den menschlichen Organismus verhelfen dem Brettsperrholz zu einem Höhenflug. Jährliche Produktionssteigerungen jenseits von 10 % bewegen die namhaften, großen Unternehmen zum weiteren Ausbau ihrer Produktionskapazitäten. *„800.000 m<sup>3</sup>/a: Ab 2021 werden drei Unternehmen mehr BSP produzieren als heute die gesamte Branche.“ [18]*



**Abbildung 1-13** **Brettsperrholz**  
 (links: formatierte Rohplatte [19]; rechts: Geschosßbau mit BSP [20])

<sup>1</sup> auch: X-Lam, KLH, Crosslam, BBS u.w.

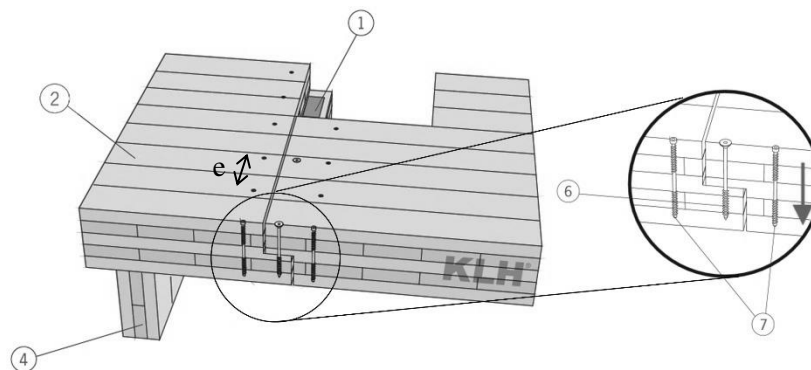
<sup>2</sup> engl.: Computer Aided Design

<sup>3</sup> engl.: Computerized Numerical Control



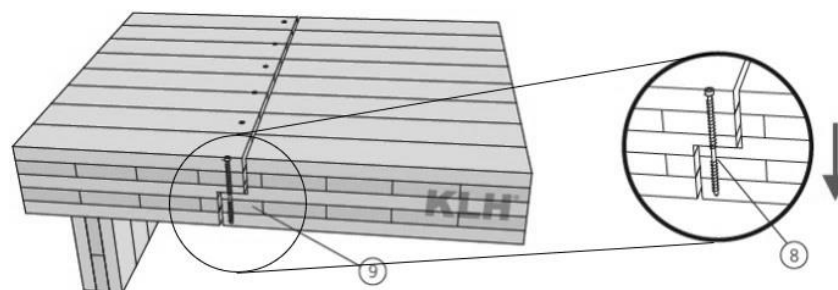
## 1-2 PROBLEMSTELLUNG

Beim Bauen mit Brettsper Holz kommt es vielfach zu Querkzugbeanspruchungen der Platte. Grundsätzlich können Zugspannungen quer zur Faser, lokal in Anschluss- und Auflagerbereichen auftreten oder global bzw. über größere Bereiche bei gekrümmten Brettsper Holzelementen.



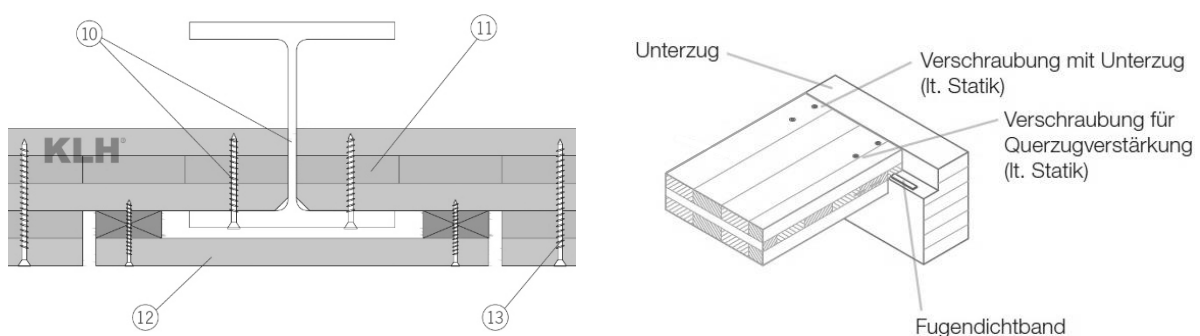
**Abbildung 1-14** Stufenfalz-Querkraftanschluss in Anlehnung an [21]

In Abbildung 1-14 ist ein gängiger Plattenlängsstoß zu sehen, man spricht hier von einem Stoß mit Stufenfalz. Im Gegensatz zu stumpfen Stößen mit Stoßdeckbrettern können bei dieser Art der Fügung Querkräfte übertragen werden. Mit der Querkraftübertragung einhergehend, treten beidseits der Stoßfuge lokale Querkzugspannungen in der Brettsper Holzplatte auf (vgl. Abbildung 1-17). KLH [21] empfiehlt eine Querkzugsicherung mit Vollgewindeschrauben (7), mit einem Achsabstand  $e \leq 10 - 15$  cm, durchzuführen. Die dabei notwendigen Randabstände sind von der Schraubentypen abhängig und gemäß der entsprechenden ETA einzuhalten. Die Teilgewindeschrauben (6) dienen der Übertragung der Schubkräfte in der Fuge.



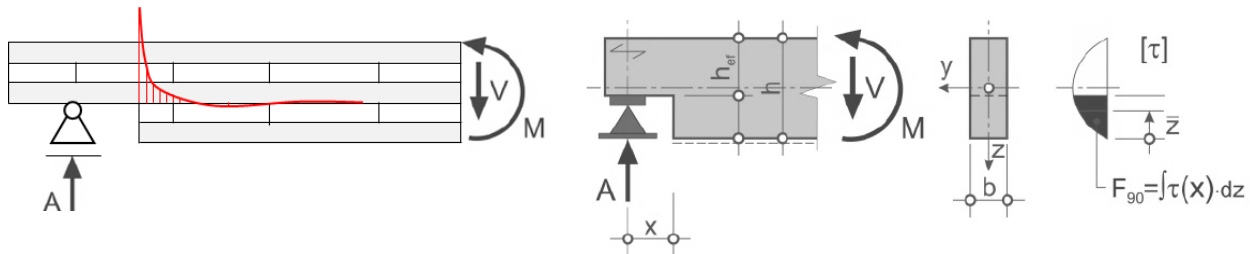
**Abbildung 1-15** Plattenlängsstoß "hängend"

Mit einer spiegelverkehrten Ausführung des Stoßes (Abbildung 1-15) können Zugspannungen quer zur Faser ausgeschlossen werden. Diese Ausführung bringt aber montage-technische Nachteile mit sich, da das Fügstück „schwebend“ montiert werden muss.



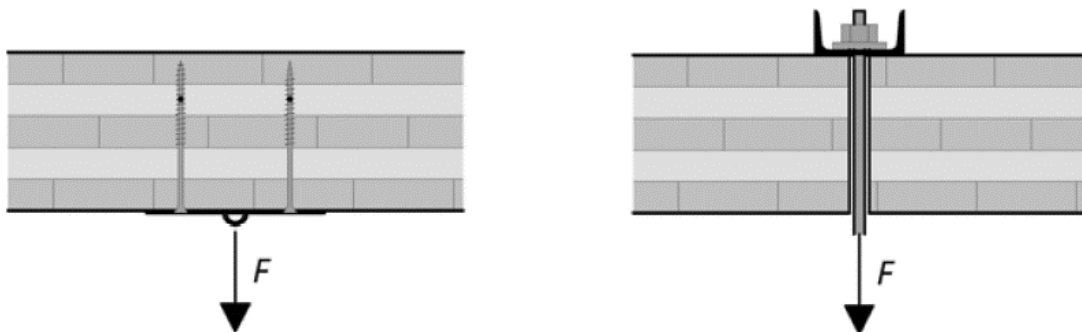
**Abbildung 1-16** ausgeklinkte Deckenanschlüsse  
 (links: Anschluss Decke an Stahlträger [21]; rechts: Anschluss Decke an Unterzug [22])

Dieselben mechanischen Phänomene, wie vorhin beschrieben, treten bei ausgeklinkten Deckenanschlüssen auf. Häufig ist es nötig, Platten im Auflagerbereich auszuklinken, um beispielsweise eine Brandabschottung (12) von Stahlträgern (10) in Abbildung 1-16-links installieren zu können oder ein bestimmtes Höhenniveau zu erreichen (siehe Abbildung 1-16-rechts). In beiden Fällen empfehlen die Herstellerfirmen des Brettspertholzes (KLH und Stora Enso) eine Querkzugssicherung mit Vollgewindeschrauben.



**Abbildung 1-17** *Prinzipieller Verlauf der Querkzugspannungen bei Ausklinkungen (links: an Stelle „Ecke Ausklinkung“ in Anlehnung an [23]; rechts: über die Querschnittshöhe [24])*

In Abbildung 1-17-links ist der qualitative Verlauf von Querkzugsspannungen bei Ausklinkungen in Plattenlängsrichtung auf Höhe des Ausklinkungsgrundes dargestellt. Um die Spannungsspitzen effektiv ableiten zu können, ist eine Querkzugssicherung im Nahbereich der Ausklinkung erforderlich. Basierend auf dem Schnittkraftverlauf von Trägern, treten bei Ausklinkungen an Plattenenden naturgemäß eine Kombinationsbeanspruchung von Schubspannungen und Zugspannungen quer zur Faser (Abbildung 1-17-rechts) auf. Diese Querkzug-Schubinteraktionen führen zu komplexen Versagensmechanismen, nicht zuletzt deshalb, weil es sich jeweils um spröde Versagensarten handelt. Diese Tatsache macht laut WALLNER-NOVAK et al. [23] genauere Untersuchungen von Ausklinkungen erforderlich.

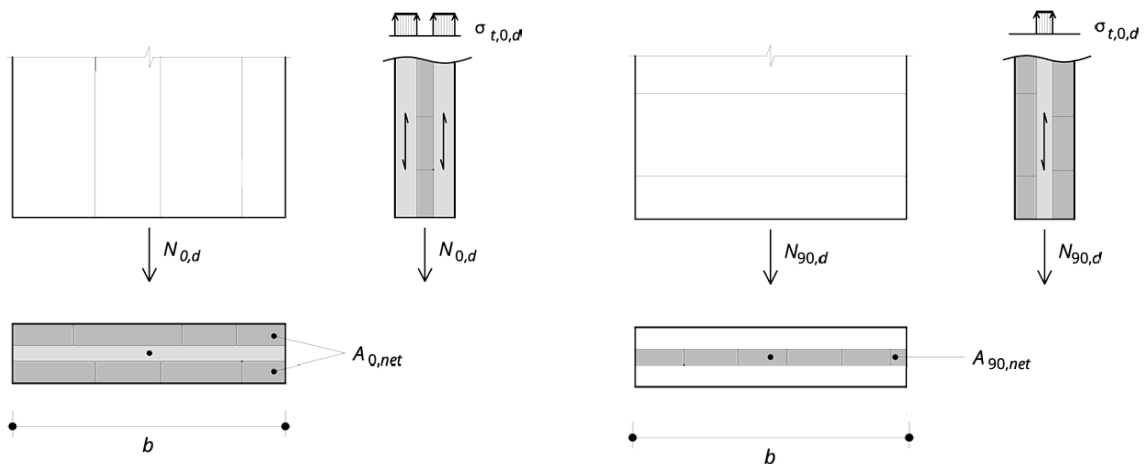


**Abbildung 1-18** *Kraftangriff quer zur Elementebene: Anschlusslösungen aus [23]*

WALLNER-NOVAK et al. [13] verweisen auf eine weitere Art der Querkzugbeanspruchung von Brettspertholz. Bei der Aufhängung von Lasten (siehe Abbildung 1-18) ist auf die geringe Querkzugtragfähigkeit zu achten. Dabei können die Spannungen nicht in dieser Form umgelagert werden, wie es bei Zugkräften in Scheibenebene passiert. Es treten sowohl in den Deck- als auch in den Querlagen Querkzugspannungen auf. Daher empfehlen WALLNER-NOVAK et al. [23] die Kraft durch die Platte zu leiten und die Last auf der von der Zugkraft abgewandten Seite auf Druck einzuleiten. In Abbildung 1-18 werden zwei Möglichkeiten der Lastdurchleitung skizziert. Im unteren Lastniveau würden sich Vollgewindeschrauben eignen, die über die gesamte Elementdicke eingeschraubt werden.

*„Zug normal zur Faserrichtung ist zu vermeiden und ist mittels Verbindungsmittel zu übertragen“ [25]*

Querkzugbelastungen in Lamellenbreitenrichtung treten bei Brettspertholz de facto nur zufolge Quell- und Schwindeigenspannungen auf. Bei Zugbelastungen in der Elementebene werden die Spannungen aufgrund der höheren Steifigkeit der benachbarten, 90° dazu angeordneten Bretter, aufgenommen und resultieren somit in Längszugspannungen.

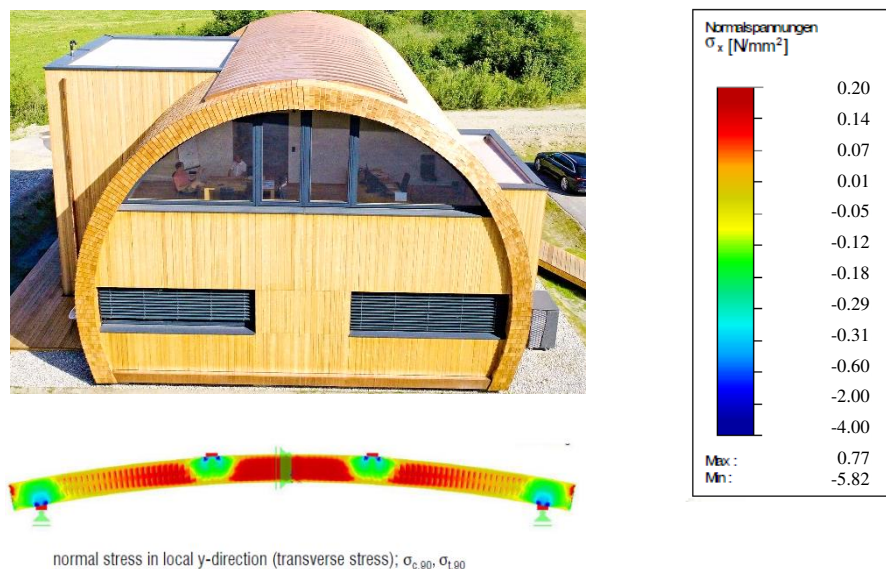


**Abbildung 1-19** Zug in der Scheibenebene [23]  
 (links: Zug in Richtung der Decklagen; rechts: Zug in Richtung der Querlagen)

Dieser Sachverhalt wird u.a. von WALLNER-NOVAK et al. [23] bei der Bemessung von Brettspertholz hinsichtlich Zugspannungen in Scheibenebene mit Nettoquerschnittsflächen berücksichtigt. Bei Belastung in Richtung der Decklagen werden von der Bruttoquerschnittsfläche die Querschnittsflächen der Querlagen abgezogen. Ebenso wird bei Zugbelastungen in der Elementebene quer zu den Decklagen vorgegangen. Dabei ergibt sich die Nettoquerschnittfläche als Summe der Querschnittsflächen der Querlagen. (vgl. Abbildung 1-19)

## 1-2.1 GEKRÜMMTES BRETTSPERRHOLZ

Ein Nischenprodukt stellen gebogene Brettspertholzplatten dar. Unterreiner Holzbau GmbH produziert in Ainet das von ihnen mitentwickelte Radiusholz™. Diese Innovation wird vorwiegend als Außenschale von entsprechenden Gebäuden eingesetzt.



**Abbildung 1-20** Radiusholz™  
 (oben: Bürogebäude [26]; unten: Spannungen bei Vierpunktbiegeversuch [27])

Ausführliche Finite Elemente (FE) Analysen von STECHER et al. [27] zeigen in Abbildung 1-20-rechts, dass sich im Firstbereich großräumig Zugspannungen quer zur Faserrichtung (normal stress in local y-direction) einstellen.

## 1-3 STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS

---

Im vorliegenden Kapitel wird auf den Stand der Technik und des Wissens hinsichtlich Querzugverhalten eingegangen. Dazu werden anfangs die Einflussparameter auf die Querzeigeneigenschaften erörtert. Dabei wird hierarchisch vorgegangen, das heißt, dass mit „clear-wood“ begonnen wird, bevor man auf Vollholz eingeht und nach den Betrachtungen von Brettschichtholz schlussendlich Einflussparameter auf Querzeigeneigenschaften von Brettspertholz thematisiert.

Nach der erfolgten Erörterung wird auf bereits erfolgte Forschungsarbeiten eingegangen und daraus folgend die Forschungsfragen dieser Arbeit definiert.

### 1-3.1 EINFLÜSSE AUF DIE QUERZUGEIGENSCHAFTEN

Sowohl die Querzugfestigkeits- als auch die Steifigkeitseigenschaften von Holz hängen von mehreren Parametern ab, auf die im Folgenden eingegangen wird.

#### 1-3.1.1 clear-wood

Mit „clear-wood“ definiert man im Allgemeinen „fehlerfreie“ („merkmalsfreie“) Kleinproben. Dabei versteht man unter „Holzfehler“ natürliche Holzmerkmale wie Äste, Harzgallen oder auch die Markröhre, die das Materialverhalten beeinflussen und mitverantwortlich für große Streuungen der Holzeigenschaften auf der Makroebene sind. Bei diesen fehlerfreien Kleinproben wird weiters der Einfluss der Jahrringlage weitgehend ausgeschlossen, was zur Verwendung eines kartesischen Koordinatensystems mit guter Näherung führt. KOLLMANN [28] definiert auf Basis von Hörig und Carrington die z-Achse als Hauptachse in Richtung der Markstrahlen, sprich radial. Die y-Achse ist demnach die Längsrichtung und die x-Achse die tangentiale Richtung, bei Brettspertholz wird hingegen üblicherweise die Längsrichtung der x-Achse zugewiesen.

#### Holzart

Die Holzart hat nach KOLLMANN [28] in SCHICKKHOFER [2] Einfluss auf die Zugfestigkeit rechtwinkelig zur Faser, wobei nicht zwischen radialer und tangentialer Richtung unterschieden wird. Die Mittelwerte der wichtigsten heimischen Nadelhölzer schwanken zwischen 2,3 N/mm<sup>2</sup> für Tanne und Lärche, 2,7 N/mm<sup>2</sup> für Fichte und 3,0 N/mm<sup>2</sup> bei Kiefer (*Pinus spp.*)

Verschiedene Holzarten haben nach Keylwerth (1951) in SCHICKKHOFER [2] ebenfalls Einfluss auf die E-Moduln. Bei radialer Belastung steht ein E-Modul von 700 N/mm<sup>2</sup> bei Fichtenholz einem E-Modul von 1.120 N/mm<sup>2</sup> bei Kiefernholz (*Pinus spp.*) gegenüber. Bei tangentialer Belastung beträgt der Wert bei Fichte 400 N/mm<sup>2</sup>, bei Kiefer hingegen 580 N/mm<sup>2</sup>.

#### Rohdichte

Bei clear-wood gilt laut SCHICKKHOFER [2] grundsätzlich, dass die Festigkeiten umso höher sind, desto dichter das Holz ist. Dieser auf dieser Skalenebene stark ausgeprägte Effekt nimmt bei Holz in Bauteilgröße allerdings stark ab. Auch bei den Steifigkeiten ist bei clear-wood eine starke Korrelation zur Rohdichte zu beobachten. Bei Querzug muss man aber immer zusätzlich auf die *Beanspruchungsrichtung* achten. Bei radialer Belastung ist nahezu kein Einfluss der Rohdichte vorhanden.

Bei Nadelhölzern ist weiters ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Jahrringbreite bzw. dem Spätholzanteil und der Rohdichte gegeben. Bei geringerer Jahrringbreite wird demnach die Rohdichte und damit einhergehend die Festigkeit steigen.

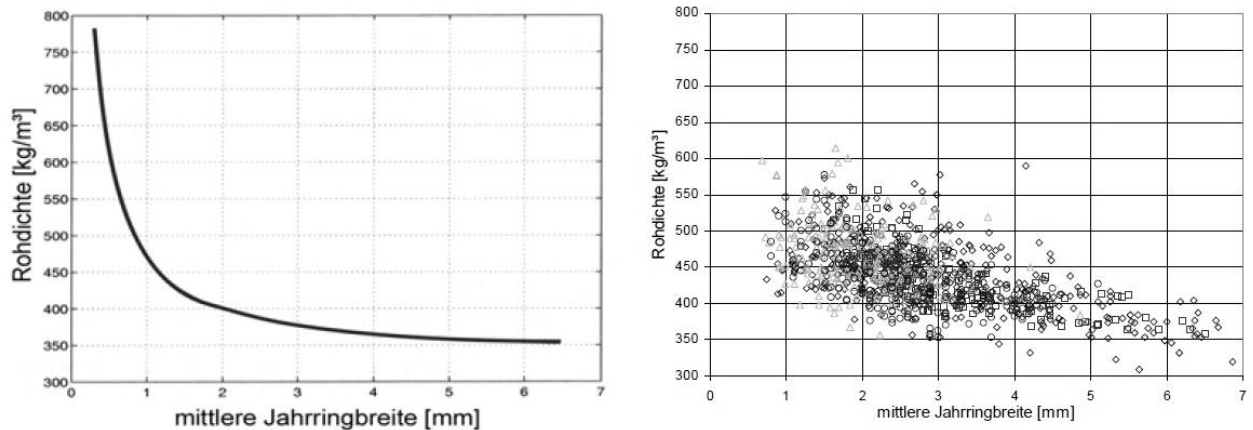


Abbildung 1-21 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Jahrringbreite [2]  
(links: theoretisches Modell; rechts: Versuchsergebnisse mehrerer Prüferien)

In Abbildung 1-21 ist der Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Rohdichte dargestellt. SCHICKHOFER [2] erwähnt auch, dass es eine negative Korrelation zwischen Frühholzanteil und Rohdichte gibt, was bedeutet, dass bei abnehmendem Frühholzanteil die Rohdichte steigt.

### Holzfeuchtigkeit

Laut SCHICKHOFER [2] ist die Holzfeuchte neben der Rohdichte der zweite maßgebende holztechnologische Kennwert, der die Festigkeit wesentlich beeinflusst. Die Festigkeitseigenschaften nehmen dabei bei steigender Holzfeuchte ab.

Die Holzfeuchtigkeit wirkt sich auch auf die elastischen Eigenschaften von Holz aus. Steigende Feuchtigkeit lässt die elastischen Eigenschaften sinken, wobei der Abfall im Mittel pro Prozent Holzfeuchteänderung weniger stark ausfällt, als bei der Festigkeit.

### Beanspruchungsrichtung

Die Belastungsrichtung ist eine wesentliche Einflussgröße auf die Querkzugfestigkeit und darf lt. BLASS [29] bei der Bewertung der Versuchsergebnisse nicht vernachlässigt werden. Man muss zwischen radialer und tangentialer Richtung unterscheiden.

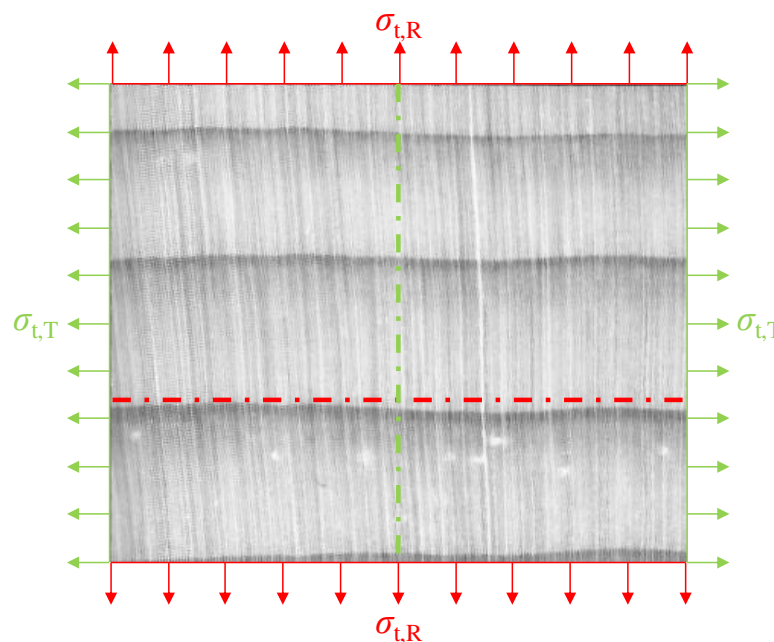


Abbildung 1-22 Beanspruchungsrichtung (Bild aus [6])

Bei überwiegend radialer Belastung und folglich Querkzugspannung  $\sigma_{t,R}$  kommt es zum Tangentialbruch, also zum Versagen der Frühholzzone. Da die Rohdichte im Frühholz annähernd konstant ist (vgl. Abbildung 1-4-links), besteht bei dieser Belastung quasi kein Zusammenhang zur Querkzugfestigkeit. Bei überwiegend tangentialer Belastung und folglich Querkzugspannung  $\sigma_{t,T}$  kommt es zu einem Radialbruch, das heißt, dass der Bruch sowohl Früh- als auch Spätholz beinhaltet. Bei dieser Bruchform hat die Jahrringbreite Einfluss auf die Querkzugfestigkeit.

### **Temperatur**

Die Festigkeiten fallen laut SCHICKHOFER [2] mit zunehmender Temperaturbeanspruchung z.T. deutlich ab. Dafür ist, ähnlich wie beim Holzfeuchteeinfluss, eine „Aufweichung“ der Faser-Matrix verantwortlich. Folglich nehmen auch die elastischen Eigenschaften mit steigender Temperatur ab. Diese Effekte spielen vor allem im Brandfall eine wichtige Rolle.

### **Lasteinwirkungsdauer**

Holz ist laut SCHICKHOFER [2] ein visko-elastisches Material, demnach hängen die Festigkeiten von der Beanspruchungsdauer und Art der Lastaufbringung ab. Dies ist bei der Festlegung der Prüfgeschwindigkeit essenziell. Auch die elastischen Eigenschaften hängen von der Lasteinwirkungsdauer ab, was sich in Form von Kriecherscheinungen zeigt.

### 1-3.1.2 Vollholz (Holz in Bauteilgröße)

Betrachtet man nun Vollholz, z.B. in Form eines Einzelbrettes, kommen einige Einflussparameter gegenüber den merkmalsfreien Kleinproben hinzu, welche die Beanspruchbarkeit quer zur Faser teils massiv abfallen lassen. Blickt man auf Holz in Bauteilgröße, verwendet man im Regelfall ein zylindrisches Koordinatensystem mit Ursprung in der Markröhre.

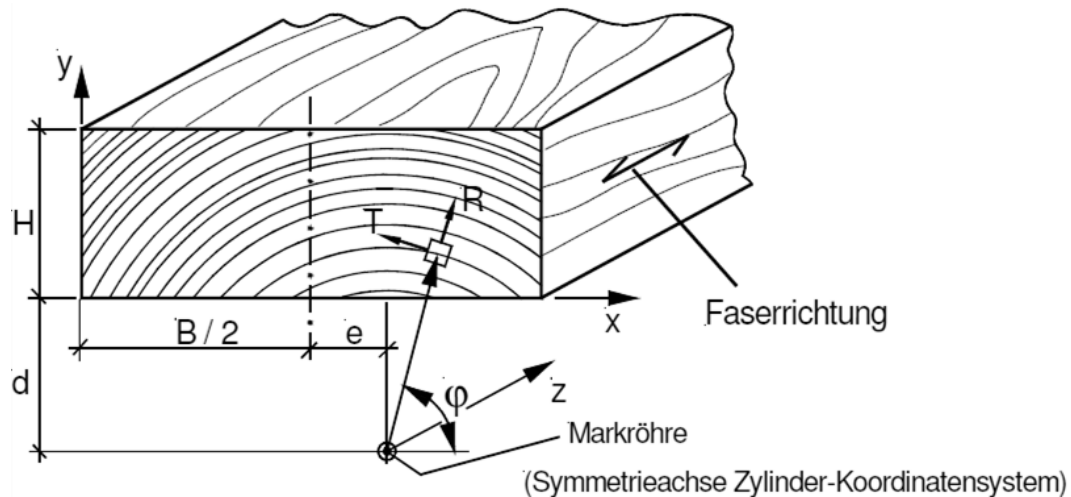


Abbildung 1-23 Koordinatensystem Vollholz [30]

Die elastischen Eigenschaften von Holz lassen sich durch zylindersymmetrische Anisotrope beschreiben. Die Symmetrieachse folgt ideell der longitudinalen Faserrichtung (L) des Holzes. Die radiale Richtung (R) weist rechtwinklig zu den Jahrringen nach außen, die tangentielle Richtung (T) folgt den Jahrringen. Dieses Modell stellt im Regelfall eine ausreichende Näherung für die Beschreibung des Kegelstumpfes Baum dar. Holz auf Bauteilgröße wird geometrisch als Parallelepiped definiert, das parallel zur Stammachse (z-Richtung des zylindrischen Materialkoordinatensystems) eingeschnitten wird. Demnach brechen die rechtwinkligen Querschnitte die Zylindersymmetrie des Stammquerschnitts (Fladerung). Bei der Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung sind zwei Koordinatensysteme zu unterscheiden, nämlich einem Materialkoordinatensystem mit Zylindersymmetrie und einem kartesischen Koordinatensystem, mit dem sich sowohl die Geometrie der Bauteile als auch die äußeren Einwirkungen und Randbedingungen einfach beschreiben lassen. (ganzer Absatz vgl. [30])

#### Rohdichte

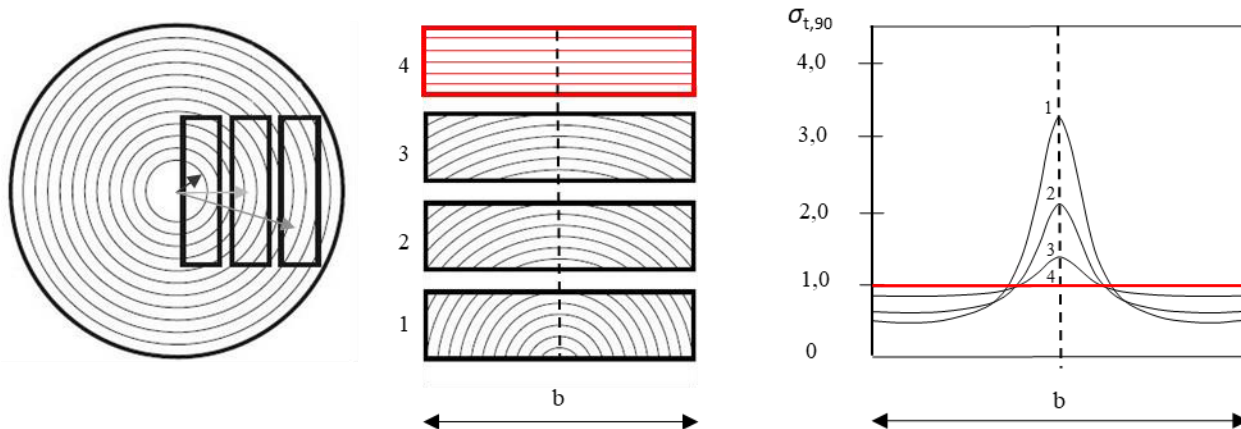
*“Bei konstanter Rohdichte innerhalb der Lamelle gibt es starke Schwankungen der Querkzugfestigkeit. Daraus kann gefolgert werden, dass die Rohdichte eine unausgeprägte bis keine Korrelation gegenüber der Querkzugfestigkeit innerhalb der Lamelle aufweist” [31]*

Diese Aussage von STUEFER [31], dass die Rohdichte bei Einzellamellen einen unausgeprägten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit bei überwiegend radialer Belastung hat, untermauert auch BLASS [32]. Letzterer untersuchte den Einfluss der Rohdichte auf die Querkzugfestigkeit bei Vollholz und stellte dabei fest, dass es bei überwiegend radialer Beanspruchung quasi keinen Zusammenhang gibt. Sehr wohl konnte aber ein schwacher linearer Zusammenhang in tangentialer Beanspruchungsrichtung eruiert werden. Diese Zusammenhänge lassen sich mit dem Bruchbild bei den verschiedenen Belastungsrichtungen (siehe Abbildung 1-22) erklären. Bei radialer Belastung kommt es zum Bruch im Frühholz bzw. an der Jahrringgrenze, welches weitgehend dieselbe Rohdichte hat. Bei tangentialer Belastung verläuft der Bruch normal zu den Jahrringen und somit ist die Festigkeit von der Jahrringbreite, ferner von der Rohdichte der Probe, abhängig.



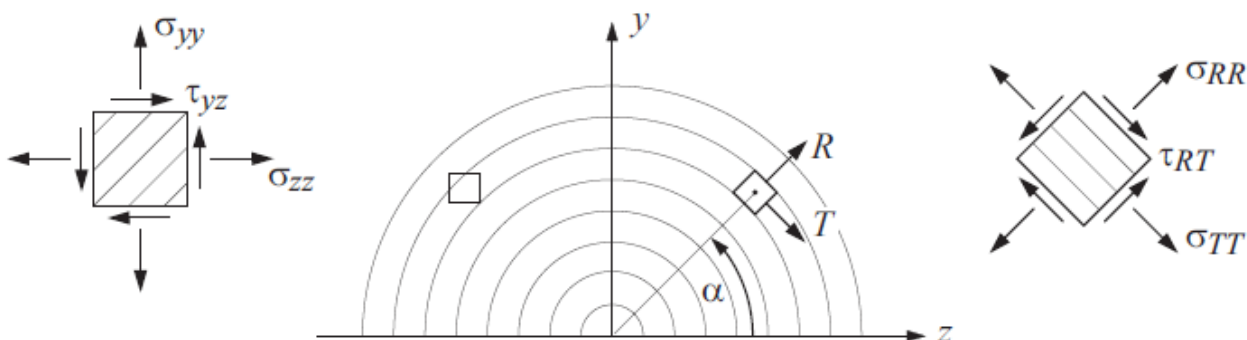
## Markabstand

Mit zunehmendem Markabstand nimmt die Krümmung der Jahrringe ab und damit einhergehend ändern sich die Spannungsverteilungen über den Brettquerschnitt.



**Abbildung 1-24** *Markabstand*  
 (links: Lage des Brettes im Stamm (in Anlehnung an [8]), mittig: Jahrringkrümmung, Spannungsverteilung in Abhängigkeit des Markabstandes (in Anlehnung an [33]))

Wie in Abbildung 1-24-rechts dargestellt, nehmen Spannungsspitzen mit zunehmendem Markabstand über den Brettquerschnitt ab. Dies wirkt sich laut DILL-LANGER [30], STUEFER [31] und BLASS [29] mit höherer Querkzugfestigkeit aus. Bei theoretisch unendlicher Jahrringkrümmung entspricht der Spannungsverlauf im Brett der Belastung. Dies ist laut DILL-LANGER [30] auf das Entfallen von Schubkoppelungseffekten zurückzuführen und gilt gleichermaßen für „stehende“ und „liegende“ Jahrringverläufe.



**Abbildung 1-25** *Spannungskomponenten bei Querkzugbelastung [11]*

Bei der Belastung in Brettickenrichtung ändern sich mit dem Markabstand und damit einhergehender Abflachung der Jahrringkrümmung auch die Spannungskomponenten. In Abbildung 1-25 illustriert DANIELSON [11] auftretende „Schubkoppelungseffekte“ entlang eines Jahrringes bei Querkzugbelastung. Je geringer die Jahrringkrümmung, das heißt je näher an der Markröhre, desto höher sind lokale Schubspannungen im Jahrringgefüge. Entlang eines Jahrringes entstehen lokale Rollschubspannungen, die die Querkzugfestigkeit abfallen lassen. Dieser Sachverhalt und abnehmende Spannungsspitzen in der Symmetrieachse des Brettes (vgl. Abbildung 1-24-rechts) haben Auswirkungen auf die Festigkeiten bei Belastungen quer zur Faser, was STUEFER [31] bestätigen kann. Demnach weist die Krümmungsänderung der Jahrringe die höchste Korrelation aller Parameter gegenüber der Querkzugfestigkeit auf. Es kann allgemein festgestellt werden, dass mit zunehmendem Markabstand die Querkzugfestigkeit zunimmt.



## Ast

“Äste bilden das wichtigste Strukturmerkmal von Schnittholz in Bezug auf die Auswirkungen auf die mechanischen Kenngrößen” [2]

SCHICKHOFER [2] definiert verschiedene Faktoren, von denen das Ausmaß der Auswirkungen abhängt. Wesentlich für die mechanischen Auswirkungen ist demnach das Verhältnis der *Astgröße* in Bezug auf die Querschnittsabmessungen. Weiters hat der *Typ des Astes* und somit die Lage des Astes im Querschnitt Auswirkungen auf die Beanspruchbarkeit.

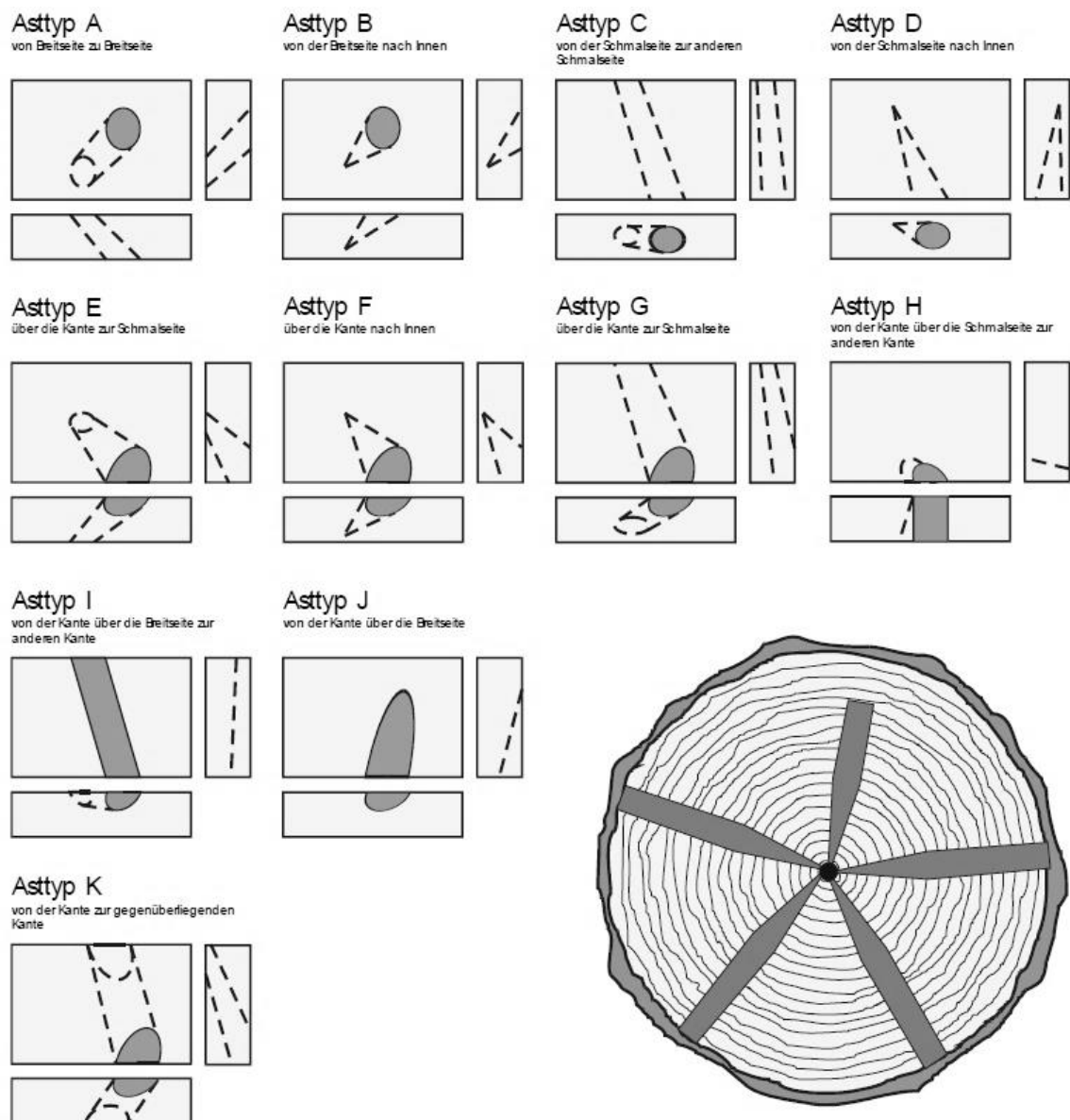


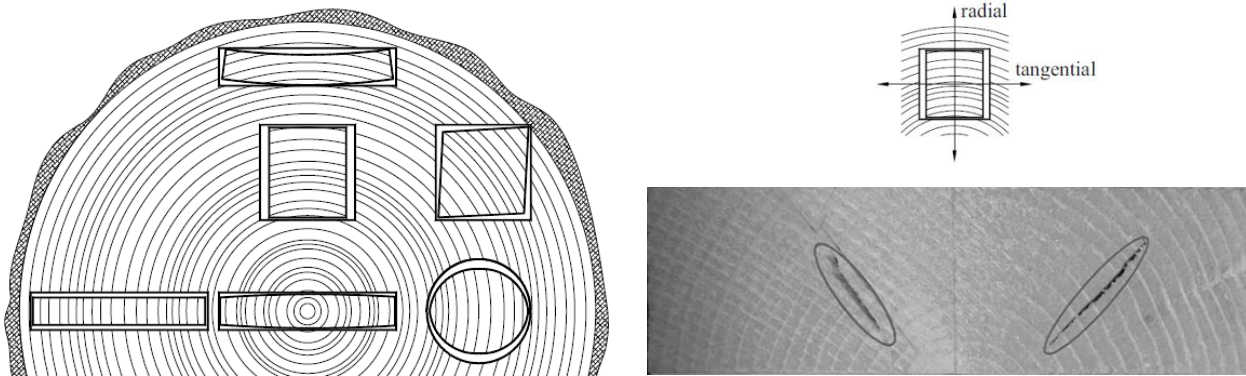
Abbildung 1-26 Asttypen nach Lage der Äste im Querschnitt (in Anlehnung an GLOS in [2])

DANIELSSON [11] schreibt, dass Äste im Allgemeinen die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen. Bei bestimmten Asttypen kommt es aber durchaus vor, dass die Querkzugfestigkeit gesteigert wird, da die Äste als „Bewehrung“ wirken.

Neben der Astgröße und des Asttypes sind laut SCHICKHOFER [2] auch noch der *Astabstand* und der *Zustand der Äste* essenziell. Äste können nämlich fest verwachsen, teilweise verwachsen oder lose (Durchfallast) sein. Nicht zuletzt haben obligatorische *Faserabweichungen* im Nahbereich der Äste Einfluss auf mechanische Eigenschaften.

## Trocknungsrisse

Trocknungsrisse bei Schnittholz haben verschiedene Ursachen. Das anisotrope Material ändert beim Trocknen unter dem Fasersättigungspunkt von circa 30 % Holzfeuchtigkeit richtungsabhängig seine Form. Das Längsschwindmaß ist meist vernachlässigbar klein und beträgt bei Fichte 0,3 %, in Richtung der Holzstrahlen ist das Schwindmaß in etwa 10-mal so groß und in tangentialer Richtung ist das Schwinden mit 8,5 % am ausgeprägtesten (vgl. [10]). Risse entstehen in weiterer Folge bei Behinderung dieser Schwindverformungen (äußere Zwängungen), aufgrund der Stapelung von Schnittholz.



**Abbildung 1-27** *Schwindverhalten Holz*  
 (links: *Verzerrung von Holz durch unterschiedliche Schwindung* [4]; rechts: *Trocknungsrisse im Hirnholz* [31])

Eine weitere Ursache für die Entstehung von Trocknungsrissen ist das so genannte „Holzfeuchtegefälle“. Das Holz trocknet an der Oberfläche schnell ab, während das Innere des Bauteils noch sehr feucht ist. Dieses Feuchtegefälle zwischen äußeren und den inneren Schichten führt zu Spannungen, die zur „inneren Verschalung“ und somit zu Innenrisse führen können (vgl. [34]). Bei schneller technischer Trocknung treten die in Abbildung 1-27-rechts dargestellten wabenartigen radialen Innenrisse auf.

STUEFER [31] stellte fest, dass Trocknungsrisse einen signifikanten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit von Holz haben. Der Querkzugfestigkeitsabfall liegt bei rund 50 % bei Prüfkörpern mit Trocknungsschäden. BLASS [29] erwähnt, dass Schwindrisse der Grund dafür sind, dass in der „National Design Specification“ der USA keine Werte der Querkzugfestigkeit für Vollholz angegeben sind, sondern immer mechanische Verstärkungen bei Belastungen quer zur Faser gefordert werden.

Das Versagen auf niedrigem Lastniveau erklärt BLASS [29] mit Hilfe der Bruchmechanik, auf die in dieser Arbeit im Speziellen nicht eingegangen wird. Spannungskonzentrationen an der Spitze des Risses führen zu einem schnellen Risswachstum, sodass die Tragfähigkeit eines Querschnittes mit Riss viel geringer ist als bei Prüfkörpern, bei denen erst eine Rissinitiierung erfolgen muss.

## Wuchsanomalien

Neben globalen Faserabweichungen, infolge von Drehwuchs eines Baumes, haben auch Sondergewebe Einfluss auf das Querkzugverhalten. Druckholz (Buchs) hat laut SCHICKHOFER [2] hauptsächlich Einfluss auf das Bruchverhalten, indem es spröde bricht. Die Festigkeiten werden ihm zufolge nicht wesentlich herabgesetzt. Dies bestätigt ROSENTHAL [35], der die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen über die Querkzugfestigkeit von Druckholz durchführte. Er schreibt, dass sich die Festigkeitswerte quer zur Faser bei Druckholz trotz Interzellularräume kaum von jenen bei Normalholz unterscheiden. Dafür wirkt sich aber steigende Holzfeuchtigkeit stärker auf die Querkzugfestigkeit aus als bei regulärer Holz Anatomie. ROSENTHAL [35] zeigt auch, dass die Bruchdehnungswerte bei Querkzugbelastung von Druckholz unterhalb derer von Normalholz liegen.

## Mark

Das Mark, welches das Zentrum eines verholzten Stammes bildet, stellt bei Querkzugbelastungen eine Unstetigkeitsstelle dar. Außerdem hat das Holz in unmittelbarer Nähe zur Markröhre, das juvenile Holz, Einfluss auf die Festigkeit. Die Festigkeit sowie auch die Steifigkeit sind laut SCHICKHOFER [2] beim juvenilen Holz um etwa 50 % bis 70 % niedriger als beim Holz mit größerem Markabstand. Diese Aussage spiegeln die Untersuchungen von STUEFER [31] gut wider. Bei Vorhandensein einer Markröhre und somit von juvenilem Holz, ist die Querkzugfestigkeit um etwa 45 % niedriger als bei kernfernen Querschnitten.

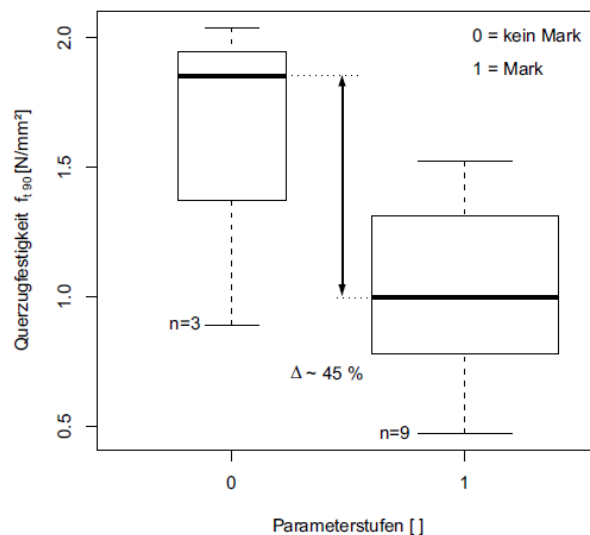


Abbildung 1-28 Boxplot Querkzugfestigkeit gegen Mark [31]

## Harzgalle

Eine Harzgalle ist laut LOHMANN [34] ein, zwischen den Jahrringen liegender, mit Harz gefüllter Hohlraum. Harze helfen vielen Koniferen Wunden zu schließen und Schädlinge abzuwehren. Ähnlich wie bei Schwindrissen treten im Randbereich der Harzgallen Spannungsspitzen auf, die rissauslösend sind. Harzgallen sind aber im Gegensatz zu Trocknungsrisse spannungsoptimiert in den Zellaufbau integriert.

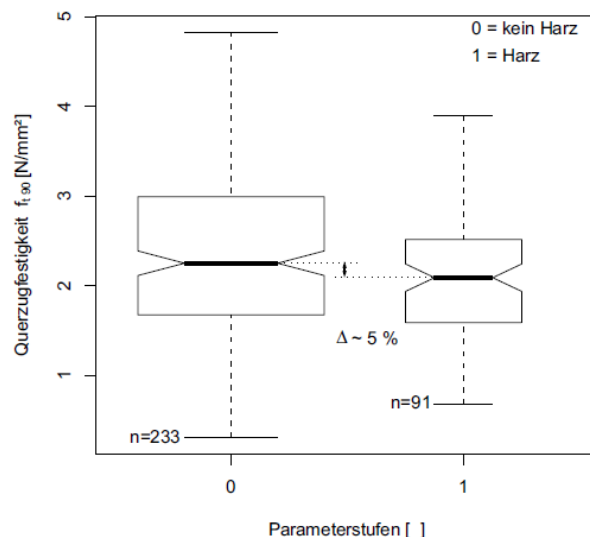


Abbildung 1-29 Boxplot Querkzugfestigkeit gegen Harz [31]

SCHICKHOFER [2] schreibt, dass Harzgallen geringen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften von Holz haben, was mit den Auswertungen von STUEFER [31] bestätigt wird. Der Median von Prüfkörpern mit Harzgallen liegt demnach um rund 5 % unter dem der Prüfkörper ohne Harzgallen.

### 1-3.1.3 Brettschichtholz

Bei Brettschichtholz kommen, neben den unter Kapitel 1-3.1.1 und 1-3.1.2 erörterten Einflussparametern auf die Querzeigenschaften, noch die Effekte der Homogenisierung und des querzugbeanspruchten Volumens hinzu.

#### Homogenisierung

Unter Homogenisierung wird im Allgemeinen das Reduzieren der Streuung einer Holzeigenschaft verstanden. Das Zerlegen des Ausgangsquerschnittes und dem zufälligen oder gezielten Anordnen der Halbwärme im Holzwerkstoff ist dabei eine Art der Homogenisierung. Dabei gilt, je größer der Zerlegungsgrad, desto ausgeprägter zeigt sich auch die Zerstörung der natürlich optimierten Holzstruktur und damit werden nach erfolgter zufälliger Fügung sowohl die Streuung als auch die Festigkeitskenngrößen kleiner. Eine zweite Art der Homogenisierung ist die Reduktion der wuchsbedingten Strukturmerkmale, insbesondere durch Auskappen von Ästen. (ganzer Absatz vgl. [2])

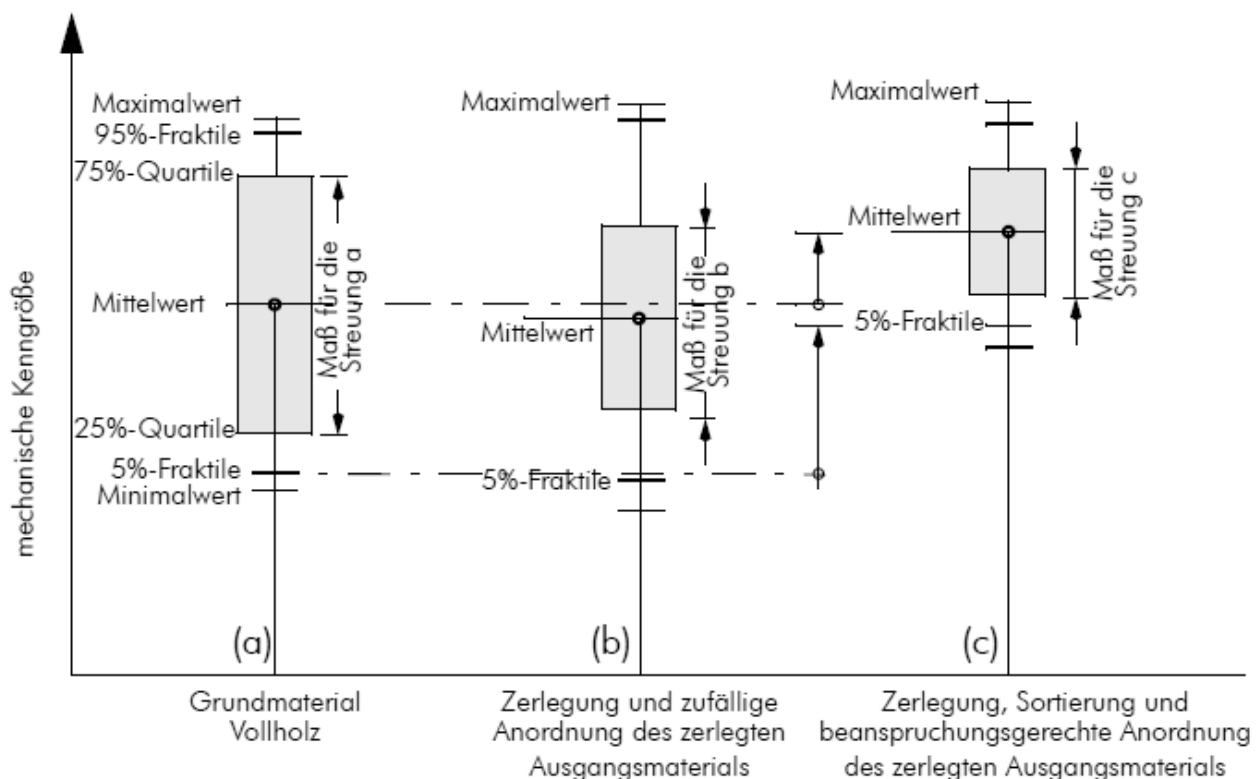


Abbildung 1-30 Effekt der Homogenisierung von Werkstoffkenngrößen (in Anlehnung an [2])

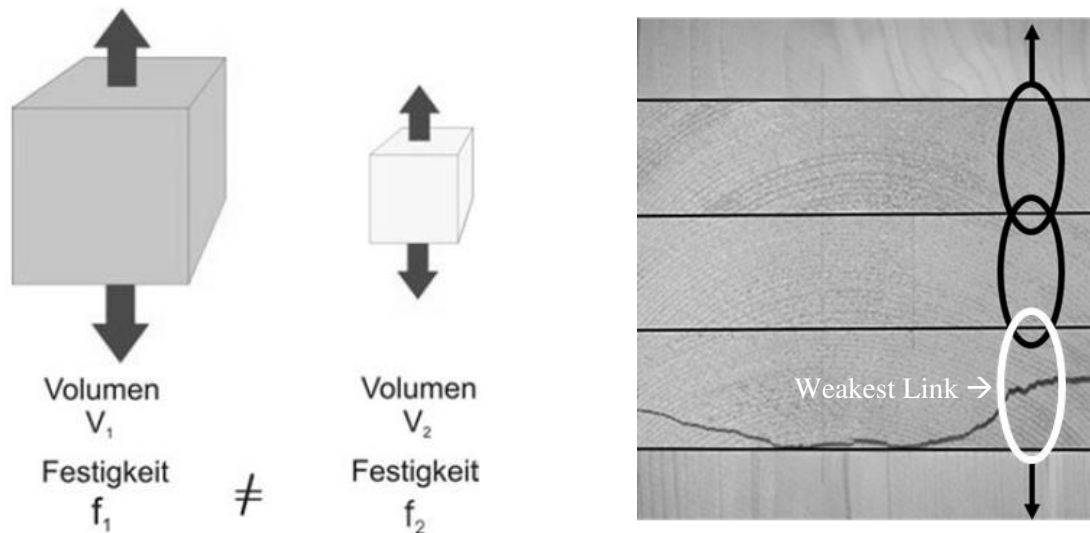
In Abbildung 1-30 ist deutlich die Auswirkung der Homogenisierung zu erkennen. Bei zufälliger Anordnung des zerlegten Ausgangsmaterials im Holzwerkstoff kann es zu einer Reduktion der Festigkeitseigenschaft kommen, jedoch verbunden mit dem positiven Effekt einer geringeren Streuung. Eine deutliche Verbesserung der mechanischen Kenngröße (Querzugfestigkeit) kann durch eine Sortierung und einer beanspruchungsgerechten Positionierung im neuen Holzwerkstoffquerschnitt erzielt werden (vgl. [2]).

#### Lamellendicke

Bei der Untersuchung der Auswirkung der Lamellendicke auf die Querzeigenschaften konnten von BLASS [32] keine relevanten Zusammenhänge festgestellt werden. Er schreibt von einem niedrigen negativen Korrelationskoeffizienten.

## Serieller Größeneffekt

Der Größeneffekt besagt laut BLASS [29], dass für größere querzugbeanspruchte Volumina, bei gleicher Spannung, eine größere Versagenswahrscheinlichkeit erwartet werden kann. Das bedeutet, dass bei Probekörpern größeren Volumens geringere Festigkeitskenngrößen ermittelt werden, als bei Probekörpern kleineren Volumens (vgl. [2]).



**Abbildung 1-31** *volumenabhängige Festigkeit*  
(links: Größeneffekt [2]; rechts: Weakest-Link Theory in Anlehnung an [33])

Der Effekt wird mit der „Weakest-Link Theory“ (auch „Weibull-, oder Sprödbrechtheorie“) für sprödbrechende Werkstoffe beschrieben. Diese Theorie besagt, dass eine Kette so stark ist, wie ihr schwächstes Glied. Dabei gilt, je länger die Kette, desto wahrscheinlicher ist das Auftreten eines schwachen Gliedes (vgl. [36]). STUEFER [31] ergänzt, dass zwischen den einzelnen Kettengliedern keine Korrelation besteht, sich also alle Kettenglieder unabhängig voneinander verhalten. Bei theoretisch unendlich langen Ketten sinkt laut WEIBULL [37] der Widerstand gegen Null.

Jede Schicht eines querzugbeanspruchten Körpers in Abbildung 1-31-rechts entspricht einem Kettenglied. Demnach führt das Versagen einer Schicht zum Versagen des gesamten Probekörpers. BLASS [29] merkt an, dass WEIBULL [37] von einer statistischen Verteilung der Festigkeit ausgeht. Somit ist nicht notwendigerweise diejenige Stelle für das Versagen maßgebend, an der die Beanspruchung am größten ist, da hier nämlich zufällig auch eine hohe Festigkeit vorhanden sein könnte.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{mit} \quad k_{\text{vol}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (1.3)$$

Dabei sind:

- $\sigma_i$  ..... Festigkeit (max. ertragbare Spannung) des Körpers  $i$
- $V_i$  ..... Volumen des Körpers  $i$  mit  $V_i = b_i \cdot h_i \cdot l_i$
- $k$  ..... Formparameter der Weibullverteilung (2pW)

Die gewählten Festigkeiten können dabei als Mittelwerte oder als Quantilwerte eingesetzt werden (vgl. [2]). In Anlehnung an AICHER [38] und SCHICKHOFER [2] können für die verschiedenen geometrischen Abmessungen ( $b$ ,  $h$ ,  $l$ ) spezifische Größeneffekte angegeben werden. Neben dem Volumenmodell (1.3) kann je nach variierender geometrischer Größe auch ein Höhen- ( $h_i$ ), bzw. Breiten- ( $b_i$ ) oder Längenmodell ( $l_i$ ) definiert werden. Auch ein Querschnittsmodell ( $b_i \cdot h_i$ ) wird von AICHER [38] erwähnt. Der Formparameter ist laut ON EN 1995-1-1(2015) [39] bei Brettschichtholz  $k = 5$ . Für die Herleitung der Gleichung zur Beschreibung des Größeneffektes (Formel (1.3)) wird hier auf einschlägige Fachliteratur, wie unter anderem SCHICKHOFER [2] und BLASS [29], basierend auf WEIBULL(1939) [37] verwiesen.

## Bruchverhalten

DILL-LANGER [30] entwickelt aus seinen Versuchsergebnissen und begleitenden Modellrechnungen einen idealisierten Schädigungsverlauf für querzugbelastetes Brettschichtholz. Der Verlauf lässt sich in Schädigungsstufen darstellen.

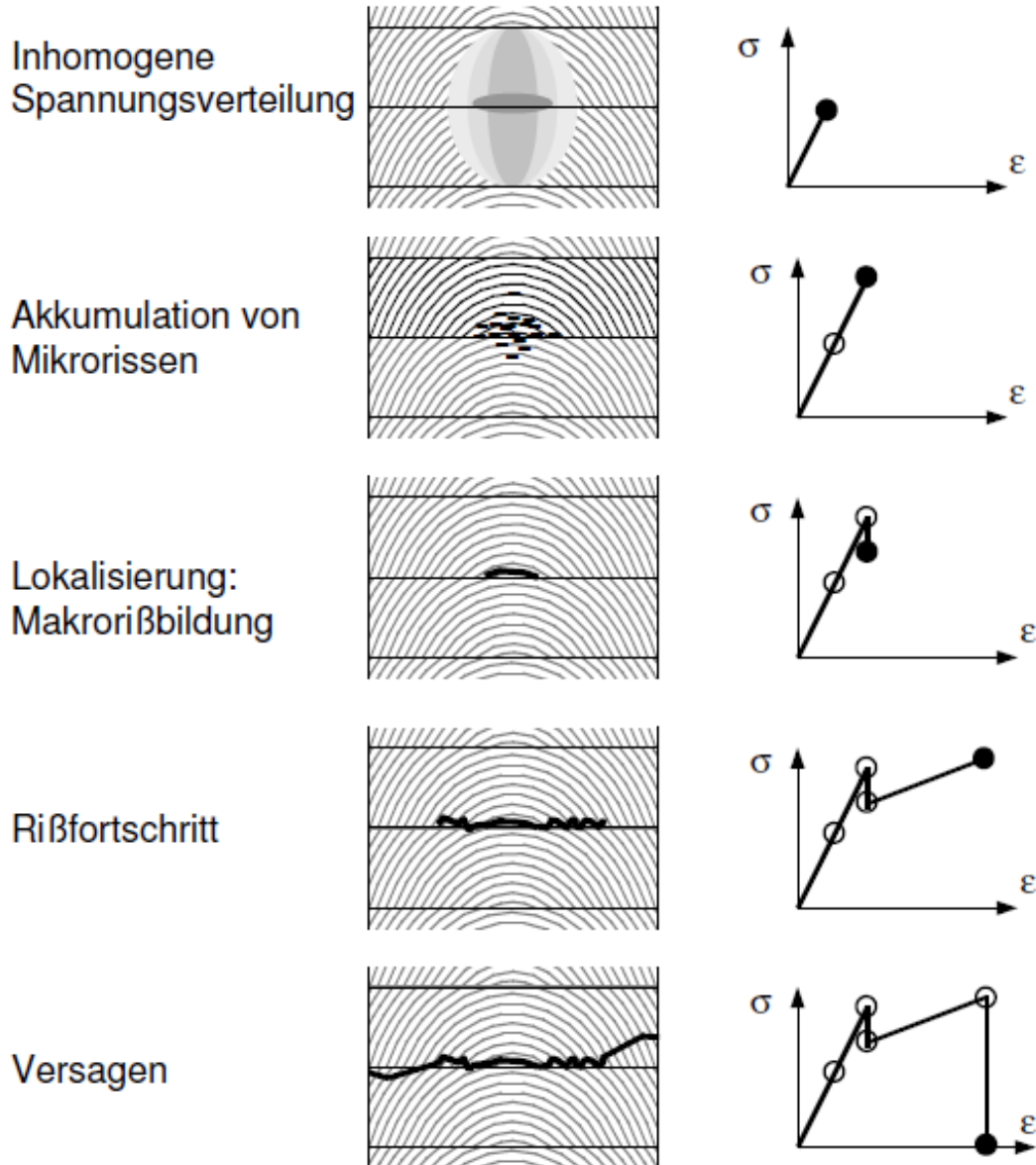


Abbildung 1-32 empirisches Schädigungsmodell für Brettschichtholz bei Querzugbelastung [30]

In Abbildung 1-32 sieht man, dass bis circa 50 % der Bruchlast sowohl das lokale Materialverhalten als auch die globale Last-Verformungskurve linear bleibt. Aufgrund der Jahrringkrümmung und eines Schubkopplungseffektes (siehe Abbildung 1-33) bildet sich trotz global einachsiger Beanspruchung ein stark inhomogenes Feld von Zugspannungen aus. In der zweiten Stufe, bis circa 95 % der Bruchlast, bleibt das globale Last-Verformungsverhalten weiterhin annähernd linear, während sich Mikrorisse im inhomogenen Spannungsfeld im Zentrum bilden. In der dritten Stufe lokalisiert sich die Schädigung durch die Ausbildung eines Makro-Anrisses im Zentrum. Die Rissentstehung und die damit verbundene Lastumlagerung auf unbeschädigte Bereiche des Querschnittes kann zu Lastabfällen in der Last-Verformungskurve oder zum sofortigen Versagen führen. In der vierten Stufe breitet sich der entstandene Makroriss aus, ehe beim Erreichen einer kritischen Risslänge von circa  $2/3$  des Querschnittes ein schlagartiges Versagen eintritt. (in Anlehnung an [30])

## Spannungsverteilung

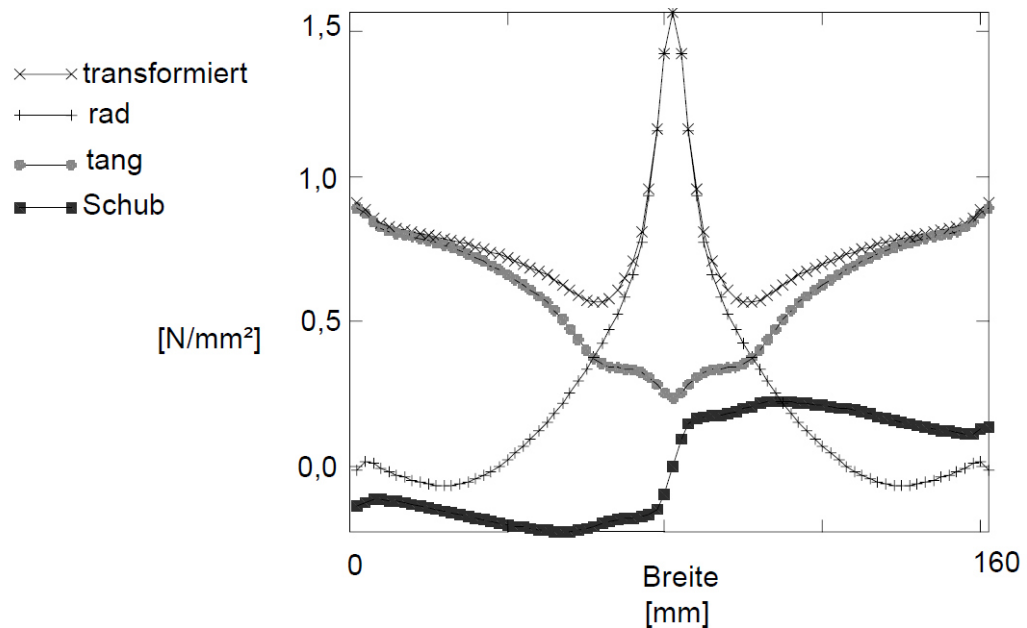


Abbildung 1-33 Spannungsverlauf in Brettschichtholz bei Querkzugbelastung [32]

Bei der Spannungsverteilung in Abbildung 1-33 ist zu erkennen, dass sich bei Querkzugbeanspruchung von Brettschichtholz auch Schubspannungen im Querschnitt aufbauen. Bei üblichen Querschnitten mit zum Mark symmetrischen Jahrringverlauf als Folge eines mehrstieligen Einschnittes zeigt sich die Maximalspannung von Querkzug und Schub im zentralen Querschnittsbereich und in der Höhe abhängig von der Jahrringkrümmung (vgl. Abbildung 1-24-rechts).

Somit kommt es neben den lokalen Schubkopplungseffekten innerhalb der Jahrringe (siehe Abbildung 1-25) auch zu globalen Schubkopplungseffekten innerhalb des auf Querkzug beanspruchten Volumens.



### 1-3.1.4 Brettsperrholz

Bei Brettsperrholz ist im Gegensatz zu Brettschichtholz neben dem seriellen Größeneffekt, auch ein paralleler zu beobachten, da mehrere Lamellen nebeneinander den Lasten gemeinsam Widerstand leisten.

#### Paralleler Größeneffekt

Der parallele Größeneffekt, also die Auswirkung der parallelen Aktivierung mehrerer Komponenten eines Systems, führt laut SCHICKHOFER [2] üblicherweise zu einer Erhöhung von Festigkeitskennwerten bei bestimmten Lastsituationen. Weiters unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Arten von Systemwirkungen, nämlich einer Systemwirkung durch Querverteilung der Einwirkungen und statistischen Systemeffekten.

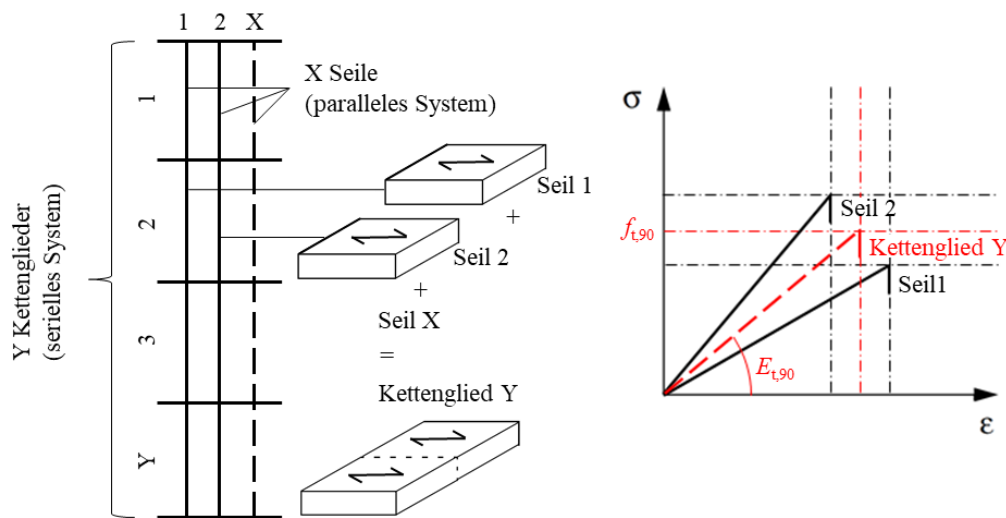


Abbildung 1-34 serielles, sub-paralleles System (in Anlehnung an [33] & [40])

Bei statistischen Systemeffekten kommt es laut SCHICKHOFER [2] zu einem „Ausgleich“ der Materialkennwerte (siehe Abbildung 1-34-rechts). Es ist unwahrscheinlich, dass beim Aneinanderfügen mehrerer Einzelkomponenten die jeweils „schlechten“ Elemente nebeneinander zu liegen kommen, vielmehr werden Elemente mit „schlechten“ Eigenschaften neben solchen mit „guten“ positioniert. Beim Versagen eines Elementes, werden die Belastungen auf die benachbarten Elemente umgelagert, was zu einer Erhöhung des Systemwiderstandes führt.

STUEFER [33] beschreibt das Systemverhalten in Anlehnung an MISTLER [41] anhand von einem Seilkettenmodell (siehe Abbildung 1-34-links). Dabei wirken Kettenglieder, bestehend selbst aus parallel angeordneten Seilen, seriell im System. Beim Versagen eines Seiles kommt es zur Lastumlagerung innerhalb eines Kettengliedes.

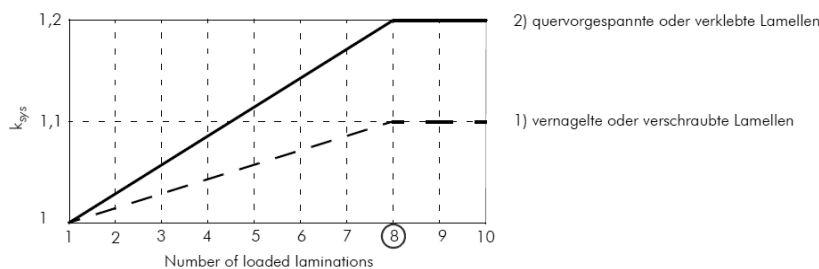


Abbildung 1-35 Systembeiwert  $k_{sys}$

ON B 1995-1-1 (2015) [39] empfiehlt in Tabelle NA.K.3 die Erhöhung der charakteristischen Querkzugfestigkeit von Brettsperrholz  $f_{t,90,k}$  mit einem Systembeiwert  $k_{sys}$  in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Lamellen. Die maximale Erhöhung beträgt lt. Abbildung 1-35 bei verklebten Lamellen 20 %.

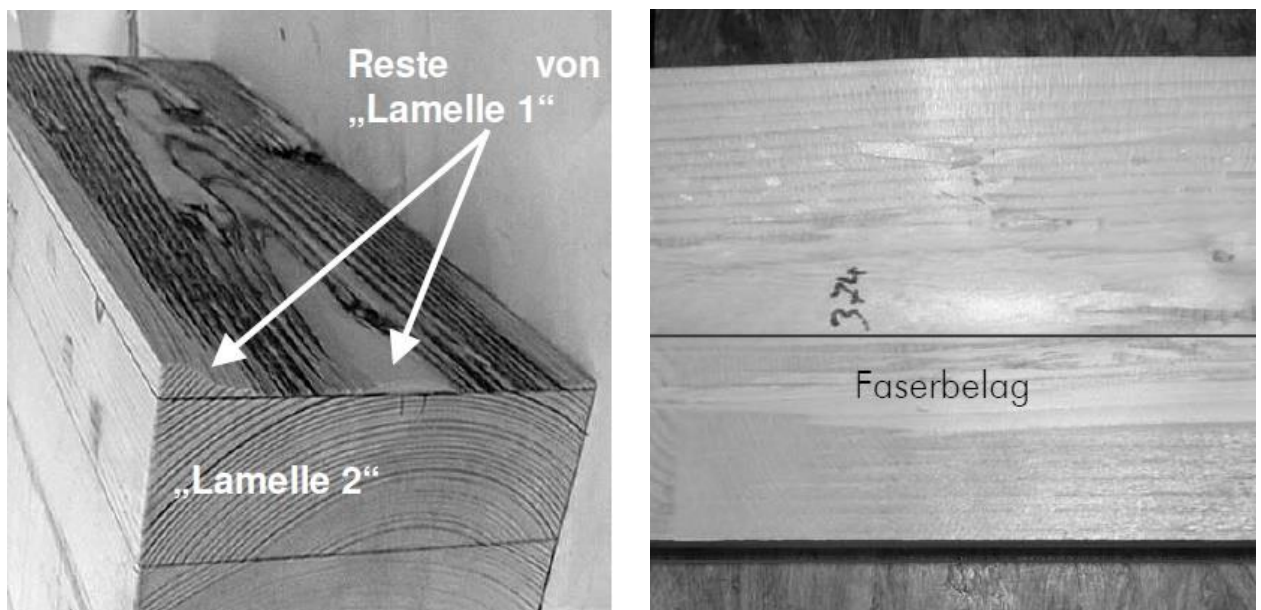


## 1-3.2 VERSAGENSARTEN

Grundsätzlich lassen sich die Brüche bei Zugprüfungen quer zur Faser in zwei Gruppen einteilen. DILL-LANGER [30] wie auch STUEFER [31] konnten bei der Untersuchung von Brettschichtholz „Interfacebrüche“, sowie „Lamellenbrüche“ feststellen. Bei der Untersuchung von Brettsperrholz können von BIDA KOV [42] dieselben Versagensmodi beobachtet werden.

### 1-3.2.1 Interfacebruch

Bei Interfacebrüchen versagt laut DILL-LANGER [30] das Holz in der Nähe der geklebten Fügungen zwischen den Lamellen, allerdings in keinem Fall in der Klebstoffschicht selbst. Jedenfalls ist bei dieser Versagensart an den Bruchflächen eine dünne Holzschicht beziehungsweise mindestens ein Holzfaserbelag zu erkennen.



**Abbildung 1-36**     *Interfacebruch*  
(links: DILL-LANGER [30]; rechts: STUEFER [31])

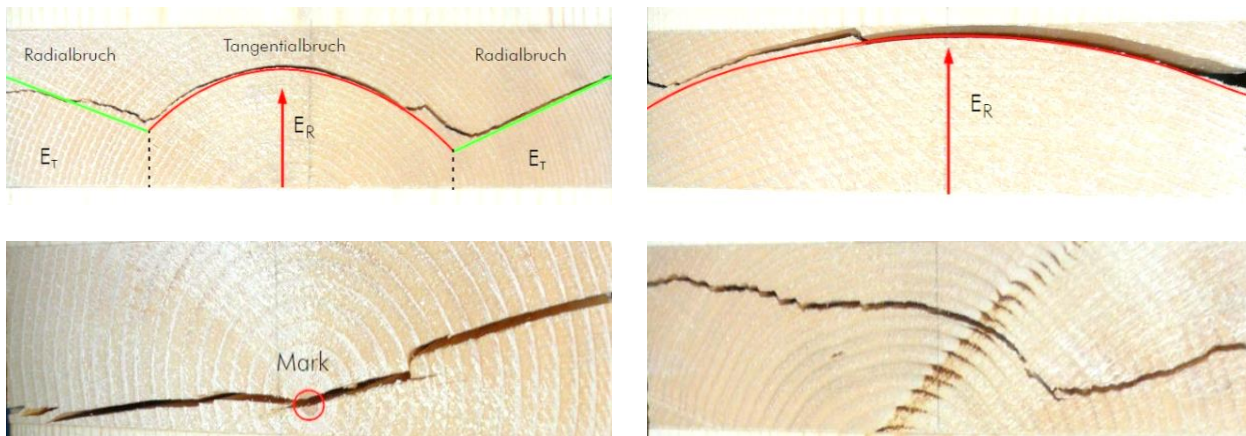
85 % aller BSH-Proben zeigten bei DILL-LANGER [30] die Charakteristik eines Interfacebruches. Er berichtet davon, wie auch STUEFER [31], dass der überwiegende Teil der Lamellen an der rechten, kernzugewandten Seite versagte. Letzterer erklärt diesen Sachverhalt mit einer inhomogeneren Spannungsverteilung auf der rechten Seite.

BIDA KOV [42] berichtet bei der Untersuchung von Brettsperrholz von Interfacebrüchen im Lasteinleitungsbereich als auch von Interfacebrüchen im Prüfkörper. Bei Brüchen im Prüfkörper ist der überwiegende Teil im Interface gebrochen.

### 1-3.2.2 Lamellenbruch

Nur rund 15 % der Proben zeigten bei DILL-LANGER [30] einen Lamellenbruch. Die Bruchfläche liege dabei innerhalb nur einer Lamelle und nicht in der Nähe eines Übergangs zwischen zwei Lamellen. Bei der Untersuchung von Brettsperrholz zeigt sich ein ähnliches Bild, da BIDA KOV [42] berichtet, dass er nur selten einen Bruch innerhalb nur einer Lamelle beobachten konnte.

STUEFER [31] konnte hingegen bei rund dreiviertel der Prüfkörper einen Lamellenbruch beobachten, was bei ihm eine weitere Untergliederung der Versagensarten ermöglichte.



**Abbildung 1-37 Lamellenbrüche nach STUEFER [31]**  
 (links oben: W-Bruch; rechts oben: Jahrringbruch  
 links unten: Kernbruch; rechts unten: Mischbruch)

Der *W-Bruch* ist nach der Form seiner Bruchansicht benannt, welche an ein ‚W‘ erinnert. In der Brettmitte reißt der Prüfkörper entlang eines Jahrringes. In den randnahen Bereichen reißt das Holz in radialer Richtung. Die Rissbildung beginnt laut STUEFER [31] in Brettmitte (vgl. „Bruchverhalten“ in 1-3.1.3) und breitet sich nach außen hin aus, wobei es durch eine Änderung der Steifigkeiten zu einer Richtungsänderung des Rissfortschrittes kommt. Der Bruchmodus basiert demnach auf der Differenz zwischen den beiden E-Moduln  $E_R$  und  $E_T$ .

Bei größerem Markabstand kann sich der Riss bis zum Rand hin tangential ausbreiten, es kommt zum *Jahrringbruch*. Der Riss findet in der Frühholzzone, im Übergangsbereich von Spätholz zu Frühholz statt. (vgl. Kapitel 1-3.1.1) Dies ist auf die geringere Festigkeit wie auch geringere Rohdichte gegenüber dem Spätholz zurückzuführen.

Beim *Kernbruch* stellt laut STUEFER [31] das Mark eine Schwachstelle dar, die einen spröden Radialbruch auslöst. Wie in Kapitel 1-3.1.2 erörtert wird, ist nicht nur die Markröhre eine Unstetigkeitsstelle, sondern der komplette Nahbereich (juveniles Holz) hat geringere Festigkeitseigenschaften.

Beim *Mischbruch* treten laut STUEFER [31] sowohl Bereiche auf, wo das Holz tangential bricht als auch Bereiche mit Radialbruch. Es kann sich dabei um verschiedene Kombinationen der vorhin genannten Bruchformen handeln. Meist entsteht Mischbrüche bei Prüfkörpern mit Ästen.

Weiters wird ein *gerader Bruch* bei flacher Jahrringlage erwähnt, der dieselben Charakteristika wie der Mischbruch aufweist.

### 1-3.3 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

Im Wesentlichen gibt es zwei Untersuchungen zu Querkzugverhalten von Brettspertholz. Georg STECHER [43] befasste sich im Zuge seiner Dissertation an der Universität Innsbruck mit der Berechnung der Tragfähigkeit und Verformung einfach gekrümmter Brettspertholzelemente. Dabei geht er auch umfangreich auf das Thema Querkzug sowie der Interaktion von Querkzug- und Schubspannungen ein. Neben der Herleitung mechanischer Zusammenhänge und einer Finiten Elemente Modellierung, führte er auch umfassende Laboruntersuchungen in Kooperation mit der Firma Holzbau Unterrainer durch. Der Fokus lag auf großflächigen Querkzugspannungen im Firstbereich gekrümmter Dachelemente.

Die zweite Untersuchung wurde im Rahmen der COST Action FP1402 / WG 2 von Andrii BIDA KOV [42] veröffentlicht.

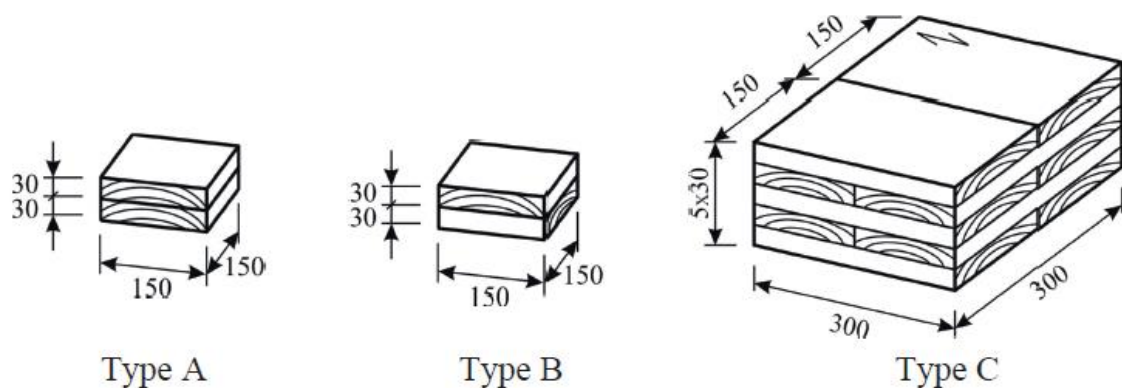


Abbildung 1-38 Prüfkfigurationen BIDA KOV [42]

BIDA KOV [42] prüfte laut Abbildung 1-38 drei Serien zu jeweils 25 Prüfkörpern. Dabei untersuchte er zweilagiges Brettschichtholz und zum Vergleich dazu zweischichtige kreuzweise verklebte Körper. Außerdem prüfte er einen fünfschichtigen Brettspertholzkörper (Type C) mit den Abmessungen  $150 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ . In allen drei Serien verwendete er Kiefernholz (*Pinus sylvestris L.*), welches nicht festigkeitssortiert war.

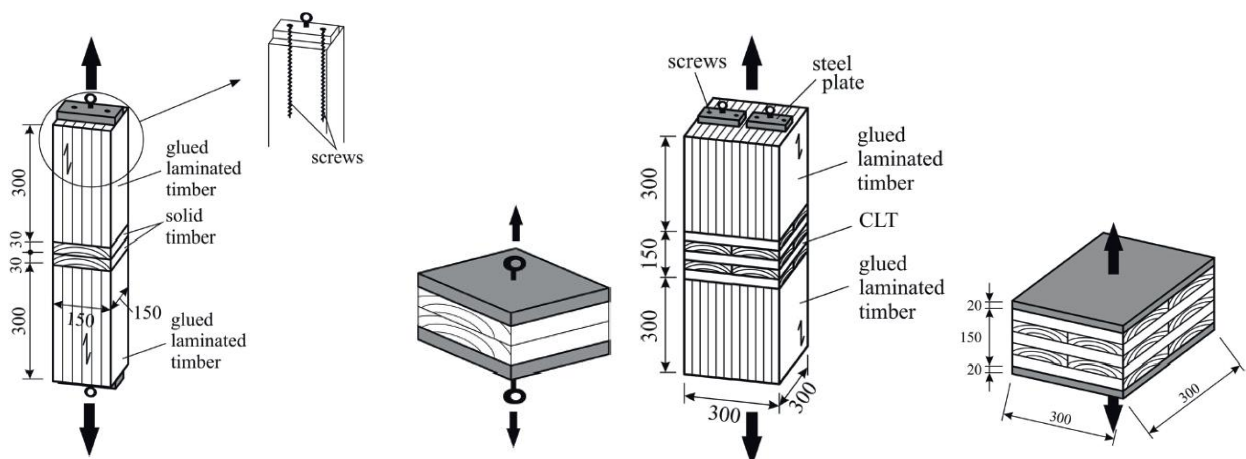


Abbildung 1-39 Prüfmethodik BIDA KOV [42]  
(links: 2 Methoden bei den Serien Type A und Type B; rechts: 2 Methoden bei Type C)

BIDA KOV [42] schreibt, die Prüfungen mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt zu haben: Einerseits verwendete er Brettschichtholz mit Faserrichtung in Lastrichtung zur Lasteinleitung und andererseits, als zweite Methode, zog er direkt aufgeklebte Stahlplatten mit, lt. Text, einer Dicke von 30 mm (lt. Skizze 20 mm) heran. Die Länge der hölzernen Lasteinleitungsblöcke waren sowohl bei den kleinen Versuchskörpern als auch bei der Brettspertholzserie 300 mm.

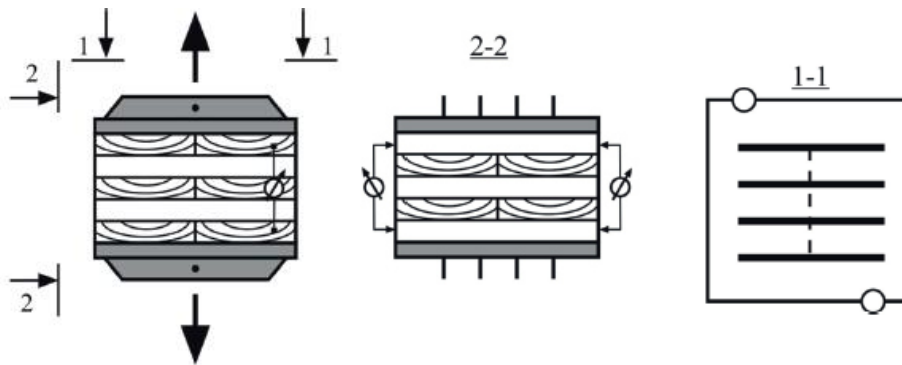


Abbildung 1-40 Messmethode BIDA KOV [42]

BIDA KOV [42] maß die Verformungen, wie in Abbildung 1-40 dargestellt, mit zwei Wegaufnehmern, die diagonal montiert waren. Die Belastung wurde mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,4 bis 0,8 mm/min aufgebracht, sodass die Maximalkraft  $F_{\max}$  gemäß EN 408 (2012) [44] innerhalb von  $300 \pm 120$  s erreicht wurde.

Tabelle 1 Ergebnisse für Querkzugfestigkeit bei Brettsperrholz (Type C) BIDA KOV [42]

Number [-]	Mean [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5%- percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standard deviation [N/mm <sup>2</sup> ]	COV [%]
25	1.43	0.56	2.11	0.65	0.46	32

In den Beschreibungen der Ergebnisse geht BIDA KOV [42] nicht darauf ein, mit welcher Prüfmethode (vgl. Abbildung 1-39-rechts) die 25 Prüfkörper in Tabelle 1 untersucht worden sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Prüfkörper mit direkt aufgeklebter Stahlplatte geprüft worden sind, da er schreibt, dass die meisten Exemplare in der Nähe der Lasteinleitungsfuge zwischen Stahlplatte und Brettsperrholzprüfkörper versagt haben.

Er schreibt weiter, dass das Bruchverhalten von der Jahrringlage abhängig ist und dass die Querkzugfestigkeit bei Prüfkörpern bei Brüchen mit tangentialer Belastung am höchsten ist. Prüfkörper mit Brüchen in radial belasteten Brettern zeigten den niedrigsten Wert für die Querkzugfestigkeit.

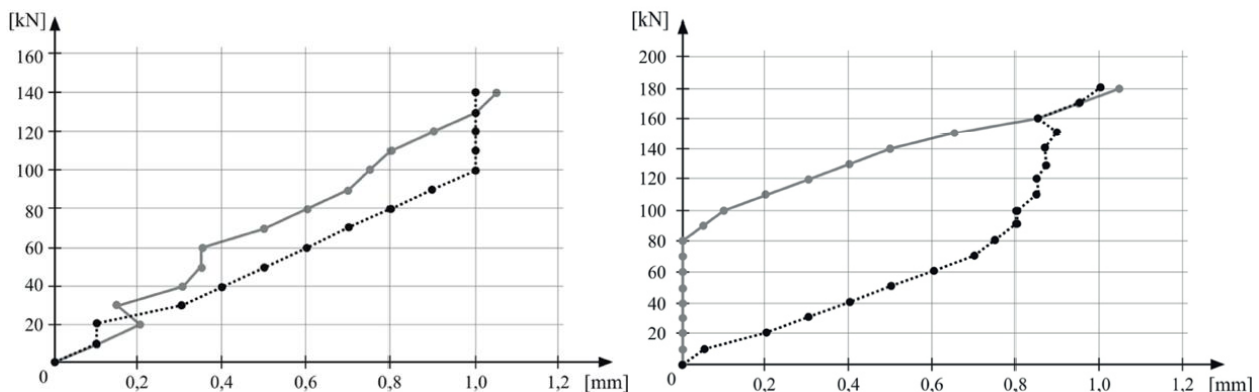


Abbildung 1-41 Kraft-Verformungsdiagramm bei Brettsperrholzprüfkörpern von BIDA KOV [42]

In Abbildung 1-41 zeigt BIDA KOV [42] Kraft-Verformungsdiagramme zweier Prüfkörper der Brettsperrholzserie (Type C). Die beiden Kurven je Diagramm stellen die Aufzeichnungen der Wegaufnehmer dar. Die Abweichungen dieser deuten auf intensives Risswachstum an einer Seite der Prüfkörper hin.

## 1-3.4 FORSCHUNGSFRAGEN

In den beiden vorliegenden Arbeiten, auf die in Kapitel 1-3.3 kurz eingegangen wurde, liegt keine systematische Untersuchung des Querkzugverhaltens von Brettsperrholz vor. Der Fokus von STECHER [43] liegt auf der Modellierung und Berechnung von gekrümmten Brettsperrholzplatten. Im Zuge dessen geht er auf geometrisch bedingte großflächige Querkzugspannungen im Firstbereich von Bogenelementen ein.

BIDAKOV [42] legt seinen Schwerpunkt auf die Untersuchung von Querkzug auf Brettsperrholz, wobei nur eine einzelne Serie geprüft wird. Somit können die vorliegenden Ergebnisse nur bedingt eingeordnet und verglichen werden.

In dieser Arbeit wird das Querkzugverhalten von Brettsperrholz anhand von mehreren verschiedenen Serien systematisch untersucht. Dazu wird die Gültigkeit des im Brettschichtholz beobachtbaren seriellen Größeneffektes überprüft. Ergänzend dazu soll geprüft werden, ob ein paralleler Größeneffekt, zufolge Systemwirkung mehrerer benachbarter Lamellen, vorliegt. Weiters soll auch die Auswirkung des Schichtaufbaus, ferner der Schichtstärken, auf die Querkzugfestigkeit von Brettsperrholz validiert werden. Zudem wird auch ein Vergleich mit dem Querkzugverhalten von Brettschichtholz angestellt.

Der serielle Größeneffekt soll anhand mehrerer Serien mit verschiedener Schichtanzahl aber nur einer Lamelle je Schicht untersucht werden. Der parallele Größeneffekt wird mit einer Serie an fünfschichtigem BSP mit je Lage zwei Lamellen validiert. Anhand einer weiteren Serie aus Lagen mit maximaler Differenz in den Schichtstärken will man den Einfluss des Aufbaus von BSP auf die Querkzugkenngrößen herausfinden. Eine Vergleichsserie aus Brettschichtholz soll mögliche Unterschiede zwischen der unidirektionalen und orthogonalen Schichtung aufzeigen. Alle Untersuchungen werden durch Lastaufbringung rechtwinkelig zur Plattenebene durchgeführt.

Zu Beginn der Untersuchungen sollen anhand der Finiten Elemente Methode auf Basis vereinfachter Modellierungen die Fragestellungen theoretisch behandelt und daraus folgend die Prüfserien definiert werden. Darauffolgend sollen die Prüfungen, sowie die Prüfkonfigurationen geplant werden, ehe auf die Produktion der Prüfkörper eingegangen wird. Nach der erfolgreichen Durchführung der Prüfungen sollen die Auswertemethodik sowie die Versagensarten erörtert werden. Der statistischen Auswertung der empirischen Prüfdaten folgen eine Diskussion der Ergebnisse und eine Konklusion aus der Arbeit.



# KAPITEL 2: MATERIAL UND METHODEN

## 2-1 FINITE ELEMENTE MODELL UND SERIENDEFINITION

Es wurde ein Finite Elemente Modell im Programm RFEM der Firma Dlubal (Version 5.18) erstellt. Das Modell wurde für qualitative Voruntersuchungen herangezogen. Eine quantitative Untersuchung ist beim inhomogenen Werkstoff Holz kaum möglich, da u.a. die Literaturangaben der Berechnungsparameter stark streuen.

Im Rahmen der Ausführungen in diesem Kapitel sollen folgende vier Fragestellungen erörtert werden:

- (i) Wie wird eine möglichst homogene Lasteinleitung in den Prüfkörpern gewährleistet?
- (ii) Wie wirkt sich eine orthogonale Schichtanordnung auf die Spannungsverteilung aus?
- (iii) Wie wirkt sich eine Schichtstärkenvariation auf die Spannungsverteilung aus?
- (iv) Wie wirkt sich eine Änderung des Probenvolumens auf die Spannungsverteilung aus?

Auf dieser Basis werden verschiedene Lasteinleitungsmöglichkeiten in den Prüfkörper verglichen und die Erkenntnisse in die Prüfplanung übernommen. Weiter wird das Querzugverhalten von Brettschichtholz und Brettsperrholz gegenübergestellt und dessen Sperreffekte erörtert. Ferner werden für Deckenbauteile übliche Schichtaufbauten gegenübergestellt und diskutiert, welche Aufbauten prüftechnisch untersucht werden sollen. Schlussendlich wird ein Modell mit vierfacher Grundfläche implementiert und untersucht, wie sich das geänderte Volumen auf die Spannungsverteilung im Prüfkörper auswirkt.

### 2-1.1 EINGANGSPARAMETER

#### 2-1.1.1 Koordinatensystem

Für die Implementierung des Modells wurde mit dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystemen gearbeitet. Eine zweidimensionale Modellierung ist in den vorliegenden Untersuchungen nicht möglich, da das Gesamtmodell inklusive der Lasteinleitungsblöcke drei verschiedene Holzfaserausrichtungen aufweist.

**Tabelle 2** *Materialrichtungen im FEM Modell*

Lasteinleitungsblock	Längslagen	Querlagen
X = x = radial	X = x = longitudinal	X = y = tangential
Y = y = tangential	Y = y = tangential	Y = -x = longitudinal
Z = z = longitudinal	Z = z = radial	Z = z = radial

Die Großbuchstaben in Tabelle 2 definieren die globalen Koordinatenachsen, wobei Z nach *oben* positiv ausgerichtet ist. Die lokalen Koordinatensysteme der Lasteinleitungsblöcke sowie der Längslagen entsprechen dem globalen Koordinatensystem. Die lokalen Koordinatensysteme der Querlagen sind um 90° um die Z-Achse gedreht, sodass die lokalen, richtungsabhängigen Holzeigenschaften jenen der Längslagen entsprechen.

Auf die Holzorientierung wird laut FEICHTER [45] mit einem kartesischen Koordinatensystem kein Einfluss genommen. Das technische Material entspricht einem Seitenbrett, das vom Mark weit entfernt liegt. Auf eine Modellierung mit Zylinderkoordinaten wurde verzichtet, da die Literaturangaben für die Querdehnzahlen viel stärker streuen, als der Einfluss verschiedener Koordinatensysteme beträgt.

## 2-1.1.2 Belastung und Modellierung

Das erarbeitete Modell wird mit einer Flächenlast  $F_z = 0,5 \text{ N/mm}^2$  belastet, was der normativen charakteristischen Querkzugfestigkeit von Brettspertholz entspricht (vgl. [14]). Gelagert wird das Modell mit zwei Linienlagern und einer Flächenlagerung. Bei einem Linienlager sind alle Verschiebungen  $u_x$  gesperrt, beim zweiten alle Verschiebungen  $u_y$ . Beim Flächenlager sind die vertikalen Verschiebungen  $u_z$  behindert. Durch diese Methode sollen Zwangungen im Widerlager minimiert werden.

Auf eine Modellierung der Klebefuge wird verzichtet, da nach den Vergleichsrechnungen von DILL-LANGER [30], aufgrund des extremen Verhältnisses von Leimfugendicke zu Brettstärke, kein relevanter Einfluss einer wirklichkeitsgetreu modellierten Leimfuge auf das betrachtete makroskopische Spannungs- und Dehnungsfeld auftritt. Demnach werden die einzelnen Holzquerschnitte in einer Vereinfachung starr miteinander verbunden.

Das FE-Netz hat eine angestrebte Länge der Finiten Elemente von  $l_{FE} = 10 \text{ mm}$ . Auf Netzverdichtungen in Randbereichen wurde verzichtet, um Singularitäten in der Berechnung nicht zu verstärken.

## 2-1.1.3 Materialparameter

Um ein FEM-Modell erstellen zu können, benötigt man realitätsnahe Materialparameter. Dies stellt sich in der Anwendung als schwierig heraus, da die Literaturangaben für den inhomogenen Werkstoff sehr stark streuen. Die starke Streuung ist häufig auch auf verschiedene Bestimmungsmethoden der Parameter zurückzuführen.

**Tabelle 3** verwendete Materialparameter für Prüfkörper im FEM-Modell

$E_L = E_1 = E_x = 12600 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{LR} = G_{12} = G_{xz} = 640 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{RL} = \nu_{21} = \nu_{zx} = 0,034 \text{ [-]}$
$E_R = E_2 = E_z = 880 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{LT} = G_{13} = G_{xy} = 580 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{TL} = \nu_{31} = \nu_{yx} = 0,014 \text{ [-]}$
$E_T = E_3 = E_y = 380 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{RT} = G_{23} = G_{yz} = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{RT} = \nu_{23} = \nu_{zy} = 0,580 \text{ [-]}$

Die Materialparameter in Tabelle 3 wurden verwendet, um das dreidimensionale, orthotrope, elastische Materialmodell zu definieren. Die Werte für die E-Moduln entsprechen den gerundeten Werten aus der Arbeit von TRIPOLT [46]. Die Werte für die Schubmoduln stammen von den Versuchen von DAHL [47], wobei der Rollschubmodul  $G_{RT}$  nach der Bedingung von EHRHART [48] wie folgt adaptiert wurde:

$$G_{R,\text{mean}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 30 + 17,5 \frac{w_1}{t_1} \\ 100 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Dabei sind:

$w_1$  ..... Brettbreite [mm]

$t_1$  ..... Brettstärke [mm]

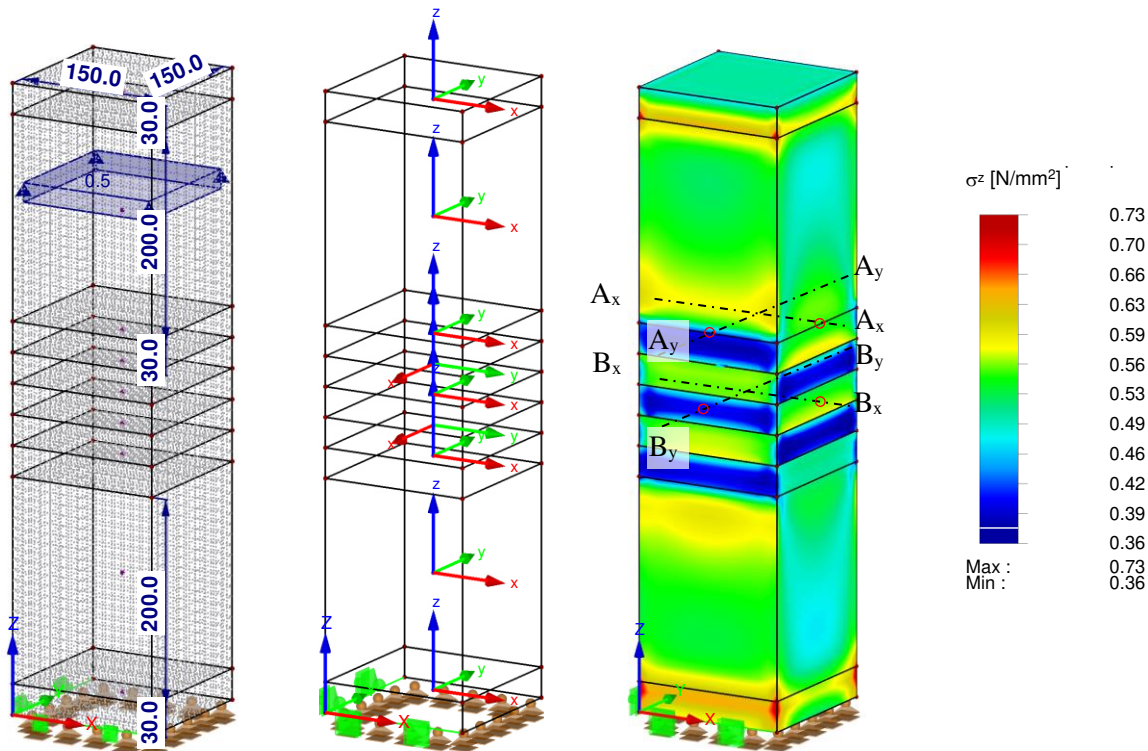
Die Werte für die Querdehnzahlen wurden an die Arbeit von TRIPOLT [49] angelehnt, aus denen sich RFEM über die Beziehungen mit den E-Moduln die restlichen drei Querdehnzahlen ermittelt.

$$\nu_{xz} = \frac{E_x}{E_z} \cdot \nu_{zx} \quad \text{und} \quad \nu_{xy} = \frac{E_x}{E_y} \cdot \nu_{yx} \quad \text{und} \quad \nu_{yz} = \frac{E_y}{E_z} \cdot \nu_{zy} \quad (2.2)$$

Die Beziehungen der Querdehnzahlen basieren auf drei Symmetriebedingungen der Nachgiebigkeitsmatrix für orthotropes Material (siehe Formel (1.1) in den Studienblättern von BOGENSGBERGER [9]). Die restlichen drei Querdehnzahlen für das Material des Prüfkörpers ergeben sich somit zu  $\nu_{xz} = 0,487$ ,  $\nu_{xy} = 0,464$  und  $\nu_{yz} = 0,250$ . Diese Werte wurden nach der Berechnung in RFEM mit den Werten verschiedener Autoren in TRIPOLT [49] auf Plausibilität überprüft.

### 2-1.1.4 Implementierung

Nach der erfolgten Definition der Materialparameter konnte das Modell in RFEM implementiert und für verschiedene Fragestellungen adaptiert werden.



**Abbildung 2-1** *implementiertes 5 schichtiges BSP FEM-Modell inkl. beidseitigen (oben und unten) Lasteinleitungsblöcken aus Holz und aufgeschraubter Platte aus Stahl als Basis für die Anbindung zum Prüfgerüst (links: Netz, Belastung und Lagerung, Bemaßung [mm]; mittig: Koordinatensysteme; rechts: Querzugspannungen  $\sigma_z$  und Schnittdefinition)*

In Abbildung 2-1 ist das fertige FEM-Modell am Beispiel eines fünfschichtigen Brettsperrholzaufbaues dargestellt. Die Last wird dabei über eine starr aufgebrachte Stahlplatte in den Lasteinleitungsblock weitergeleitet, ehe sie in den Prüfkörper eingeleitet wird. Lokale Spannungsspitzen im Übergangsbereich zwischen Stahlplatte und Lasteinleitungsblock sowie im Bereich des Widerlagers sind nicht von primärem Interesse. Der Fokus liegt bei den Spannungsverteilungen in den Prüfkörpern, sowie in der Fuge zwischen Lasteinleitungsblock und Prüfkörper.

Die Schnitte A-A verlaufen in der Lasteinleitungsfuge, wobei die Indizes für die lokalen Koordinatenrichtungen der ersten Lage des Prüfkörpers stehen. Die Schnitte B-B verlaufen durch das Zentrum der Mittellage, wobei die Indizierung gleich wie bei den Schnitten A-A stattgefunden hat.



## 2-1.2 VARIATION DES LASTEINLEITUNGSBLOCKES

Um eruieren zu können, welches Material sich am besten zur Lasteinleitung in den Prüfkörper eignet, wurde eine Variantenstudie durchgeführt. In Betracht kamen dazu Holzarten mit verschiedenen Steifigkeiten sowie eine stählerne Lasteinleitung.

### 2-1.2.1 Lasteinleitungsblock Fichte GL24h

Für die Implementierung des Modells mit einem Lasteinleitungsblock aus Fichte wurden die Materialparameter für Brettschichtholz GL24h aus RFEM übernommen. Auf eine Differenzierung der radialen und tangentialen Holzeigenschaften wurde hierbei verzichtet.

**Tabelle 4** *Materialparameter Lasteinleitungsblock Fichte GL24h*

$E_z = 11500 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{xz} = 650 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{zx} = 0,462 \text{ [-]}$	$\nu_{xz} = 0,012 \text{ [-]}$
$E_x = 300 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{yz} = 650 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{yx} = 0,398 \text{ [-]}$	$\nu_{xy} = 0,398 \text{ [-]}$
$E_y = 300 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{xy} = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{zy} = 0,534 \text{ [-]}$	$\nu_{yz} = 0,007 \text{ [-]}$

Die Querdehnzahlen  $\nu_{zx}$ ,  $\nu_{yx}$  und  $\nu_{zy}$  in Tabelle 4 wurden nach den Recherchen von TRIPOLT [46] angepasst. Die restlichen drei Querdehnzahlen wurden von RFEM aus den Beziehungen der Formel (2.2) abgeleitet.

Es wurde auch ein Modell mit Lasteinleitungsblöcken aus Pappelholz (*Populus spp.*) untersucht. Aufgrund der ähnlichen Materialeigenschaften wie Fichtenholz wurde diese Variante jedoch nicht weiterverfolgt.

### 2-1.2.2 Lasteinleitungsblock Buche GL75

Die Materialparameter für die Untersuchung eines buchenen Lasteinleitungsblocks wurden, wie auch schon jene für den aus Fichte, aus der Datenbank des FE-Programmes entnommen. Auf eine getrennte Betrachtung in radialer und tangentialer Holzrichtung wurde wiederum verzichtet.

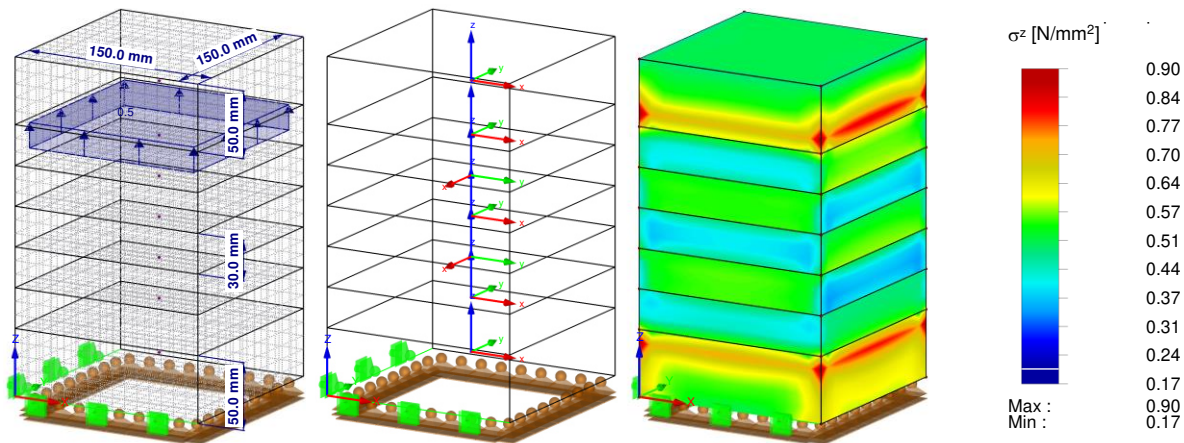
**Tabelle 5** *Materialparameter Lasteinleitungsblock Buche*

$E_z = 16800 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{xz} = 850 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{zx} = 0,270 \text{ [-]}$	$\nu_{xz} = 0,008 \text{ [-]}$
$E_x = 470 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{yz} = 850 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{yx} = 0,640 \text{ [-]}$	$\nu_{xy} = 0,640 \text{ [-]}$
$E_y = 470 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$G_{xy} = 85 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$\nu_{zy} = 0,240 \text{ [-]}$	$\nu_{yz} = 0,007 \text{ [-]}$

Die Querdehnzahlen  $\nu_{zx}$ ,  $\nu_{yx}$  und  $\nu_{zy}$  in Tabelle 5 wurden nach den Untersuchungen von HERING [50] angepasst. Die restlichen drei Querdehnzahlen wurden von RFEM aus den Beziehungen der Formel (2.2) abgeleitet.

### 2-1.2.3 Lasteinleitungsblock Stahl

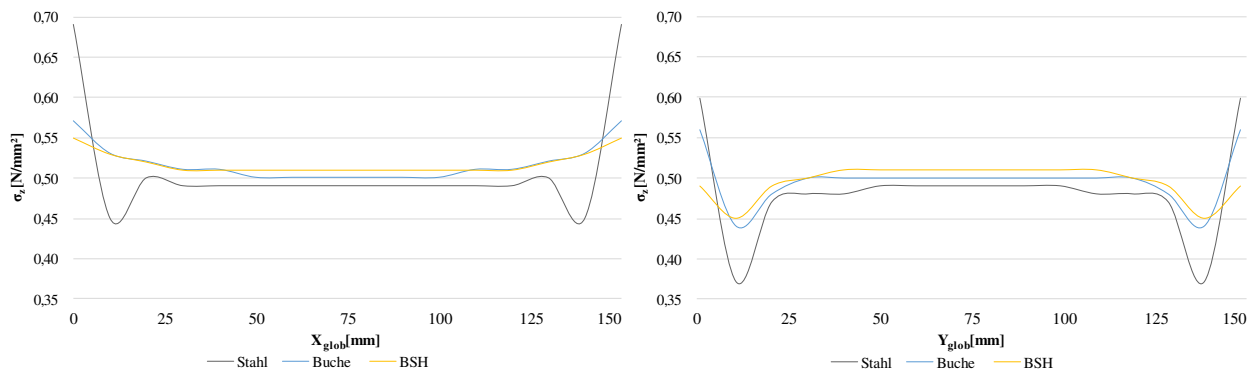
Mit dieser Untersuchung wurde eruiert, wie sich eine direkte, starre Montage einer stählernen Lasteinleitungsplatte auf den Prüfkörper und auf die Spannungsverteilung in der Lasteinleitungsfuge auswirkt. Diese Modellierung sollte aufgeklebten Lasteinleitungsplatten nahekommen. Für die Implementierung wurden die Materialparameter für Baustahl S235 aus der Datenbank von RFEM für isotrop linear elastisches Material übernommen. Dabei beträgt der E-Modul  $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ , der Schubmodul  $G = 80.769 \text{ N/mm}^2$  und die Querdehnzahl  $\nu = 0,3 \text{ [-]}$ .



**Abbildung 2-2** implementiertes Modell zur Untersuchung einer stählernen Lasteinleitung  
 (links: Netz, Belastung und Lagerung, Bemaßung [mm]; mittig: lokale Koordinatensysteme,  
 rechts: Querspannungen  $\sigma_z$ )

### 2-1.2.4 Auswertung

Zur Entscheidungsfindung wurden die Werte der Schnitte (siehe Abbildung 2-1-rechts) in MS EXCEL importiert und in Diagrammen vergleichend dargestellt. Für eine bessere Darstellung und Interpretation wurden die Datenpunkte interpoliert und mit Linien verbunden.



**Abbildung 2-3** Querspannungsverteilung mit verschiedenen Lasteinleitungsblöcken  
 (links: in Schnitt  $A_x - A_x$ ; rechts: Schnitt  $A_y - A_y$ )

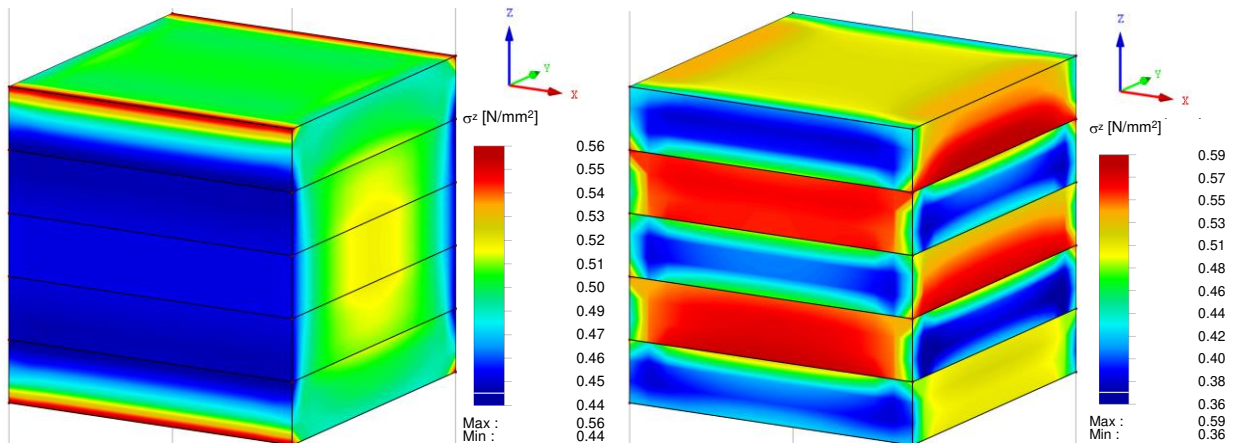
Auf Basis der dargestellten Ergebnisse in Abbildung 2-3 fiel die Entscheidung auf Lasteinleitungsblöcke aus Brettchichtholz GL24h. Aufgeklebte stählerne Lasteinleitungsblöcke sind aufgrund hoher Steifigkeitsunterschiede zum Prüfkörper nicht empfehlenswert. Dies würde zu hohen Spannungsspitzen in den Randbereichen führen, was wiederum in einem vorzeitigen Versagen und somit mit einer Unterschätzung der Quersugfestigkeit  $f_{t,90}$  resultieren würde.

Lasteinleitungsblöcke aus Buchenholz sind jenen aus Fichte-Brettchichtholz ebenso nicht vorzuziehen. Die höhere Steifigkeit führt wiederum zu höheren Spannungen im Randbereich, als bei der Variante mit Brettchichtholz GL24h.

Somit wird die Fragestellung (i) in Kapitel 2-1 folgendermaßen beantwortet: Eine möglichst homogene Lasteinleitung in den Prüfkörper wird, unter Berücksichtigung der untersuchten Varianten, mit stehend aufgeklebtem (Z = longitudinal) Brettchichtholz aus Fichte gewährleistet.

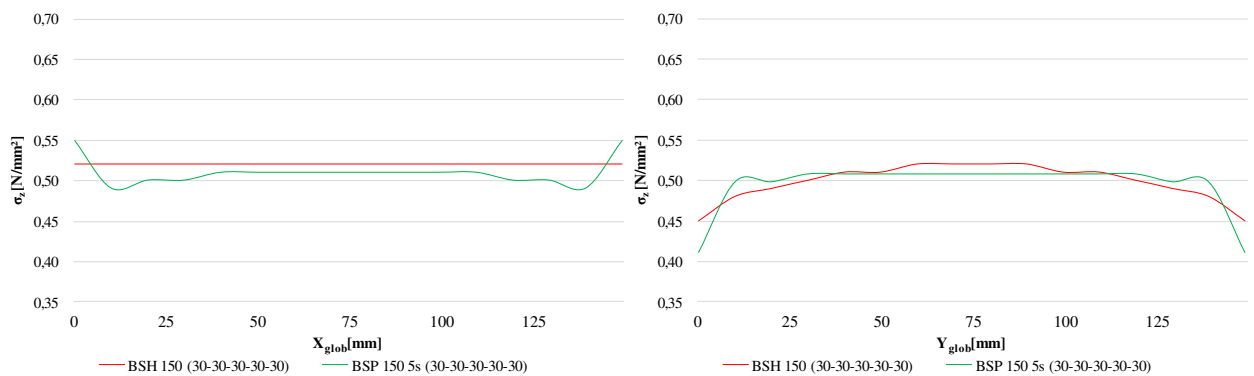
## 2-1.3 EINFLUSS ORTHOGONALER SCHICHTUNG

Um den Einfluss kreuzweiser Schichtung auf die Querspannungen abbilden zu können, wurde ein Modell mit unidirektionaler Schichtung, einem Modell mit orthogonaler Schichtung gegenübergestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Einfluss der Querdehnzahlen. Holzanatomisch bedingte, lokale Spannungsspitzen (vgl. Kapitel 1-3.1.2) werden in diesen Modellen aufgrund der Verwendung kartesischer Koordinatensysteme nicht dargestellt. Die Implementierung des Brettschichtholzmodells erfolgte mit denselben Eingangsparametern wie in Kapitel 2-1.1 für Brettsperrholz dargestellt wurde. Sinngemäß gelten auch die Illustrationen in Abbildung 2-1, wenn man beachtet, dass die lokalen Koordinatensysteme aller Schichten unidirektional ausgerichtet werden.



**Abbildung 2-4** Einfluss orthogonaler Schichtung auf die Querspannung  $\sigma_z$   
(links: unidirektional verklebtes Holz; rechts: orthogonal verklebtes Holz)

In Abbildung 2-4 ist deutlich zu erkennen, dass die Schichtrichtungsabfolge einen starken Einfluss auf die Spannungsverteilung innerhalb des Prüfkörpers hat. Die gesperrte negative Querdehnung (Stauchung) wird unter dem Begriff *Sperreffekt* zusammengefasst.



**Abbildung 2-5** Gegenüberstellung der Querspannungen BSH – BSP  
(links: Schnitt  $B_x - B_x$ ; rechts: Schnitt  $B_y - B_y$ )

In Abbildung 2-5-rechts ist zur erkennen, dass es bei Brettschichtholz in Querrichtung zu einer Spannungsakkumulation im Zentrum des betrachteten Volumens kommt. Dieses Verhalten wird je nach Jahrringlage und Jahrringkrümmung (vgl. Kapitel 1-3.1.3) aufgrund von Spannungsspitzen in marknahen Bereichen teils stark verstärkt.

## 2-1.4 VARIATION DER SCHICHTAUFBAUTEN

Um den Einfluss verschiedener Schichtaufbauten auf die Querkzugspannungen validieren zu können, wurden Untersuchungen an Standard-Plattentypen angestellt. Hierbei wurden Schichtaufbauten gewählt, die alle fünf großen österreichischen Brettsperrholzproduzenten<sup>1</sup> mit längsorientierter Decklage im Sortiment haben. Dies hat den Hintergrund, dass Querkzugspannungen im Brettsperrholz primär in Dach- und Deckenelementen (vgl. Kapitel 1-2) auftreten. Im Regelfall sind bei diesen Bauteiltypen die Decklagen längs orientiert.

Die verschiedenen Plattentypen wurden folglich festgelegt zu:

- 120 3s (40-40-40)
- 100 5s (20-20-20-20-20)
- 140 5s (40-20-20-20-40)
- 160 5s (40-20-40-20-40)
- 180 5s (40-30-40-30-40)
- 200 5s (40-40-40-40-40)
- 240 7ss (40-40-20-40-20-40-40)

Den siebenschichtigen Aufbau mit 240 mm Dicke und doppelter Decklage bietet die Firma Binderholz mit dem Schichtaufbau (30-30-40-40-40-30-30) an. Auf eine separate Untersuchung dieses Plattentyps wird verzichtet.

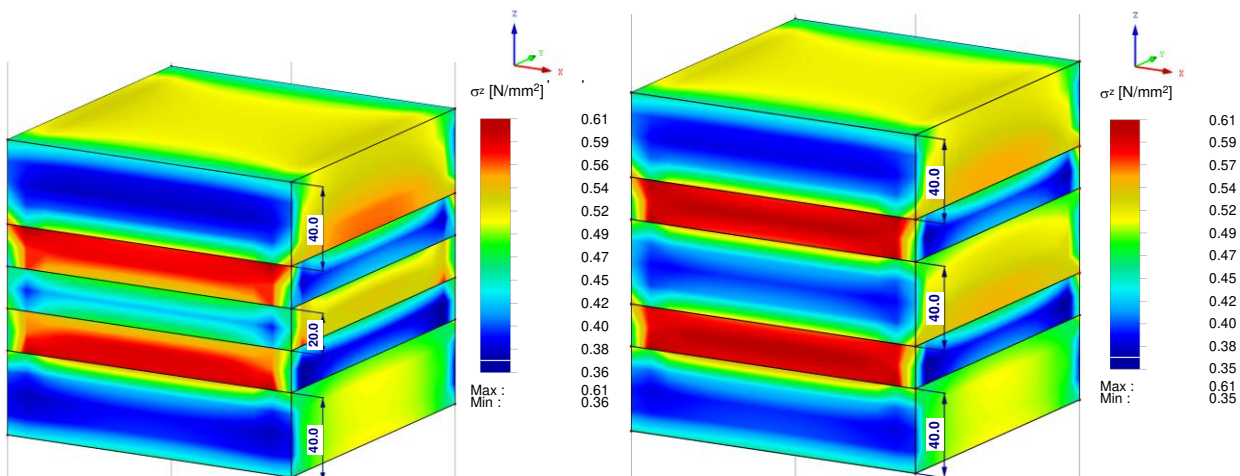
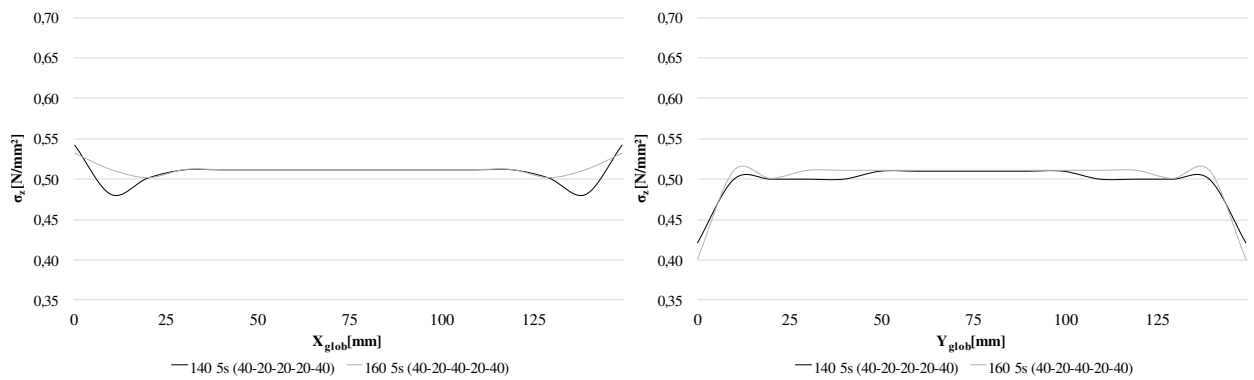


Abbildung 2-6 Einfluss der Schichtstärken von BSP auf die Querkzugspannungen am 3D Modell (links: BSP 140 5s (40 20 20 20 40); rechts: BSP 160 5s (40 20 40 20 40))

In Abbildung 2-6 sind zwei BSP Aufbauten mit maximal abweichender Mittellagenstärke gegenübergestellt. Man sieht deutliche Unterschiede der Spannungsverteilung aufgrund variierender Schichtstärken. Wie auch bei der Untersuchung des Einflusses orthogonaler Schichtung wird auch hier darauf hingewiesen, dass aufgrund der Modellierung keine anatomischen, lokalen Holzeigenschaften berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der restlichen Plattentypen werden im Anhang B-1 in Form von 3D Volumenkörpern dargestellt.

<sup>1</sup> Binderholz, Hasslacher Norica Timber, KLH, Mayr-Melnhof, Stora Enso (alphabetisch geordnet)



**Abbildung 2-7** Einfluss der Schichtstärken von BSP auf die Querkzugspannungen in der Mittellamelle  
(links: Schnitt  $B_x - B_x$ ; rechts: Schnitt  $B_y - B_y$ )

In Abbildung 2-7 werden die Querkzugspannungen der Plattenaufbauten mit maximalem Schichtstärkenunterschied der Mittellamelle aus Abbildung 2-6 dargestellt. Es wird verdeutlicht, dass die Schichtstärken Einfluss auf die Querkzugsspannungen haben. Bei dünneren Schichten treten demzufolge in Längsrichtung ( $X_{glob}$ ) lokale Spannungsspitzen in randnahen Bereichen auf.



## 2-1.5 ÄNDERUNG DES PROBENVOLUMENS

Zur Untersuchung, wie sich ein geändertes Probenvolumen auf die Querzugspannungen auswirkt, wurde ein 4-knotiges Modell, sprich zwei Brettabschnitte nebeneinander, implementiert. Zwischen den Brettabschnitten gibt es eine Fuge von 5 mm. Dies soll gewährleisten, dass die Abschnitte separat betrachtet werden können. Das Modell hat eine Grundfläche von 300 mm × 300 mm. Im Übrigen gelten die Eingangsparameter des Kapitels 2-1.1.

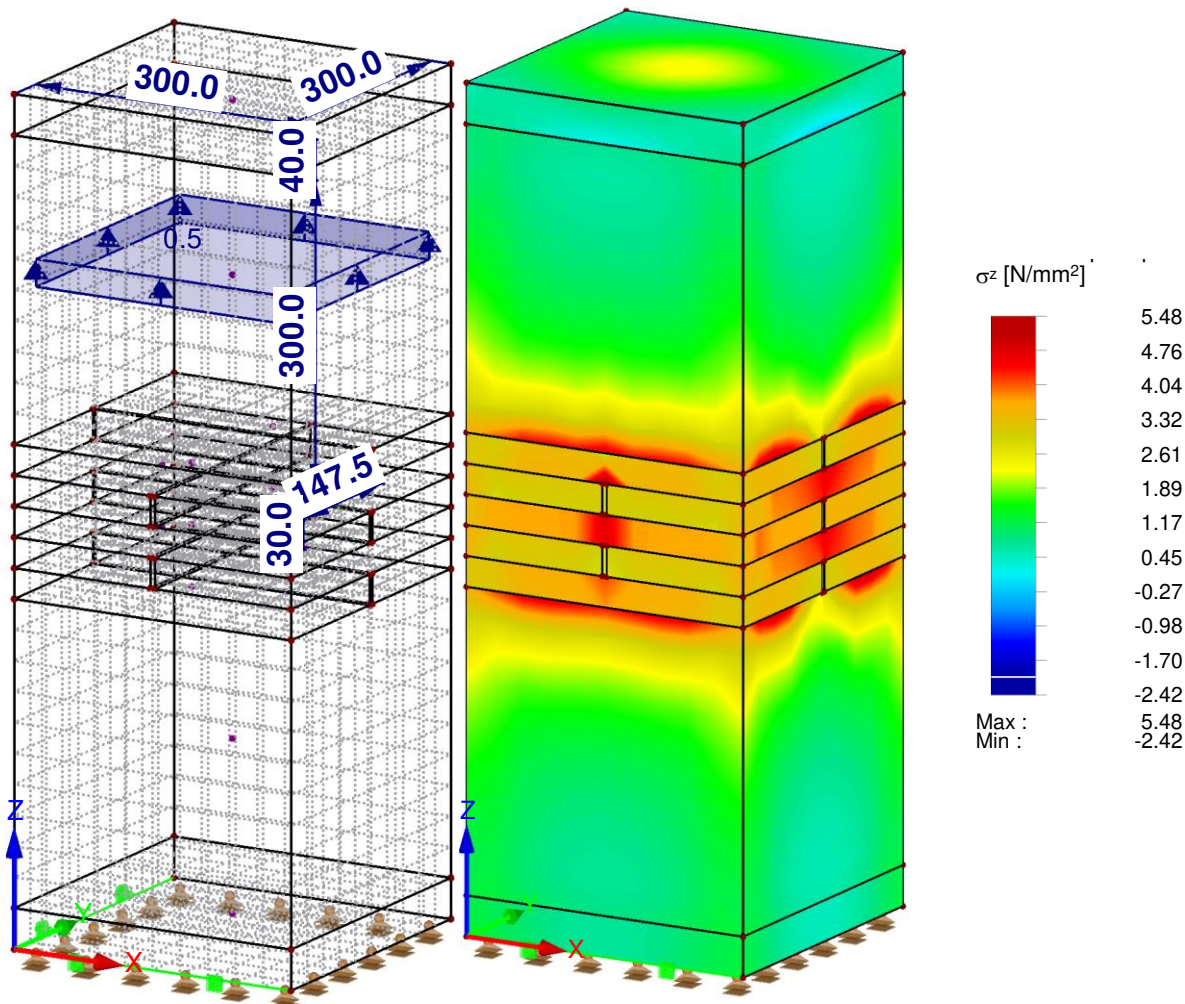


Abbildung 2-8 Änderung des Probenvolumens FEM-Modell  
 (links: Netz, Belastung und Lagerung [mm]; rechts: Querzugspannungen  $\sigma_z$ )

In Abbildung 2-8 ist zu erkennen, dass es entlang der Brettlängsfugen zu lokalen Spannungsspitzen und somit zu einer anderen Spannungsverteilung kommt als bei einem einknotigen System (vgl. Abbildung 2-4-rechts). Diesen Beobachtungen stehen in der realen Versuchsdurchführung Einflüsse der Jahrringlage und jenen von Systemeffekten (vgl. Kapitel 1-3.1.4) gegenüber.

Die starr verbundenen, stählernen Lasteinleitungsplatten oben und unten am Modell haben defacto auf die Spannungsverteilungen im Brettsperrholz keinen Einfluss. Dies wurde am Rande im Rahmen einer Variantenstudie untersucht.

## 2-1.6 DEFINITION DER PRÜFSERIEN

Auf Basis der Untersuchungen mittels Finite Elemente Methode wurden die Prüfkonfiguration, sowie auch die Prüfserien definiert.

*Tabelle 6 Definition der Prüfserien*

Serienname	Schichtaufbau [mm]	Serienumfang [Stk.]
<b>Serie 1 (1s)</b>	30	40
<b>Serie 2 (5sGL)<sup>1</sup></b>	30 30 30 30 30	21
<b>Serie 3 (3sCL)<sup>2</sup></b>	30 30 30	20
<b>Serie 4 (5sCL)</b>	30 30 30 30 30	21
<b>Serie 5 (7sCL)</b>	30 30 30 30 30 30 30	21
<b>Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	30 30 30 30 30	20
<b>Serie 7 (5sVL)<sup>3</sup></b>	40 20 40 20 40	20
		∑ 163

Durch den Vergleich der Serien 1, 3, 4 und 5 kann der Einfluss des seriellen Volumeneffektes (vgl. Kapitel 1-3.1.3) auf die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  von Brettsperrholz untersucht werden. Mit den Serien 2 und 4 wird der Einfluss orthogonaler Schichtung auf die Festigkeit quer zur Faser betrachtet. Mit Serie 6 vs. Serie 4 wird ein paralleles System betrachtet, was Rückschlüsse auf ein mögliches Systemverhalten erlauben soll. Abschließend wird mit Serie 7 vs. Serie 4 auf den Einfluss unterschiedlicher Schichtstärken auf den Materialwiderstand bei Zugbelastungen quer zur Faser eingegangen.

Nach der Untersuchung verschiedener Lasteinleitungsblöcke fiel die Entscheidung auf Fichtenbrettschichtholz GL24h mit 200 mm Länge, das mit einem Faserverlauf parallel zur Z-Achse auf den Prüfkörper aufgeklebt wird.

---

<sup>1</sup> Glued Laminated Timber

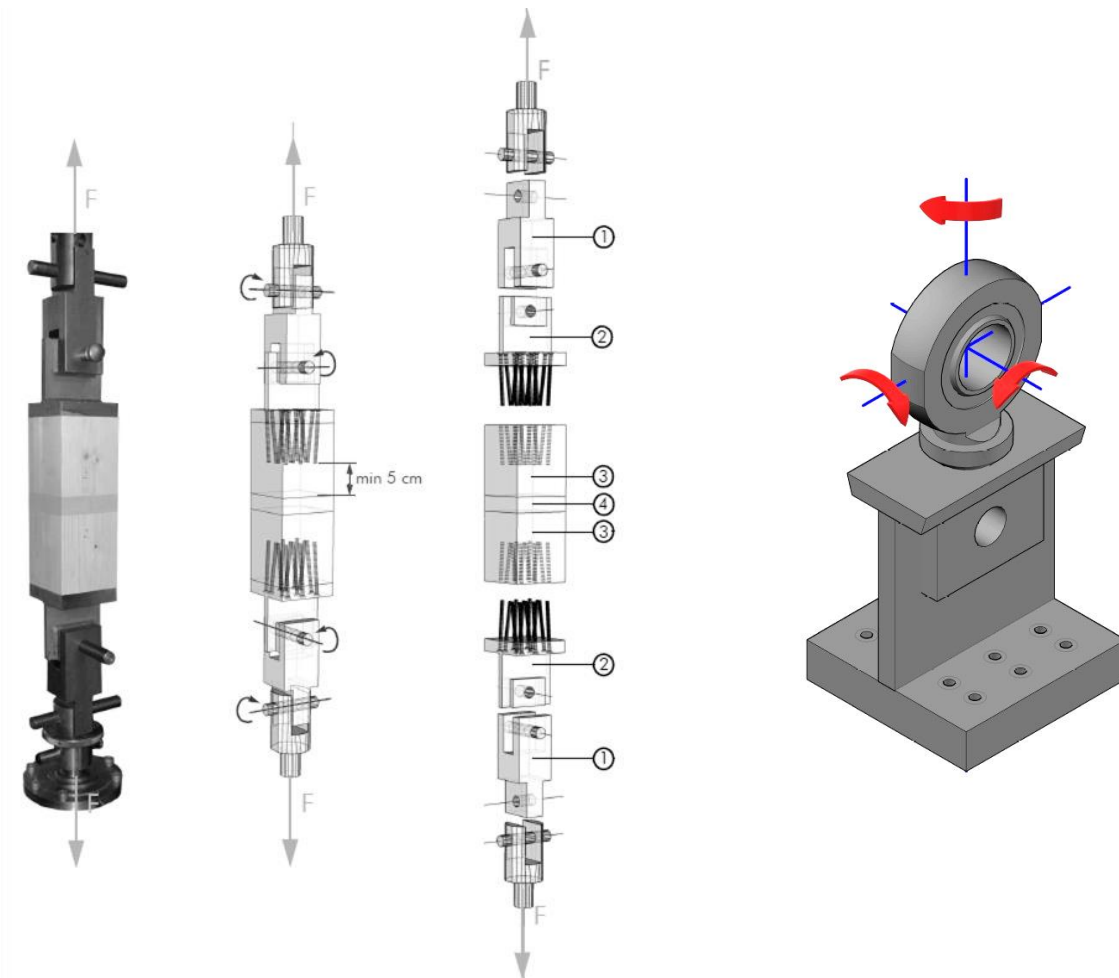
<sup>2</sup> Cross Laminated Timber

<sup>3</sup> Various Layer thickness

## 2-2 PRÜFPLANUNG

### 2-2.1 PRÜFKONFIGURATION FÜR QUERSCHNITT $150^2 \text{ MM}^2$

Basierend auf dem Versuchsaufbau für die Bestimmung der Querkzugfestigkeit von Brettschichtholzlamellen- und Brettschichtholzabschnitten [31] wurde die Lasteinleitung für die Untersuchungen von Brettsperrholzlamellen- und Brettsperrholzabschnitten weiterentwickelt und adaptiert.



**Abbildung 2-9** Prüfkonfiguration für Querschnitt  $150^2 \text{ mm}^2$   
 (links: Versuchsaufbau STUEFER [31]; rechts: adaptierte Lasteinleitungsplatte)

Wie in Abbildung 2-9-links ersichtlich, hatte STUEFER [31] in seiner Prüfkonfiguration zwei Kardangelenke angeordnet. Diese Gelenke ermöglichen, wie anhand der roten Pfeile dargestellt, eine Rotation um die beiden horizontalen Achsen. Dadurch sollen Spannungen im Prüfkörper zufolge der Lasteinleitung, sogenannte extern aufgebrachte Spannungen, ausgeschlossen werden. Jedoch ist der dritte Rotationsfreiheitsgrad um die stehende Achse nach wie vor gesperrt. Dies führt in der praktischen Ausführung zu erwartender, nicht vollständig symmetrisch zueinander montierten Lasteinleitungsplatten zu Torsionszwängungen, welche die Prüfergebnisse beeinflussen könnten.

Um den Einfluss von Torsionszwängungen weitgehend ausschließen zu können, wurde eine der beiden Lasteinleitungsplatten um ein Kugelgelenk erweitert. Wie in Abbildung 2-9-rechts ersichtlich, lässt der aufgeschweißte Gelenkkopf Drehungen um alle drei Achsen zu. Dies gewährleistet, dass der Prüfkörper praktisch ohne Zwängungen eingebaut werden kann und nur mit Zugkräften quer zur Faserrichtung belastet wird. Eine Adaptierung der zweiten Lasteinleitungsplatte ergab sich als nicht richtungsweisend, da dann der Prüfkörper um die vertikale Achse freigegeben worden wäre.



## 2-2.2 PRÜFKONFIGURATION 300<sup>2</sup> MM<sup>2</sup>

Um den Größeneffekt validieren zu können, wurde eine Prüfkongfiguration mit einer Seitenlänge von 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup> Grundfläche entwickelt. Dies entspricht dem Vierfachen des Prüfkörpervolumens von dem des Vergleichsprüfkörpers. Die geänderten Umstände erforderten eine komplette Neuentwicklung der Lasteinleitungsplatten unter denselben kinematischen Grundbedingungen und der Idee des zwängungsfreien Einbaues wie bei der Referenzprüfkongfiguration.

LF 1  
 Belastung [N/mm<sup>2</sup>]  
 Globale Verformungen u  
 Lagerreaktionen

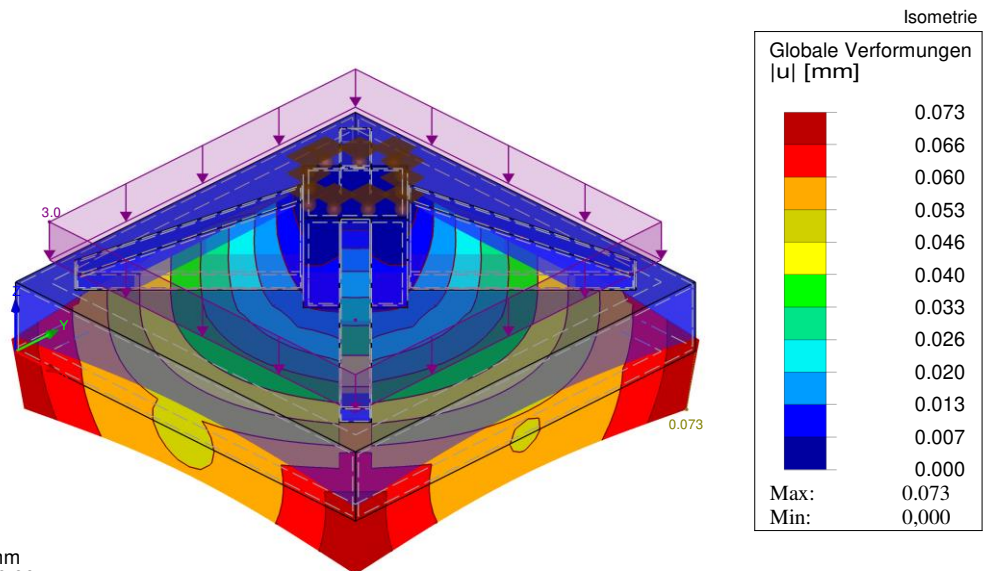


Abbildung 2-10 Verformungen im FE-Modell der Lasteinleitungsplatte 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup> oben

Mit der Anforderung bei Maximallast der vorhandenen Universalprüfmaschine "ZWICK" von 275 kN<sup>1</sup> eine maximale Verformung von unter 0,1 Millimeter zu erhalten, wurde im Finite Elemente Programm „RFEM“ der Firma Dlubal, eine Grundplatte mit doppelt symmetrischen Versteifungen entworfen. Für die Berechnung wurde vereinfacht eine Flächenlast von 3 N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Dies soll eine Näherung für die später flächig verteilten Holzbauschrauben darstellen. Das Modell wurde mit Baustahl S235 implementiert, wobei die Verbindungen der Einzelbauteile als „starr“ angenommen wurden und somit Schweißverbindungen nahekommen. Eine Flächenlagerung soll das angeschweißte Gelenksauge darstellen.

Ein iterativer Optimierungsprozess liefert das in Abbildung 2-10 visualisierte Modell. Dabei hat die Grundplatte eine Dicke von 50 mm und die Steifen eine Breite von 20 mm. Die zentrale Basis für die Montage des Kugelauges stellt einen Würfel mit einer Seitenlänge von 65 mm dar. Mit diesen Abmessungen kann mit einer rechnerischen Maximalverformung von 0,073 mm das anfängliche Ziel eingehalten werden.

Die zweite Lasteinleitungskomponente wird, wie bei der kleinen Versuchskonfiguration, an ein Kardangelenkschloss angeschlossen. Dadurch wird eine andere Geometrie der zentralen Basis, als bei der zuvor beschriebenen Lasteinleitungsplatte, benötigt. Die nun rechteckige Basis bewirkt unterschiedliche Biegesteifigkeitsverhältnisse in den beiden horizontalen Koordinatenachsen. Um annähernd dieselbe Verformungsfigur wie bei der doppelt symmetrischen „Lasteinleitungsplatte oben“ zu erhalten, war es nötig die verschiedenen Biegesteifigkeiten mit entsprechend adaptierten Steifen zu kompensieren. Ein iterativer Optimierungsprozess in RFEM lieferte das in Abbildung 2-11 dargestellte Modell. Mit den optimierten Steifen sind nun vergleichbare Verformungen wie bei der oberen Lasteinleitungskomponente zu erwarten.

<sup>1</sup> Kilonewton

LF 1  
Belastung [N/mm<sup>2</sup>]  
Globale Verformungen u  
Lagerreaktionen

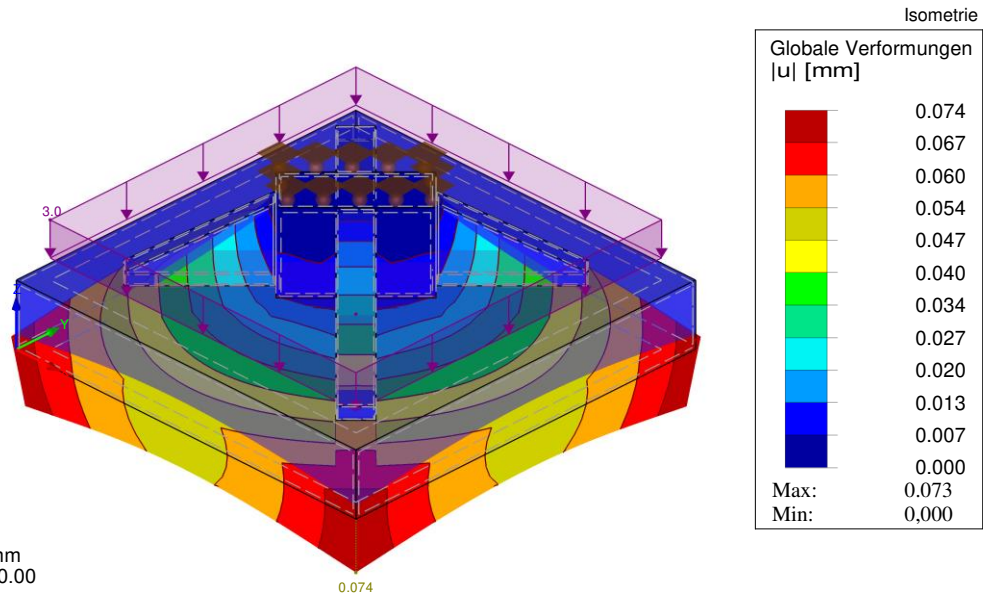


Abbildung 2-11 Verformungen im FE-Modell der Lasteinleitungsplatte 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup> unten

### 2-2.2.1 Werkplanung der Lasteinleitungsplatten 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup>

#### Schweißnahtbemessung

Aufgrund der großen Blechstärke waren nicht die Spannungen in den Schweißnähten bemessungsbestimmend, sondern die Nahtdicke in Abhängigkeit der Bauteildicke. Dies soll lt. SCHWEIZER [51] ein Missverhältnis von Nahtquerschnitt und den verbundenen Querschnittsteilen vermeiden.

$$\max \left\{ \frac{2 \text{ mm}}{\sqrt{t_{\max}} - 0,5} \leq a \leq 0,7 * t_{\min} \right. \quad (2.3)$$

Dabei sind:

- $a$  .....Nahtdicke [mm]
- $t_{\min}$  .....minimale Bauteildicke [mm]
- $t_{\max}$  .....maximale Bauteildicke [mm]

Beim Anschweißen der zentralen Basis an die Grundplatte ergibt dies bei Blechdicken von 65 mm bzw. 50 mm eine Schweißnahtdicke von  $7,56 \text{ mm} \leq a \leq 35 \text{ mm}$ . Gewählt wurde eine Kehlnaht mit 8 mm. Bei den Doppelkehlnähten für die Steifen ist die Dicke der Grundplatte maßgebend und führt zu einer Mindestnahtdicke von 6,57 mm; gewählt wurden 7 mm.

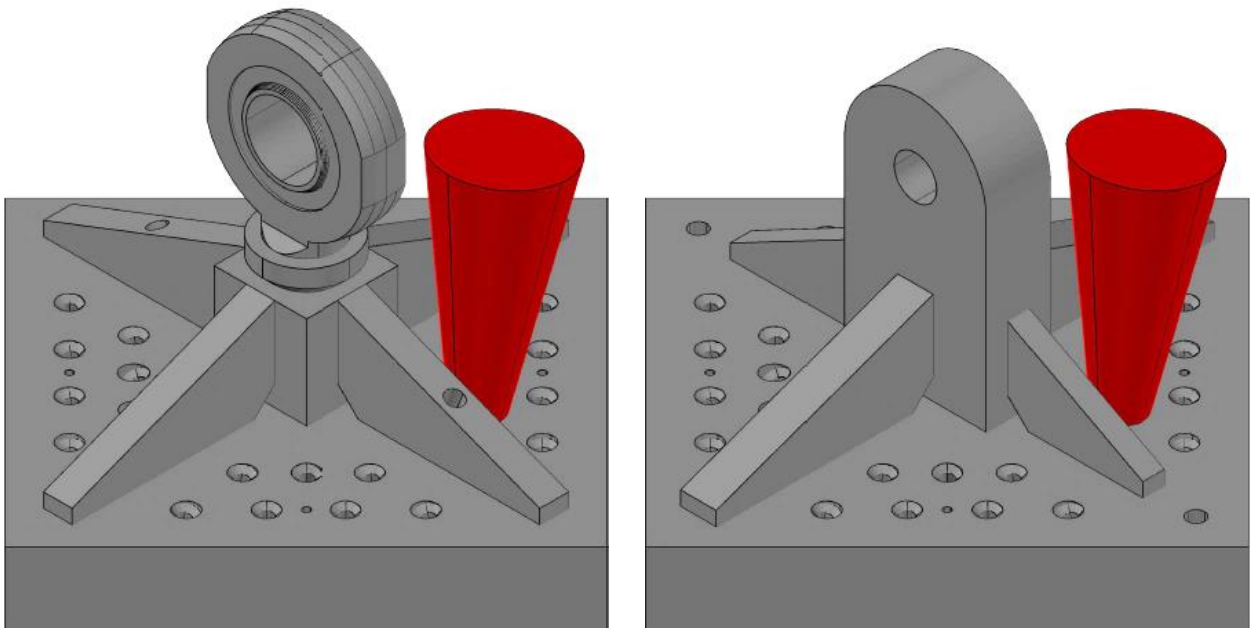
Für die Montage des Gelenkkopfes nach DIN ISO 12240-4 (1998), Maßreihe E, Form S, wurden die Schweißvorgaben des Herstellers eingehalten.

## **Schraubenbemessung**

Auf Basis der FEM-Analysen wurde die Werkplanung für die Fertigung der Stahlteile durchgeführt. Dazu wurden eingangs die benötigten Holzbauschrauben für die Einleitung der Lasten in den Lasteinleitungsblock ermittelt. Die Bemessung (siehe Anhang C-1.1) der zur Verfügung stehenden ASSY® 8 × 180 Schrauben erfolgte lt. europäischer technischer Bewertung ETA-11/0190 (2013) [52]. Um Schrauben einzusparen, wurde mit einem Faktor  $1 / k_{90,05} = f_{ax,0,05} / f_{ax,90,05} = 0,7$ , entsprechend dem Verhältnis der Kurzzeitfestigkeiten (vgl. BRANDNER et.al. [53]), anstatt mit rund 0,3 [52], was auf die Befürchtung zurückzuführen ist, dass sich bei faserparalleler Verschraubung ein deutlich höherer DoL Effekt einstellt, gerechnet.

Der Einschraubwinkel der Schrauben wurde so optimiert, dass der darunterliegende Volumenkörper annähernd gleichmäßig belastet wird.

Die Geometrie der Bohrungen in der Grundplatte wurde den in der ETA - 11/0190 (2013) [52] vorliegenden Toleranzen für den Schraubenkopf als auch für das Gewinde angepasst. Der Flankenwinkel der Senkung wurde, wie auch schon bei STUEFFER [31], mit 45° gewählt. Neben den Mindestanforderungen an Rand- und Zwischenabständen musste bei der Anordnung der Schrauben auch das problemlose Applizieren dieser unter Verwendung eines 18V Milwaukee Schraubers sichergestellt werden.



**Abbildung 2-12**     **Überprüfung der Montage**  
(links: Lasteinleitungsplatte oben; rechts Lasteinleitungsplatte unten)

Für die Überprüfung der Montagefähigkeit der Holzbauschrauben wurde, wie in Abbildung 2-12 als roter Kegelstumpf ersichtlich, der Arbeitsraum unter Berücksichtigung des genannten Modells des Akkuschraubers modelliert. Aufgrund der Neigung der Schrauben gen Plattenzentrum beziehungsweise zu den Steifen stellte das Einschrauben kein Problem dar.

## Reduzierhülse

Um den Bohrungsdurchmesser des Kugelgelenkes von 50 mm auf den Bolzendurchmesser der Prüfmaschine von 30 mm anzupassen, wurde eine Reduzierhülse entwickelt.

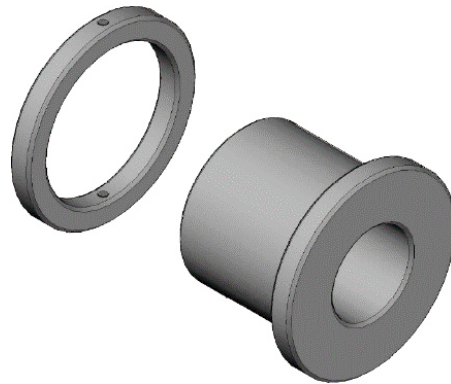


Abbildung 2-13 Reduzierhülse

Bei der Planung der Reduzierhülse wurde besonderes Augenmerk auf die maschinenbautechnischen Toleranzen gelegt. Es mussten sowohl die Bohrungstoleranzen des Gelenkkopfes als auch die Toleranzen des Prüfmaschinenbolzens berücksichtigt werden. Zudem mussten auch die Fertigungsabweichungen in Hülsenlängsrichtung sowohl auf die Kugelbohrung als auch auf den Gabelkopf der Prüfmaschine abgestimmt werden. Für die Lagesicherung im Gelenkkopf wurde ein Sicherungsring entworfen, der mit metrischen Madenschrauben an der Hülse fixiert wird. Auch hier wurden die maschinenbautechnischen Fertigungstoleranzen berücksichtigt und sowohl auf die Hülse im Durchmesser als auch auf das Kugelgelenk und den Gabelkopf der Prüfmaschine in Bolzenlängsrichtung abgestimmt.

Um den perfekten Sitz der Hülse in der Bohrung des Gelenkkopfes zu gewährleisten, wurde ein Freistich nach DIN 509 (2006) angeordnet.

## Montage- und Einbauhilfe

Aufgrund der Tatsache, dass keine der Bohrungen für das Einbringen der Holzbauschrauben im rechten Winkel zur Grundplatte steht (siehe Anhang D-1.2), musste eine Lagesicherung der Platte bei der Montage entwickelt werden. Dazu wurden M5 Schrauben angespitzt und in den orthogonalen Symmetrieachsen der Grundplatte (vgl. Abbildung 2-12) platziert. Somit gab es vier höhenverstellbare „Zentrierspitzen“.

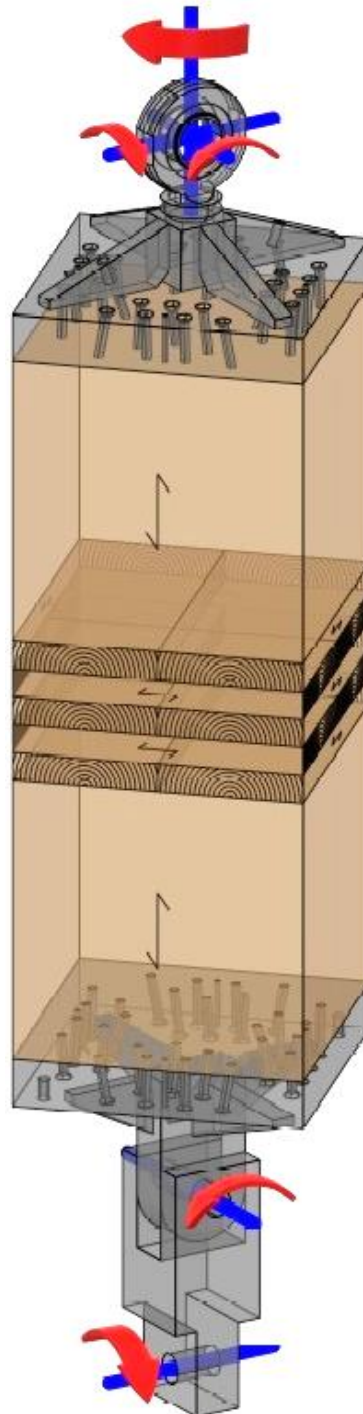


Abbildung 2-14 Hilfen  
 (links: Montagehilfe; rechts: M12 Ringschraube [54])

Um das Einheben der Prüfkörper inkl. angeschraubter Lasteinleitungsplatten in die Prüfmaschine mit einem Portalkran (siehe Abbildung 2-29-rechts) zu erleichtern, wurden jeweils in den diagonalen Symmetrieachsen der Lasteinleitungsplatten zwei M12 Löcher für die Montage von Ringschrauben angeordnet.

### **Assembling**

Die Prüfkongfiguration der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) hat dieselben Funktionen und Freiheitsgrade wie die Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Querkzugkenngrößen der Serien mit Querschnittsfläche 150<sup>2</sup> mm<sup>2</sup>. Auf einer Seite sind, wie in Abbildung 2-15 anhand der roten Pfeile ersichtlich, alle drei Rotationsfreiheitsgrade freigegeben. An der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers sind mithilfe des Kardangelenkes zwei Rotationsfreiheitsgrade freigegeben. Dies gewährleistet bei der Lastaufbringung eine reine Translation in die vertikale Richtung und folglich die Vermeidung von Zwängungen im Prüfkörper zufolge Montage der Stahlplatten oder dem Einbau in die Prüfmaschine.



*Abbildung 2-15    Prüfkongfiguration 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup>*



## 2-2.3 PRÜFKÖRPERASSEMBLING

In der Prüfplanung wurde auf die Prüfkörperzusammensetzung besonderes Augenmerk gelegt. Dabei wurde versucht, die Rohdichteigenschaften der Rohware nach drei Bedingungen zu berücksichtigen:

- (v) maximale Variation der Rohdichte innerhalb eines Prüfkörpers,
- (vi) maximale Variation der Rohdichte innerhalb einer Serie,
- (vii) minimale Variation der Rohdichte zwischen den Serien.

Die erste Bedingung stellt sicher, dass keine Brettnummer doppelt im selben Versuchskörper vorkommt. Diese Forderung kann bei allen Prüfkörpern eingehalten werden und stellt für die Untersuchungen eine Notwendigkeit dar, da in natura nicht zweimal dasselbe Brett pro Brettsperrholzplatte vorkommen kann.

Die zweite Randbedingung kann aufgrund der mit 60 Stück beschränkten Grundgesamtheit nicht bei allen Serien zur Gänze berücksichtigt werden, denn dazu dürfte in jeder Serie jedes Brett nur einmal vorkommen, was unter Berücksichtigung der Serienumfänge zu einem Bedarf von 200 Brettern führen würde. Bei jenen Serien, bei denen diese Forderung nicht erfüllt werden kann, wird mit Subserien gearbeitet. Das heißt, dass mehrere Prüfkörper einer Serie aus Brettabschnitten derselben Bretter bestehen und sich somit in der Rohdichteverteilung sehr ähnlich sind.

Die dritte Bedingung wird berücksichtigt, indem pro Brett jede Serie zumindest einmal vorkommt und somit ähnliche Rohdichteigenschaften zwischen den Serien auftreten. Diese Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der einzelnen Serien kann gewährleistet werden.

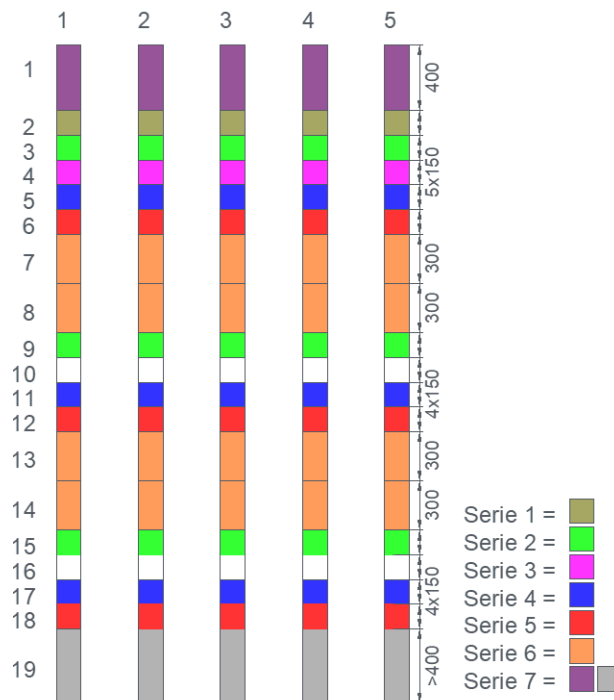


Abbildung 2-16 Zuordnung der Brettabschnitte der Rohware zu den Prüfserien

In Abbildung 2-16 ist ein Ausschnitt des Zuschnittplans der Rohware zu sehen. Zur besseren Handhabung und Übersichtlichkeit in der Produktion und beim Sortieren der Einzelbretter wurden diese in Gruppen zu jeweils 5 Stück unterteilt. Eine vollständige Übersicht über alle 60 Bretter befindet sich im Anhang D-1.1.

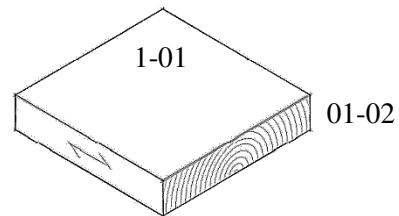
Hier anschließend wird das System der Fügung der Prüfkörper für die einzelnen Serien näher beleuchtet und auf die zweite Bedingung gesondert eingegangen, da diese, wie vorhin schon erwähnt, nicht bei allen Serien eingehalten werden kann. Die Brettabschnittbezeichnung (Brettnummer-Lage im Brett) ist im Prüfkörper chronologisch von oben nach unten ansteigend, wobei „oben“ anhand der, mit der rechten Seite nach außen gerichteten Schicht, zu erkennen ist. Das bedeutet, dass die oberste Schicht im Prüfkörper die linke Spalte bei der Brettbezeichnung definiert.

### 2-2.3.1 Serie 1 (1s)

Die zweite Bedingung kann innerhalb der Serie 1 vollständig eingehalten werden, da von jedem Brett nur ein Brettabschnitt verwendet wird und somit die Rohdichte zwischen den einzelnen Probanden maximal abweicht.

**Tabelle 7** *Assembling Serie 1*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett
<b>1-01</b>	01-02
<b>1-02</b>	02-02
<b>1-...</b>	...-02

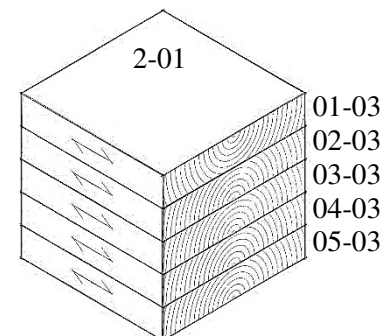


### 2-2.3.2 Serie 2 (5sGL)

Bei der Serie 2 kann die maximale Variabilität der Rohdichte innerhalb einer Serie nicht gewährleistet werden, daher werden sieben Subserien eingeführt. Jede Subserie enthält drei Prüfkörper mit entsprechend ähnlicher Rohdichteverteilung, da diese aus Brettabschnitten derselben Bretter bestehen.

**Tabelle 8** *Assembling Serie 2*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett				
<b>2-01</b>	01-03	02-03	03-03	04-03	05-03
<b>2-02</b>	01-09	02-09	03-09	04-09	05-09
<b>2-03</b>	01-15	02-15	03-15	04-15	05-15
<b>2-04</b>	06-03	07-03	08-03	09-03	10-03
<b>2-...</b>	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...

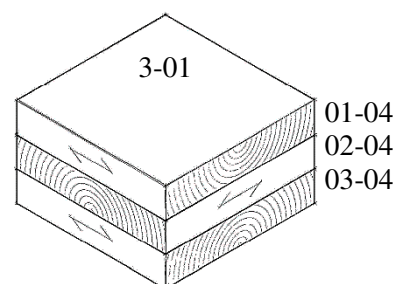


### 2-2.3.3 Serie 3 (3sCL)

Die zweite Bedingung kann beim dreischichtigen Prüfkörper vollständig erfüllt werden, da jede Brettnummer in der gesamten Serie nur einmal vorkommt. Das ergibt 20 dreischichtige Prüfkörper bei 60 Brettern.

**Tabelle 9** *Assembling Serie 3*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett		
<b>3-01</b>	01-04	02-04	03-04
<b>3-02</b>	04-04	05-04	06-04
<b>3-...</b>	...-04	...-04	...-04

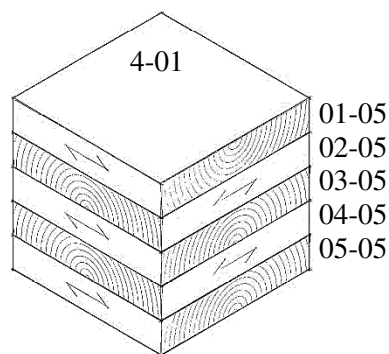


### 2-2.3.4 Serie 4 (5sCL)

Wie schon bei Serie 2 werden hier sieben Subserien zu je drei Probekörpern eingeführt. Die Serie 4 unterscheidet sich von der Serie 2 nur in der kreuzweisen Verklebung der Brettabschnitte. Aufgrund der gezielt zusammengestellten identen Brettnummernabfolgen weisen die Prüfkörper dieser zwei Serien eine vergleichbare Rohdichtevertelung auf. Dies stellt eine ideale Voraussetzung für die Untersuchung der Auswirkung des Sperreffekts auf die Querszugkenngrößen von Brettsperrholz dar.

**Tabelle 10** *Assembling Serie 4*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett				
<b>4-01</b>	01-05	02-05	03-05	04-05	05-05
<b>4-02</b>	01-11	02-11	03-11	04-11	05-11
<b>4-03</b>	01-17	02-17	03-17	04-17	05-17
<b>4-04</b>	06-05	07-05	08-05	09-05	10-05
<b>4-...</b>	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...

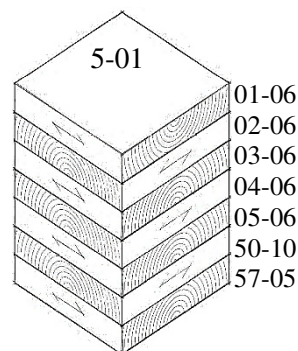


### 2-2.3.5 Serie 5 (7sCL)

Bei den sieben-schichtigen Prüfkörpern kann die Durchmischung nicht mehr mit einer 5er Gruppe bewerkstelligt werden. Deshalb werden die Schichten 6 und 7 von den Brettern mit den Nummern 50-60 beige stellt. So kann wieder sichergestellt werden, dass keine der sieben Schichten dieselben Rohdichteigenschaften hat. Zusätzlich ist die Einteilung in sieben Subserien zu jeweils drei Probekörpern mit jeweils ähnlichen Rohdichteigenschaften nötig.

**Tabelle 11** *Assembling Serie 5*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett						
<b>5-01</b>	01-06	02-06	03-06	04-06	05-06	50-10	57-05
<b>5-02</b>	01-12	02-12	03-12	04-12	05-12	50-11	57-06
<b>5-03</b>	01-18	02-18	03-18	04-18	05-18	50-12	57-07
<b>5-04</b>	06-06	07-06	08-06	09-06	10-06	58-05	59-04
<b>5-...</b>	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...



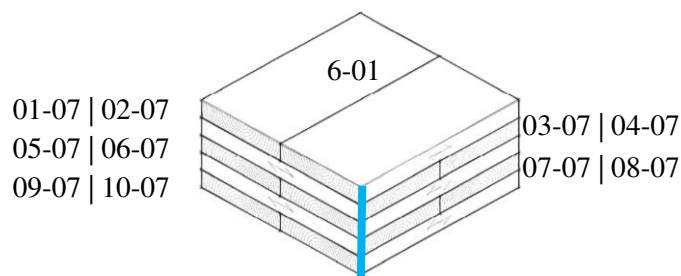


### 2-2.3.6 Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)

Bei dieser Serie, mit Fokus auf die Untersuchung des Größeneffektes kann die maximale Variabilität der Rohdichte innerhalb des Prüfkörpers eingehalten werden, indem die Brettabschnitte von jeweils zehn verschiedenen Brettern gekappt werden. Dies führt in weiterer Folge, aufgrund der beschränkten Rohware, zur Bildung von fünf Subserien zu jeweils vier Probekörpern mit ähnlicher Rohdichteverteilung.

**Tabelle 12** *Assembling Serie 6*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett									
<b>6-01</b>	01-07	02-07	03-07	04-07	05-07	06-07	07-07	08-07	09-07	10-07
<b>6-02</b>	01-08	02-08	03-08	04-08	05-08	06-08	07-08	08-08	09-08	10-08
<b>6-03</b>	01-13	02-13	03-13	04-13	05-13	06-13	07-13	08-13	09-13	10-13
<b>6-04</b>	01-14	02-14	03-14	04-14	05-14	06-14	07-14	08-14	09-14	10-14
<b>6-05</b>	11-07	12-07	13-07	14-07	15-07	16-07	17-07	18-07	19-07	20-07
<b>6-...</b>	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...	...-...



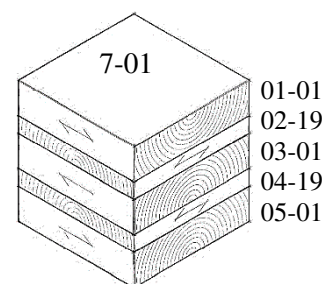
**Abbildung 2-17** *Assemblingschema Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>), beispielhaft für den Prüfkörper 6-01*

### 2-2.3.7 Serie 7 (5sVL)

Bei dieser Serie, charakterisiert durch unterschiedliche Lagenstärken, wird eine gute Durchmischung der Rohdichteigenschaften erreicht, indem jede der 40 mm starken Brettabschnitte von einem anderen Brett gekappt wird. Somit ist die Einführung von Subserien nicht nötig und die Rohdichte variiert innerhalb und zwischen den Prüfkörpern dieser Serie.

**Tabelle 13** *Assembling Serie 7*

Ser.-Prüfkp.	Brettnr.-Lage im Brett				
<b>7-01</b>	01-01	02-19	03-01	04-19	05-01
<b>7-02</b>	36-01	01-19	02-01	03-19	04-01
<b>7-...</b>	...-01	...-19	...-01	...-19	...-01



## 2-3 PRODUKTION DER PRÜFKÖRPER

### 2-3.1 VORBEREITUNG DER ROHWARE

Von der Firma Hasslacher, Standort Preding, wurden 60 Bretter der Holzart Fichte (*Picea abies*) mit der Dimension  $47 \times 160 \times 4.000 \text{ mm}^3$  mit  $14 \pm 2 \%$  Holzfeuchtigkeit (Basis: Stichprobenprüfung bei Wareneingang) technisch getrocknet geliefert.

Die Pfosten wurden „sägefallend“ und somit ohne visuelle noch maschinelle Schnittholzsortierung nach ON EN 14081-1(2017) [55] geliefert. Auf Basis einer selbst durchgeführten visuellen Ansprache vor der Weiterverarbeitung kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Ware um S10+ handelt, was in Anlehnung an ÖNORM DIN 4074-1(2004) [56] der Festigkeitsklasse C24+ bzw. T14+ nach ÖNORM EN 338 (2016) [57] entspricht. Eine Berücksichtigung der Jahrringlage und von Holzmerkmalen fand nicht statt. Mit diesen Maßnahmen will man der realen Brettspertholzproduktion nahekommen.

Vor der Konditionierung in der Klimakammer bei  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  und  $(65 \pm 5) \%$  relativer Luftfeuchtigkeit wurde die Rohware von 1 bis 60 stirnseitig durchnummeriert und auf 43 mm Dicke gehobelt. Anschließend wurde von jedem Brett ein 400 mm langer Abschnitt (siehe Abbildung 2-16) entnommen. Diese dienen später für die 40 mm starken Brettabschnitte der Serie 7. Daraufhin wurden alle Bretter bzw. verbleibenden Abschnitte auf 33 mm Dicke gehobelt und luftig gestapelt.



Abbildung 2-18 luftig gestapelte Rohware

### 2-3.1.1 Vorbereiten der Lasteinleitungsblöcke

Neben der Rohware für die Produktion der Prüfkörper wurden auch die Rohlinge für die Lasteinleitungsblöcke vorbereitet. Dazu wurden am Institut vorhandene Brettschichtholzträger aus Fichtenholz auf einen Querschnitt von  $150^2 \text{ mm}^2$  gehobelt.

Am rechten Bild in Abbildung 2-19 ist eine Blockverleimung mit „Weißleim“ (PVAC) für die Lasteinleitungsblöcke der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) zu sehen. Die mit  $0,4 \text{ N/mm}^2$  Pressdruck in einer hydraulischen Presse verklebten Rohlinge wurden anschließend zu einem Querschnitt von  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  formatiert. Die Produktion des benötigten Querschnittes von  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  ist maschinenbedingt nicht möglich, da die maximale Schnitttiefe der Tischkreissäge  $200 \text{ mm}$  beträgt. Dies führt nach der Kappung auf die fertige Länge von  $300 \text{ mm}$  zu einer weiteren Blockverleimung (vgl. Kap. 2-3.4.1) mittels Weißleim.



Abbildung 2-19 Holz zur Herstellung der Lasteinleitungsblöcke  
(links:  $150^2 \text{ mm}^2$ ; rechts:  $150 \times 300 \text{ mm}$ )

### 2-3.2 VORBEREITUNG FÜR DIE VERKLEBUNG

Bei der Weiterverarbeitung der Rohware nach erfolgter Konditionierung kamen zu den drei Sortierbedingungen (vgl. Kapitel 2-2.3) für den Aufbau der Prüfkörper noch drei fertigungstechnische Bedingungen hinzu: Zum einen sollte die Oberfläche vor der Verklebung so frisch wie möglich, jedenfalls jünger als  $24 \text{ h}$ , sein. Dies stellte eine Voraussetzung für eine leistungsfähige Verklebung dar. Des Weiteren war zu berücksichtigen, dass die kürzesten Hobelabschnitte mindestens  $400 \text{ mm}$  lang sein mussten, da die Vorschubwalzen bei der verwendeten Dickenhobelmaschine  $370 \text{ mm}$  Abstand hatten. Die dritte Bedingung betraf den Pressvorgang, wo es zu beachten galt, dass die Probekörper der meisten Serien unterschiedlich hoch waren und nur die Serien bestehend aus fünfschichtigen Probekörpern gemeinsam miteinander verklebt werden konnten.

Zur Berücksichtigung dieser drei fertigungstechnischen Randbedingungen wurden zuerst die Bretter mit Nummer 1 bis 35 in drei Hobelabschnitte gekappt, um folglich in der Fertigung der Probekörper flexibler agieren zu können. Die Bretter mit Nummer 36 bis 60 wurden so gekappt, dass die Brettabschnitte der dreischichtigen Serie 3 und jene Brettabschnitte mit Nummer 6 und 7 der siebenschichtigen Serie 5 separat gehobelt werden konnten, also mindestens  $400 \text{ mm}$  lang waren. Nach dieser Vorarbeit wurden die Hobelabschnitte für die Weiterverarbeitung so gewählt, dass immer vollständige Prüfkörper der verschiedenen Serien gefertigt werden konnten, also das Vielfache von fünf Abschnitten. Nach dem beidseitigen Hobeln der Bretter, gemäß EN 408 [44], auf ein Fertigmaß von  $30 \text{ mm}$ , wurden die Brettabschnitte auf  $160 \text{ mm}$  Länge gekappt. Je Hobelabschnitt standen nun  $30 \text{ mm}$  dicke Brettabschnitte mit  $160^2 \text{ mm}^2$  für verschiedene Serien zur Verfügung. Die Serie 7, also jene mit verschiedenen Schichtstärken, wurde separat und am Schluss gefertigt. Dazu wurden die Endstücke des jeweils dritten Brettabschnittes auf  $20 \text{ mm}$  Dicke gehobelt und anschließend gekappt. Die zu Beginn gekappten  $43 \text{ mm}$  dicken Brettabschnitte wurden noch auf das Endmaß von  $40 \text{ mm}$  gehobelt und anschließend gekappt.



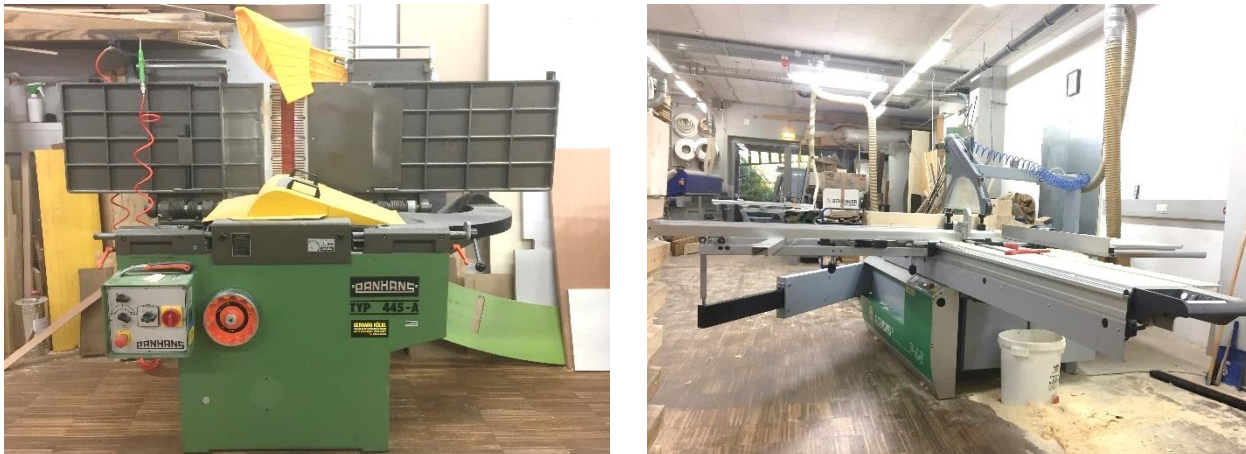


Abbildung 2-20 **Holzbearbeitungsmaschinen**  
 (links: Hobelmaschine; rechts: Formatkreissäge)

### 2-3.2.1 Aufnahme der Materialparameter

Vor der Verklebung der Prüfkörperrohlinge wurden wichtige Materialeigenschaften der Brettabschnitte aufgenommen. Masse und Geometrie dienen dabei zur Berechnung der Rohdichte.

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (2.4)$$

Dabei sind:

- $\rho_u$  .....Rohdichte feucht [kg/m<sup>3</sup>]
- $m_u$  .....Masse feucht [kg]
- $V_u$  .....Volumen feucht [m<sup>3</sup>]

Für die Serie 1 (1s) wurde dazu die Geometrie mit einer digitalen Schiebelehre aufgenommen. Dazu wurden zweimal je Brettabschnitt alle drei Dimensionen mit 1 / 100 mm Genauigkeit aufgenommen, die beiden Werte je Abmessung anschließend gemittelt und aus dem Produkt der gemittelten Dimensionen das Volumen gebildet. Bei allen anderen Serien wurde das Volumen für sämtliche Brettabschnitte mit einer Genauigkeit von  $\leq \pm 1 \%$ , entsprechend den Toleranzvorgaben in EN 408 [44], aufgenommen. Die geringe Abweichung beruhte auf die werkseitige Besäumung der Bretter, wodurch es aufgrund des Quell- und Schwindverhaltens von Holz bis zum Verarbeitungszeitpunkt zu geringfügigen Änderungen in der Breite kam. Auf eine digitale Aufnahme der Dimensionen wurde dennoch verzichtet, da sowohl die Dicke und Länge der Brettabschnitte in Folge des Hobelns und Kappens als ausreichend exakt betrachtet wurden.

Zusätzlich zur Rohdichte wurde vom mittleren Brettabschnitt jedes Prüfkörpers die Holzfeuchte unter Verwendung eines elektronischen Holzfeuchtemessgerätes nach dem Widerstands-Messprinzip von GANN (GANN Hydromette M 4050) bestimmt.



Abbildung 2-21 **Aufnahme der Materialparameter**  
 (links: Masse; mittig: Geometrie; rechts: Holzfeuchtigkeit)

### 2-3.2.2 „Assembling“

Nach der Aufnahme der Materialparameter wurden sämtliche Prüfkörper nach dem „Assembling“-Plan (vgl. Kapitel 2-2.3) zusammengestellt. Danach wurden die einzelnen Brettabschnitte je Prüfkörper in richtiger Reihenfolge – links am Bild ist jeweils die oberste Lamelle – nebeneinander aufgelegt und die Oberfläche fotografisch festgehalten. Dabei wurde jeweils ein Foto von der kernzugewandten, der rechten, sowie eines von der linken Holzseite gemacht. Bei der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) wurde vor dem erneuten Zusammensetzen der Probekörper die Schmalseite der Brettabschnitte mit einem Klebeband, wie in Abbildung 2-22 mittig zu sehen, abgeklebt. Diese Maßnahme sollte einen Schmalseitenverbund zwischen den Brettabschnitten einer Lage durch in die Fugen quellenden PU-Klebstoff verhindern. Zusätzlich wurden die zusammengesetzten Prüfkörper dieser Serie so fotografiert, dass man die Brettabschnitte sowie ihre Lage im Prüfkörper nach dem Formatieren noch zuordnen konnte. Dafür wurde eine Ecke mit einer blauen Linie markiert (vgl. Abbildung 2-17).



**Abbildung 2-22** „Assembling“ der Rohlinge  
(links: Aufnahme der Oberfläche; mittig: Schmalseitenabklebung; rechts: Zusammensetzen)

### 2-3.3 VERKLEBUNG & FORMATIERUNG

Die Flächenverklebung der Prüfkörper erfolgte mit einem 1K-Polyurethanklebstoff (HB S309) von Henkel. Der Klebstoffauftrag erfolgte einseitig und mit einem Kamm zur Sicherstellung einer Auftragsmenge von rd. 120 bis 160 g/m<sup>2</sup>. Innerhalb der offenen Zeit von 30 min mussten die zu verklebenden Teile zusammengefügt und der Pressdruck von 0,6 bis 1 N/mm<sup>2</sup> aufgebracht werden. Vor dem Schließen der Presse wurde eine Lagesicherung der Brettabschnitte (Abbildung 2-23-rechts) mittels Schraubzwingen bewerkstelligt. Eine Holzfeuchte von mindestens 8 % und ein maximaler Feuchteunterschied von 4 % zwischen den einzelnen Brettabschnitten konnten durch die Konditionierung in der Klimakammer sichergestellt werden. Die Prüfkörper wurden laut technischem Merkblatt [58] 75 min lang gepresst und anschließend weiterverarbeitet sowie auf die Fertigmaße formatiert.



**Abbildung 2-23** Verklebung der Prüfkörper  
(links: Klebstoffauftrag; rechts: Pressen)

## 2-3.4 AUFKLEBEN DER LASTEINLEITUNGSBLÖCKE

Nach dem Formatieren der Prüfkörper auf die Fertigmaße wurden die Lasteinleitungsblöcke, die zuvor schon vorbereitet wurden (vgl. Kapitel 2-3.1.1), auf die erforderliche Länge gekappt. Bei den Serien mit  $150^2 \text{ mm}^2$  Grundfläche waren die Lasteinleitungsblöcke 200 mm und bei jener Serie mit  $300^2 \text{ mm}^2$  Grundfläche hingegen 300 mm lang. Die Kappung erfolgte erst unmittelbar vor dem Verkleben, um eine frische Hirnholzfläche, als eine der Grundlagen für eine optimale Adhäsion, zu gewährleisten.



**Abbildung 2-24** Montage Lasteinleitungsblock  $150^2 \text{ mm}^2$   
 (links: Prüfkörper auf Nagelbrett; rechts: Lasteinleitungsblöcke vor Klebstoffauftrag)

Für den beidseitigen Klebstoffauftrag auf die Prüfkörper wurde ein Nagelbrett vorbereitet. So konnten diese gewendet werden, ohne den Klebstofffilm zu stören. Die Lasteinleitungsblöcke wurden dicht-an-dicht aneinandergestellt, um den Klebstoff gleichmäßig und rasch aufbringen zu können.

Es wurde ein 2-Komponenten Melamin-Urea-Formaldehyd (MUF) Klebstoff (Prefere 4546) der Firma DYNEA verwendet. Dazu wurden Klebstoff und Härter im Gewichtsverhältnis 10 : 3 gemischt und mittels Rollenapplikation auf die am Nagelbrett positionierten Prüfkörper beziehungsweise auf die aneinander gestellten Lasteinleitungsblöcke aufgetragen. Besonderes Augenmerk musste auf die Kapillarwirkung des Hirnholzes gelegt werden. Es wurden  $1.600 \text{ g / m}^2$  Klebstoff abgemischt, davon wurden rd. 2 / 3 auf die Hirnholzfläche im Zuge einer mehrmaligen Benetzung aufgetragen.

Innerhalb der offenen Zeit von 30 Minuten mussten die Lasteinleitungsblöcke beidseits der Prüfkörper positioniert und in die Presse (vgl. Abbildung 2-23-rechts) gegeben werden. Um beim Schließen der Presse eine Dislokation zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsblöcke zu verhindern, wurde wiederum eine Lagesicherung, mittels mit Klebeband beklebten Brettabschnitten und Schraubzwingen, montiert. Dislozierte Lasteinleitungsblöcke würden laut BLASS [29] zu Exzentrizitäten führen, die unplanmäßige Momente im Prüfkörper erzeugen würden. Der Pressdruck von  $1 \text{ N/mm}^2$  wurde für 7 h aufrecht gehalten.

Da die Presse nur eine Öffnungsweite von 500 mm aufweist, konnten darin nur die Lasteinleitungsblöcke der ein- sowie dreischichtigen Serie aufgeklebt werden. Die Lasteinleitungsblöcke auf die fünf- sowie siebenschichtigen Serien mussten in einer Rahmenpresse aufgeklebt werden. Dort wurde der Pressdruck manuell mittels Hydraulikstempel aufgebracht.

Die vorhin erwähnte Lagesicherung wurde bei diesen Serien mit Drahtstiften umgesetzt. Dazu wurden nach der mehrmaligen Benetzung der Hirnholzfläche jeweils zwei Nägel in die Lasteinleitungsblöcke eingeschlagen und anschließend deren Kopf mit einer Beißzange abgezwickelt. Beim Schließen der Presse wurden die Nagelschäfte in die Prüfkörper gedrückt und somit eine Dislokation der Prüfkörper relativ zu den Lasteinleitungsblöcken verhindert.

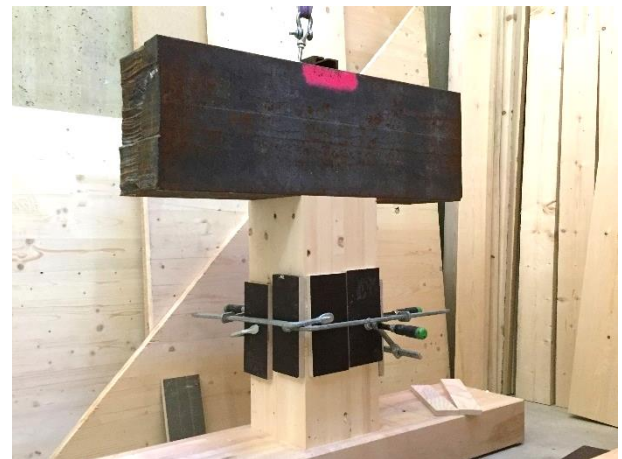
Zur Endaushärtung des fugenfüllenden Klebstoffes wurden alle Prüfkörper in der Klimakammer für mindestens 10 Tage gelagert. Die Entnahme aus dem Normklima darf laut EN 408 [44] erst eine Stunde vor der Versuchsdurchführung erfolgen.



### 2-3.4.1 Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)

Da die Prüfkörper sowohl für die Furnier- als auch für die Rahmenpresse zu groß waren, musste die Serie 6 different zu den anderen Serien behandelt werden. Eingangs wurden dazu die Lasteinleitungsblockrohlinge mit dem Querschnitt  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  (vgl. Kapitel 2-3.1.1) mit einer Länge von 300 mm gekappt.

Wie in Abbildung 2-25-links zu sehen, wurden die gekappten Blöcke mittels Schraubpressverklebung auf den erforderlichen Endquerschnitt blockverklebt. Um einen Höhengsprung in der Hirnholzfläche zu verhindern und somit eine qualitativ hochwertige Verklebung mit dem Prüfkörper sicherzustellen, war ein präzises Arbeiten erforderlich. Zur exakten Positionierung der zwei Blöcke zueinander wurden vor dem Verschrauben zwei Schraubzwingen gesetzt. Zur Verhinderung einer Dislokation beider Blöcke während der Verschraubung wurden die Schraubkanäle auf einer Ständerbohrmaschine mit Durchmesser 6 mm vorgebohrt. Damit wurde gewährleistet, dass die Schrauben exakt senkrecht eingedreht wurden und folglich nur Druckkräfte in der Fuge wirkten. Da in dieser Fuge bei der späteren Versuchsdurchführung keine Spannungen zu erwarten waren, wurde hier mit Weißleim gearbeitet.



**Abbildung 2-25**     **Montage Lasteinleitungsblock  $300^2 \text{ mm}^2$**   
(links: Blockverleimung; rechts: Pressen mit Auflast)

Das Aufkleben und Pressen der Lasteinleitungsblöcke auf die Prüfkörper dieser Serie erfolgte, wie oben rechts zu sehen, mit einer Auflast von einer Tonne. Dies entspricht einem Pressdruck von  $0,1 \text{ N/mm}^2$ . Die Lagesicherung der Lasteinleitungsblöcke während des Pressvorganges wurde mit vier Schraubzwingen bewerkstelligt. Das Erreichen eines Pressdruckes von  $1 \text{ N/mm}^2$  wäre nur mit erheblichem Mehraufwand umsetzbar gewesen.

Anfangs wurde die Kapillarwirkung des Hirnholzes unterschätzt sowie die Lasteinleitungsblöcke auf zwei Prüfkörper synchron unter einem Ballast, sprich bei halbem Pressdruck, aufgeklebt. Dies hatte zur Auswirkung, dass die Klebefuge zwischen Lasteinleitungsblock und Prüfkörper teilweise klaffte. Da zu erwarten war, dass sich klaffende Klebefugen negativ auf die Versuchsdurchführung auswirken würden, wurde versucht die Fehlstellen mit Epoxidharz nachträglich auszugießen. Dazu wurden bei den Fehlstellen mit einem Bohrer mit 2 mm Durchmesser direkt in Fugenebene mehrere Löcher gebohrt und mit Druckluft ausgeblasen. Anschließend wurde mit einer Spritze mit Nadel ein 2K-Epoxidharz von Toolcraft in die Löcher und somit in die Hohlräume der Leimfugen injiziert. Um die Bildung von Lufteinschlüssen zu vermeiden, wurden die Löcher von der Tiefe her aufgefüllt.

Zur Endaushärtung der Verklebungen wurden auch diese Versuchskörper für mindestens 10 Tage in die Klimakammer gestellt.

## 2-4 DURCHFÜHRUNG DER PRÜFUNGEN

### 2-4.1 PRÜFTECHNIK



Abbildung 2-26 Universalprüfmaschine "ZwickRoell"

Die Versuche wurden an der Universalprüfmaschine Z250 von „ZwickRoell“ mit der Bezeichnung lignum\_uni\_275 am Lignum Test Center (LTC) des Instituts für Holztechnologie und Holzbau der Technischen Universität Graz durchgeführt. Diese Prüfmaschine kann eine maximale Prüfkraft von 275 kN auf Zug und Druck aufbringen und sowohl kraft- als auch weggesteuert verwendet werden.

#### 2-4.1.1 Messtechnik

Zur Bestimmung der Dehnungen im Prüfkörper und somit auch zur Bestimmung des Querkzug-E-Moduls  $E_{t,90}$  über das Hook'sche Gesetz wurden DD1 Wegaufnehmer der Firma HBM verwendet.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (2.5)$$

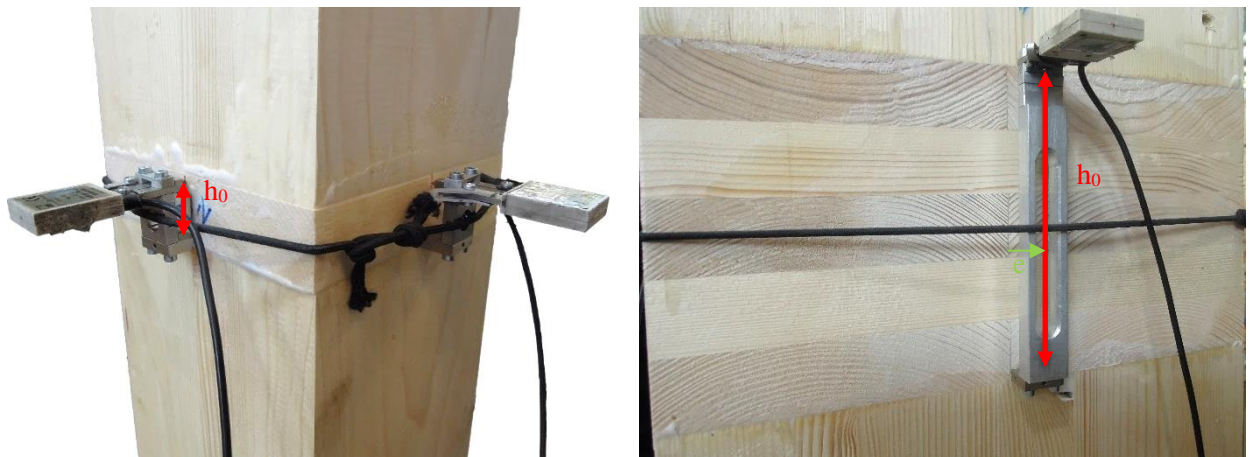
Dabei sind:

- $\sigma$  .....Spannung [N/mm<sup>2</sup>]
- $E$  .....E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]
- $\epsilon$  .....Dehnung [-]

„Der DMS<sup>1</sup>-basierte Weg- und Dehnungsaufnehmer DD1 nimmt Verschiebungen in einem Bereich von  $\pm 2,5$  mm präzise mit HBM Genauigkeitsklasse 0,1 auf. [...] Die Basis von DD1 ist ein Wegaufnehmer, der die Verschiebung der Spitze einer Tastzunge in ein elektrisches Signal umformt“. [59] Die Genauigkeitsklasse dient nur der Eingruppierung innerhalb der Typenreihe innerhalb des HBM-Programms und ist keineswegs mit der Gesamtgenauigkeit im praktischen Einsatz zu verwechseln. (vgl. [60]) Die Gesamtgenauigkeit liegt bei 0,001 mm bei einer verwendeten Messrate von 5 Hz.

<sup>1</sup> Dehnmessstreifen





**Abbildung 2-27** Dehnungsaufnehmer DD1  
(links: Serie 1(1s) mittig montiert; rechts: Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) außermittig montiert)

Es wurde jeweils ein DD1 in der Mitte der vier Seitenflächen des Prüfkörpers montiert. Die Position der Wegaufnehmer war unter dem folgenden Schema immer dieselbe: 1 = Ost, 2 = Nord, 3 = West, 4 = Süd. Aufgrund des immerwährend gleichen Einbaues der Prüfkörper kann den Dehnungsmessern auch eine Holzrichtung zugewiesen werden. Die Sensoren 1 und 3 wurden immer an den Hirnholzflächen bzw. in Brettspertholzlängsrichtung montiert. Die Aufnehmer 2 und 4 waren immer an den Seitenflächen, sprich in Brettspertholzquerrichtung, positioniert.

Die Montage erfolgte mit einem Gummiband, um eine schnelle und unkomplizierte Abnahme in der Belastungspause (vgl. Kapitel 2-4.3) gewährleisten zu können. Beim Montieren wurde darauf geachtet, dass die Messspitzen nicht in die Holzstruktur hineingedrückt wurden, sodass eine Punktlagerung der Wegaufnehmer vorzufinden war. Etwaige Messfehler durch ein mögliches Aushebeln der Messspitze an der beweglichen Tastzunge wurden so verhindert.

Bei der Serie 5sCL300<sup>2</sup> wurden die beiden Wegaufnehmer an der Probekörpervorderseite und an der Rückseite leicht außermittig montiert (siehe Abbildung 2-27-rechts), da ansonsten die Messspitzen genau in den Schmalseitenfugen der Decklamellen zu sitzen gekommen wären. Dies hätte große Messfehler mit sich gebracht.

Die Messbasen ( $h_0$ ) waren von der Prüfkörperhöhe abhängig und sind in Tabelle 14 aufgelistet.

**Tabelle 14** Messbasen

	Prüfkörperhöhe [mm]	Messbasis $h_0$ [mm]
<b>Serie 1 (1s)</b>	30	25
<b>Serie 2 (5sGL)</b>	150	145
<b>Serie 3 (3sCL)</b>	90	75
<b>Serie 4 (5sCL)</b>	150	145
<b>Serie 5 (7sCL)</b>	210	200
<b>Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	150	145
<b>Serie 7 (5sVL)</b>	160	145

## 2-4.2 PRÜFKÖRPEREINBAU

Vor dem Einbau in die Prüfmaschine mussten Vorbereitungsarbeiten an den Prüfkörpern getätigt werden. Zuerst wurden etwaige MUF-Klebstoffreste vom Aufkleben der Lasteinleitungsblöcke mit einem Handbandschleifgerät entfernt. Diese Maßnahme war für den perfekten Sitz der Messspitzen der verwendeten Wegaufnehmer vonnöten. In weiterer Folge wurden die stählernen Lasteinleitungsplatten an den Prüfkörpern positioniert und deren Lage mit Schraubzwingen gesichert.

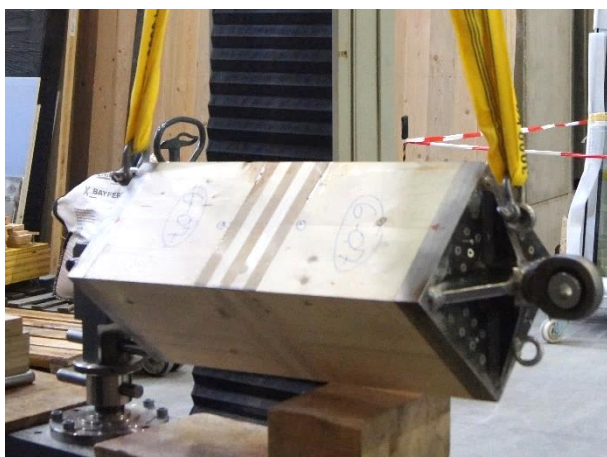
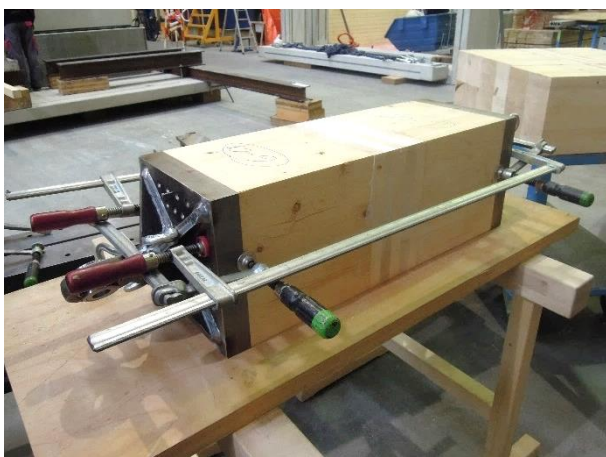
Nach dem Einschrauben der Vollgewindeschrauben mittels Bohrschrauber wurden diese mit einem Drehmomentschlüssel mit einem Moment von 20 Nm gleichmäßig angezogen. Um das Eindrehen der Schrauben in das Hirnholz zu erleichtern, wurde nach der ersten Serie von ASSY® Holzbauschrauben mit Bohrspitze (vgl. Kapitel Schraubenbemessung) auf Holzbauschrauben mit Halbspitze von SHERPA® gewechselt.



**Abbildung 2-28** *Präparation der Prüfkörper*  
 (links: Abschleifen von Klebstoffresten; rechts: Montage der Lasteinleitungsplatten)

Nach der Montage der Lasteinleitungsplatten wurden die Prüfkörper manuell in die Prüfmaschine eingehoben. Zuerst wurde der untere Bolzen montiert, danach aufgerichtet und in weiterer Folge der obere Bolzen montiert (vgl. Kapitel 2-5.2.1).

Wie in Abbildung 2-29 zu sehen, wurden auch die Prüfkörper der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) in ähnlicher Weise eingebaut. Aufgrund der hohen Eigenmasse von rund 140 Kilogramm wurde zum Einheben der Hallenkrane verwendet. Nach dem horizontalen Einschweben und Setzen des unteren Bolzens wurde der Körper mit dem oberen Hebegurt aufgerichtet und der Bolzen beim Gelenkauge montiert.



**Abbildung 2-29** *Prüfkörpereinbau Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)*  
 (links: Montage der Lasteinleitungsplatten; rechts: Einheben mittels Hallenkrane)

## 2-4.3 VERSUCHSABLAUF

Nach dem Prüfkörpereinbau und der Installation der Messtechnik (vgl. Kapitel 2-4.1.1) wurde der Versuch gestartet. Die Prüfungen wurden weggesteuert durchgeführt, wobei die Vorschubgeschwindigkeit  $v_{\text{Test}}$  von der erwarteten Bruchlast  $F_{t,90,\text{max,est}}$  abhängig war. Die EN 408(2012) [44] sieht nämlich einen Bruch innerhalb von  $300 \pm 120 \text{ sec}$  vor, um zeitabhängige Spannungseffekte ausschließen zu können bzw. weitgehend konstant und somit vergleichbar zu halten.

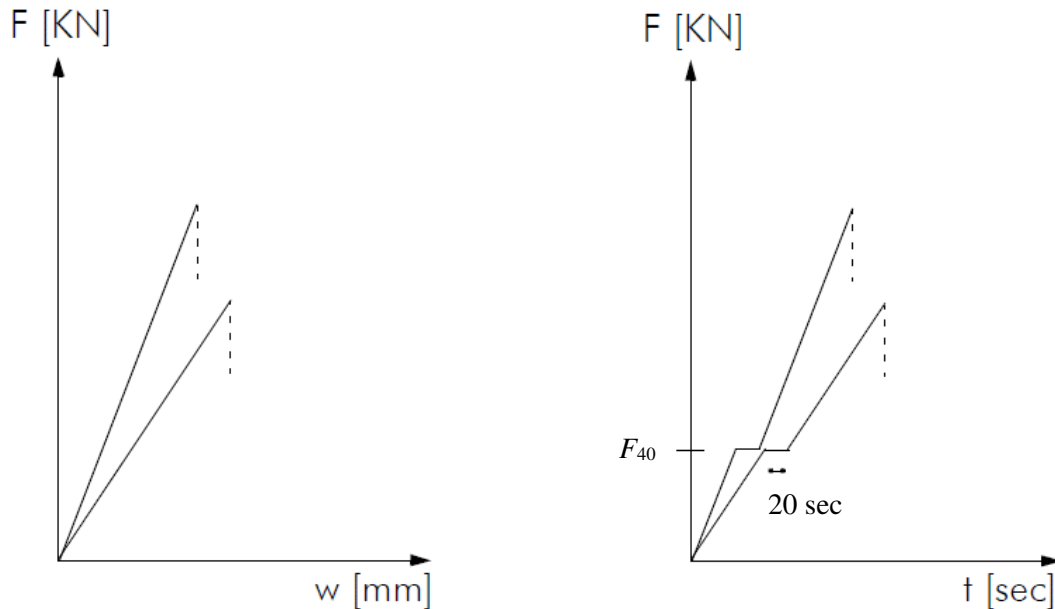


Abbildung 2-30 **Prüfkurven**  
(links: Kraft-Wegdiagramm [31]; rechts: Kraft-Zeitdiagramm in Anlehnung an [31])

In Abbildung 2-30 sieht man den schematischen Ablauf der Prüfung nach STUEFER [31]. Nach einer hier nicht abgebildeten, anfänglichen Schlupfphase, wo in allen Bolzen und Schrauben Anfangsverformungen abgebaut werden, wird im Kraft-Wegdiagramm näherungsweise das linear elastische Materialverhalten ersichtlich. Bei der Berechnung des E-Moduls wird dieser Effekt mit der Kraft  $F_{10}$  als untere Grenze berücksichtigt, welche 10 % der erwarteten Bruchkraft  $F_{t,90,\text{max,est}}$  entspricht. Mit gleichbleibender Geschwindigkeit wurde der Versuch bis zu einer vordefinierten Kraft von rd. 40 % der erwarteten Bruchlast ( $F_{40}$ ) gefahren. Auf dieser Laststufe gab es eine Pause von 20 Sekunden, in der die Messinstrumente (DD1) demontiert wurden. Anschließend wurde die Prüfung bis zum Bruch des Prüfkörpers fortgesetzt.

Tabelle 15 **Stufendefinition und Vorschubgeschwindigkeit**

	$F_{40}$ [kN]	$v_{\text{Test}}$ [mm/min]
<b>Serie 1 (1s)</b>	20	0,25
<b>Serie 2 (5sGL)</b>	10	0,25
<b>Serie 3 (3sCL)</b>	20	0,40
<b>Serie 4 (5sCL)</b>	20	0,40
<b>Serie 5 (7sCL)</b>	12	0,25
<b>Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	60	0,60
<b>Serie 7 (5sVL)</b>	20	0,40

Anmerkung: Die Geschwindigkeit, sowie die Stufen wurden jeweils nach den ersten drei Versuchskörpern jeder Serie endgültig festgelegt.

## 2-4.4 DATENERFASSUNG

Die Daten der Wegaufnehmer wurden über den Messkraftverstärker Quantum X 840 A von HBM an die dazugehörige CATMAN AP Messtechnik Software (DAQ Software) [61] übertragen. Nach dem Beenden einer Prüfung wurden die Daten als Textdokument (.txt), betitelt mit der Prüfkörpernummer, abgespeichert. Ergänzend zur digitalen Datenerfassung wurden manuell Prüfprotokolle geführt. In diesen Prüfprotokollen wurden für jeden einzelnen Prüfkörper Besonderheiten, aber auch das Bruchbild beschrieben. Zudem wurden dort auch die Prüfgeschwindigkeiten, das Lastniveau der Belastungspause (vgl. Versuchsablauf) und die Maximalkraft vermerkt.

Nach dem Bruch erfolgte die Fotodokumentation. Im noch eingebauten Zustand wurde je ein Foto der Ansichten, in der Reihenfolge der Wegaufnehmer (vgl. Kapitel 2-4.1.1), angefertigt. Im ausgebauten Zustand wurden die Bruchflächen fotografiert, dabei gibt es eine Draufsicht, eine Ansicht und ein Überblicksfoto.

## 2-4.5 HOLZFEUCHTIGKEIT

Unmittelbar nach den erfolgten Prüfungen wurden aus den Prüfkörpern Darrproben herausgeschnitten. Die Proben wurden jeweils aus der gebrochenen Lamelle, bei Interfacebrüchen aus einer der benachbarten Lamellen entnommen. Dabei wurde auf die Forderung der ON EN 408(2012) [44] Rücksicht genommen, die vorgibt, dass der Abschnitt über den ganzen Querschnitt frei von Ästen und Harzgallen sein soll. Nach einer sofortigen Wägung wurden die Holzstücke gesammelt in den Darrschrank gegeben und bei  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet. Als Massekonstanz bezeichnet die EN 13183-1(2004) [62] Holzproben, dessen Masseunterschied zwischen zwei Wägevorgängen im Abstand von 2 h geringer als 0,1 % ist. Nach der Rückwägung erfolgte die Berechnung der Holzfeuchtigkeit mit folgender Formel:

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} * 100 \quad (2.6)$$

Dabei sind:

- $u$  .....Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Prüfung [%]
- $m_u$  .....Masse feucht [g]
- $m_o$  .....Masse trocken [g]

## 2-5 AUSWERTEMETHODIK

### 2-5.1 ERMITTLUNG VON KENNGRÖSSEN

Die Rohdaten wurden zur Weiterverarbeitung serienweise gesammelt, in Microsoft EXCEL® importiert und für jede Prüfung analysiert. Dabei wurde die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$ , sowie der Querkzug E-Modul  $E_{t,90}$  für jeden einzelnen Prüfkörper bestimmt.

#### 2-5.1.1 Querkzugfestigkeit $f_{t,90}$

Die Querkzugfestigkeit berechnet sich wie folgt:

$$f_{t,90} = \frac{F_{t,90,max}}{b \cdot l} \quad (2.7)$$

Dabei sind:

$F_{t,90,max}$  .. Maximalkraft [N]

$b \cdot l$  ..... nominelle Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

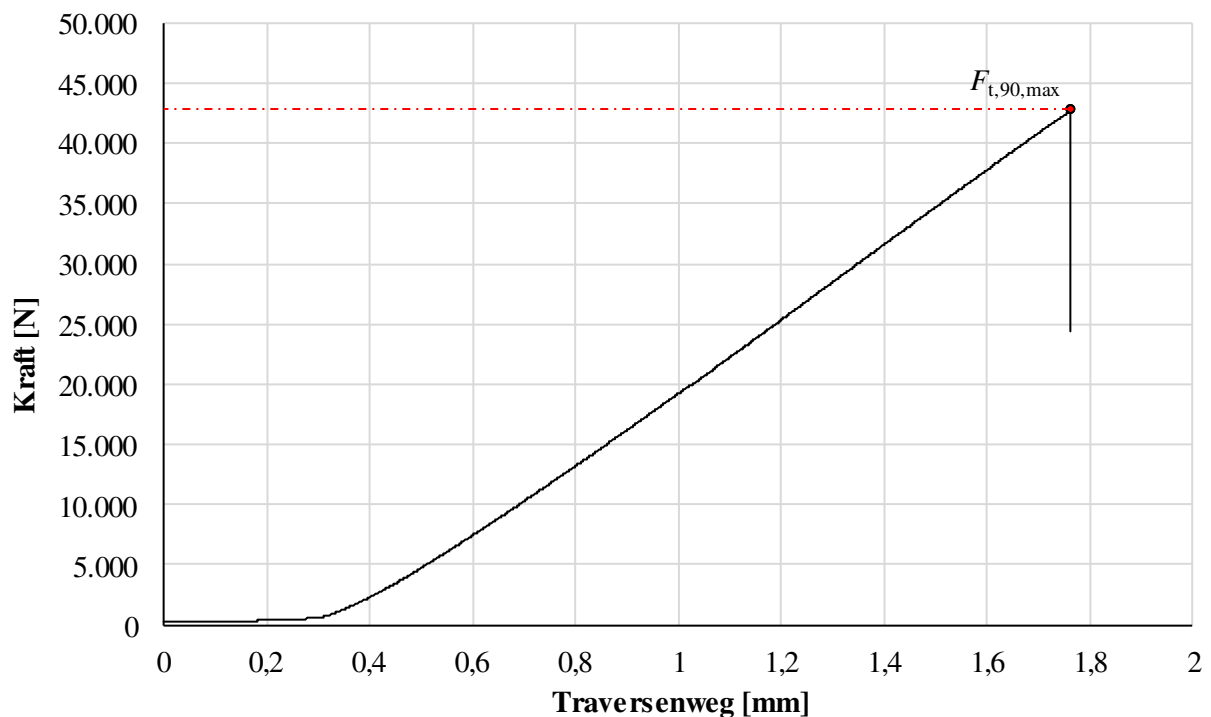


Abbildung 2-31 Kraft-Wegdiagramm bei Prüfkörper 4-16

In Abbildung 2-31 ist die, zur Berechnung der Querkzugfestigkeit verwendete Kraft  $F_{t,90,max}$  markiert. Bei den annähernd ideal spröde versagenden Einzellamellen und Brettsperrholzprüfkörpern entspricht dies der Kraft zum Versagenszeitpunkt. Bei den Prüfkörpern der BSH-Serie (5sGL) ist  $F_{t,90,max}$  die Kraft zum Zeitpunkt des Initialrisses, während die Kraft zum Zeitpunkt des Versagens bei 5sGL im Regelfall tiefer als  $F_{t,90,max}$  war.

Die Kraft-Wegdiagramme jeder Serie mit einer Markierung der verwendeten Kraft für die Auswertung der Querkzugfestigkeit befinden sich im Anhang B-3. Zur besseren Übersicht wurden je Serie mehrere Diagramme zu jeweils circa 10 Prüfkurven angefertigt.



### 2-5.1.2 Querzug-E-Modul $E_{t,90}$

Der Querzug E-Modul  $E_{t,90}$  wird nach ON EN 408 [44] folgendermaßen ermittelt:

$$E_{t,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot h_0}{(w_{40} - w_{10}) \cdot b \cdot l} \quad (2.8)$$

Dabei sind:

- $F_{10}$  .....10 % der Bruchlast  $F_{t,90,max}$  [kN]
- $F_{40}$  .....40 % der Bruchlast  $F_{t,90,max}$  [kN]
- $w_{10}$  .....10 % der Bruchverformung [mm]
- $w_{40}$  .....40 % der Bruchverformung [mm]
- $h_0$  .....Messbasis [mm]
- $b * l$  .....nominelle Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

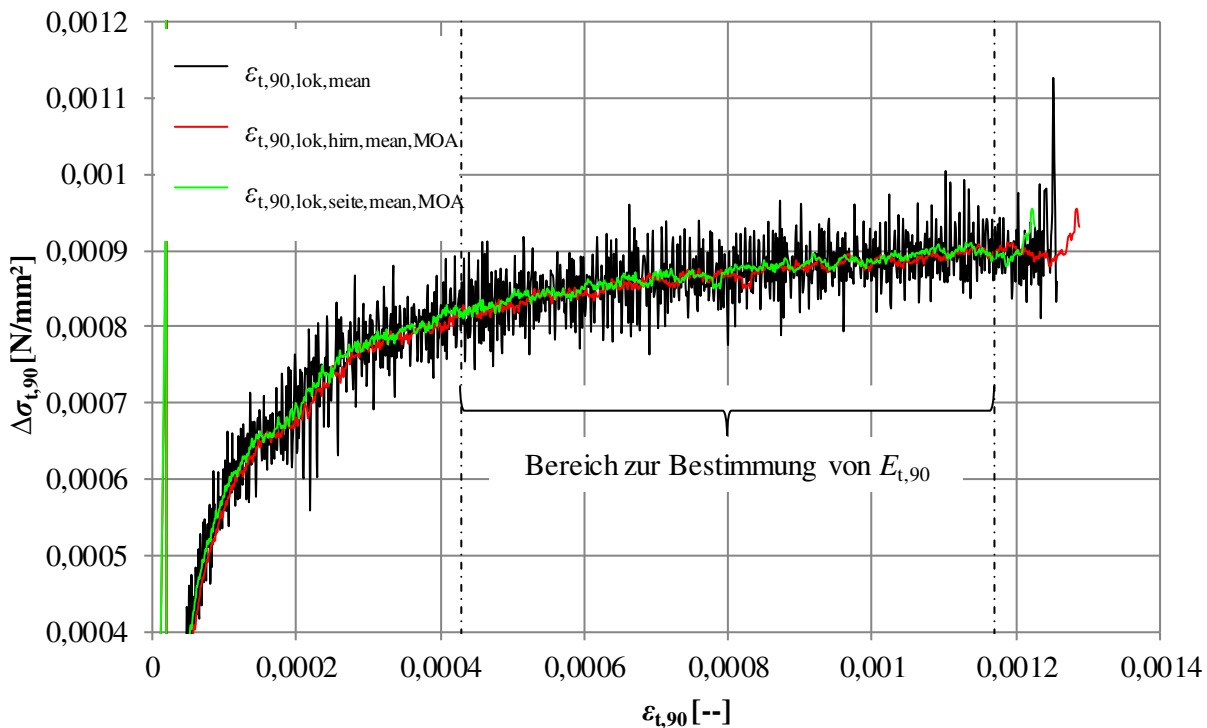


Abbildung 2-32 Spannungänderung bis zur Abnahme der Wegaufnehmer als Beispiel bei Prüfkörper 4-16

Im Zuge der Auswertung wurde der Bereich zur Bestimmung von  $E_{t,90}$  für jeden Prüfkörper manuell angepasst und kann demnach von den Grenzen der ON EN 408 [44] abweichen. Es wurde, wie in Abbildung 2-32 zu sehen, ein möglichst großer Bereich gesucht, bei dem die Spannungsänderung  $\Delta\sigma_{t,90}$  annähernd konstant ist. Für diesen Bereich liegt somit annähernd linear elastisches Materialverhalten vor.

Die aufgetragene Dehnung  $\varepsilon_{t,90,lok,mean}$  wird aus dem Mittelwert aller vier Wegaufnehmer ermittelt. Zusätzlich wurde der Mittelwert der zwei seitlichen Wegaufnehmer ( $\varepsilon_{t,90,lok,seite,mean}$ ), sowie der zwei DD1 „Ost“ und „West“ ( $\varepsilon_{t,90,lok,hirn,mean}$ ) aufgetragen. Zur besseren Sichtbarkeit wurde bei diesen beiden Verläufen der laufende Durchschnitt – moving average (MOA) gebildet. Durch diese Methode, wo jeweils die zehn Vorgängerwerte in der Datenreihe gemittelt werden, wird das Messrauschen auf ein Minimum reduziert. Durch die getrennte Auftragung der beiden richtungsabhängigen Dehnungen ist es möglich, Messunregelmäßigkeiten besser zu detektieren.

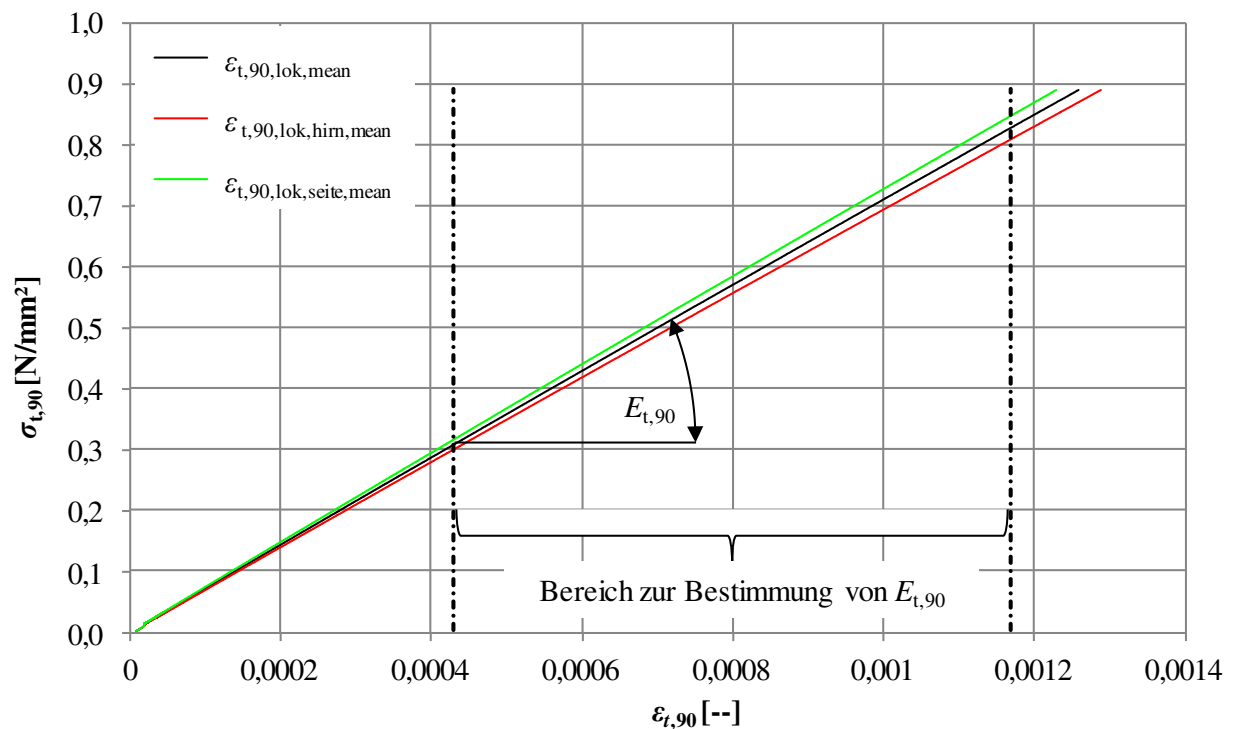


Abbildung 2-33 Arbeitslinie zur Bestimmung von  $E_{t,90}$  als Beispiel bei Prüfkörper 4-16

In Abbildung 2-33 ist das Spannungs-Dehnungsdiagramm zur Bestimmung vom Querzug-E-Modul  $E_{t,90}$  zu sehen. Wie auch schon in Abbildung 2-32, wurden neben der Dehnung aus allen vier Wegaufnehmern auch die beiden richtungsabhängigen Dehnungen aufgetragen. In weiterer Folge wurden auf Basis des Hook'schen Gesetzes (vgl. Formel (2.5)) drei E-Moduln bestimmt.

- $E_{t,90,lok}$
- $E_{t,90,lok,seite}$
- $E_{t,90,lok,him}$

Zur Überprüfung der berechneten Werte wurde eine einfache lineare Regressionsanalyse, im individuell ausgewählten Bereich zur Bestimmung der E-Moduln, durchgeführt. Die Korrelation soll in diesem Bereich nahe 1,0 sein. Die beiden verwendeten Funktionen in MS EXCEL® sind RGP und KORREL.

### 2-5.1.3 Rohdichte

Die ON EN 408 (2012) [44] schlägt vor, die Rohdichte bei Prüfkörpern für Festigkeitskenngrößen rechtwinklig zur Faserrichtung aus der Masse und des Volumens vor der Prüfung zu berechnen. Dies führt bei Prüfkörpern in Subserien zu nahezu identen Rohdichten und gibt keine Auskunft über die Rohdichte im Bruchbereich.

Es wurde daher entschieden, dass für die Auswertung die Rohdichte in der gebrochenen Lamelle herangezogen wird. Bei Interfacebrüchen im Prüfkörper (vgl. Kapitel 2-6.1.2) wurde der Mittelwert der Rohdichte der beiden benachbarten Schichten verwendet. Da pro Prüfkörper nur eine Darrprobe angefertigt wurde, wurde die Rohdichte der angrenzenden Schicht mit dem Mittelwert der Holzfeuchtigkeit der jeweiligen Serie nach Formel (2.5) korrigiert.

Bei Interfacebrüchen im Prüfkörper der Serie 5sCL300<sup>2</sup> wurde für die Auswertung der Mittelwert der Rohdichten aller 4 beteiligten Lamellen herangezogen.

Lediglich zur Bestimmung des Equikorrelationskoeffizienten  $\rho_{equi}$  wurde die Rohdichte des gesamten Prüfkörpers  $\rho_{12,glob}$  verwendet.

## 2-5.2 KORREKTUREN

### 2-5.2.1 Eigengewicht

Die Prüfergebnisse wurden mit dem Eigengewicht korrigiert. Die Spannungen im Prüfkörper würden durch das Eigengewicht überschätzt werden, dies hängt mit der Einbaureihenfolge in die Prüfmaschine zusammen. Sämtliche Prüfkörper wurden zuerst unten in das Gabellager eingehängt und infolgedessen aufgerichtet und mit dem zweiten Bolzen oben spannungsfrei fixiert (vgl. Kapitel 2-4.2).



Abbildung 2-34 Eigengewichtskorrektur  
 (links: Serien mit Querschnitt  $150^2 \text{ mm}^2$ ; rechts Serie mit Querschnitt  $300^2 \text{ mm}^2$ )

Nach dem zwangungsfreien Einbau lastete der komplette Prüfkörper inklusive der stählernen Lastenleitungsplatten am unteren Bolzen (grüner Vektor in Abbildung 2-34). Die Prüfmaschine wurde in diesem Zustand, vor dem Start des Versuches, tariert. Wie anhand der roten Vektoren ersichtlich, herrschen zu diesem Zeitpunkt in der angenommenen Versagensfuge, Druckspannungen zufolge Eigengewicht der oberen Prüfkörperhälfte. Demzufolge wurde die Maximalkraft um diesen Betrag korrigiert.

Tabelle 16 Eigengewichtskorrektur

	1s	5sGL	3sCL	5sCL	7sCL	5sCL300	5sVL
<b>Korr. [N]</b>	-130	-136	-133	-136	-139	-602	-136

Das Eigengewicht der Lastenleitungsblöcke und der Prüfkörper wurde rechnerisch mit einer durchschnittlichen Rohdichte von  $450 \text{ kg/m}^3$  ermittelt. Dies wurde pauschal für jede Serie bis zur Mitte des Prüfkörpers gemacht. Auf eine genaue Gewichtsermittlung jedes gebrochenen Prüfkörpers wurde verzichtet. Das Gewicht der Lastenleitungsplatten war bekannt. Somit ergaben sich die in Tabelle 16 dargestellten Korrekturkräfte.



## 2-5.2.2 Rohdichte

Trotz Akklimatisierung der Rohware in der Klimakammer stellen sich unterschiedliche Holzgleichsfeuchten ein. Um dies berücksichtigen zu können, wurde die Rohdichte nach ON EN 384 (2016) [37] folgendermaßen korrigiert:

$$\rho_{12} = \rho_u * (1 - 0,005 * (u - u_{ref})) \quad (2.9)$$

Dabei sind:

- $\rho_{12}$  ..... korrigierte Rohdichte bei einer Referenzholzfeuchtigkeit von 12 % [%]
- $\rho_u$  ..... Rohdichte zum Prüfzeitpunkt [kg/m<sup>3</sup>]
- $u$  ..... Holzfeuchtigkeit zum Prüfzeitpunkt (8 % ≤ u ≤ 8 %) [%]
- $u_{ref}$  ..... Referenzholzfeuchtigkeit [%]

## 2-5.3 TEILVERSAGEN

Um zu überprüfen, ob es sich um ideal sprödes Materialverhalten handelt, wurde für jeden Prüfkörper ein Diagramm der Kraftänderung je Zeilenfortschritt in der Datenreihe angefertigt

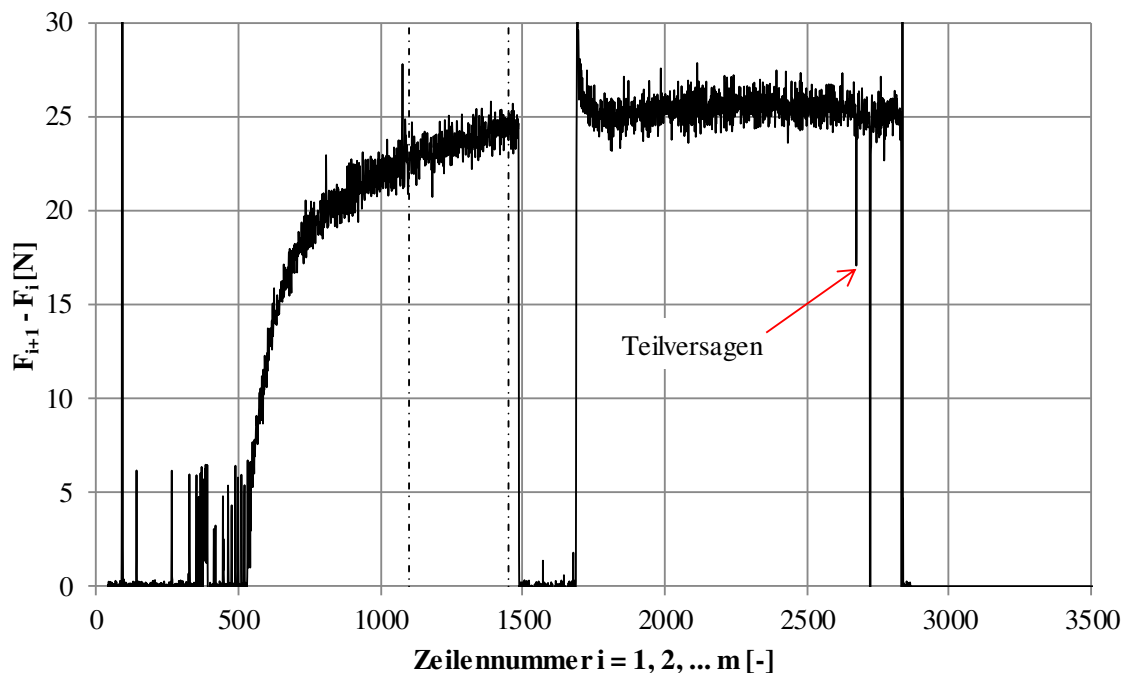


Abbildung 2-35 Detektion von Teilversagen als Beispiel bei Prüfkörper 3-08

In Abbildung 2-35 ist zu Beginn bis etwa zur Zeile 500 kein Kraftanstieg zu sehen. In dieser Phase wird Schlupf in der Prüfkonfiguration abgebaut. Danach wird Spannung im Prüfkörper aufgebaut, bis sich circa ab Zeile 1100 linear elastisches Materialverhalten einstellt und die Kraftänderung annähernd konstant wird. Dies ist der Bereich zur Bestimmung der E-Moduln (vgl. Kapitel 2-5.1.2). In der anschließenden Belastungspause zur Abnahme der Wegaufnehmer (vgl. Kapitel 2-4.3) fällt die Kraftänderung wieder auf „null“ ab, das heißt, dass die Kraft konstant gehalten wird. Nach der Pause stellt sich alsbald linear elastisches Materialverhalten ein, bis es bei circa 85 % der Bruchkraft ein Teilversagen gibt. Der abrupte Abfall im Kraftänderungsverlauf lässt auf einen ersten merkbaren Riss im Prüfkörper deuten.

Es wurde ausgewertet, bei wie vielen Prüfkörpern je Prüfserie (n / N [%]) ein solches Teilversagen auftrat und auf welchem Lastniveau  $\zeta$  sich erste Risse einstellten. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich dabei um eine qualitative Auswertung handelt, da es nicht immer eindeutig ist, ob es sich bei einem Kraftabfall immer um einen Riss im Prüfkörper handelt. Es könnte auch zu Spannungsumlagerungen in der Fuge zum Lasteinleitungsblock kommen, was de facto im Diagramm nicht unterscheidbar ist.

## 2-5.4 PRÜFKÖRPERSELEKTION

Um statistisch aussagekräftige Werte zu erhalten, wurden die Daten jeder Serie auf Auffälligkeiten überprüft. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Extremwerte und auf die Abweichung dieser zur restlichen Datenreihe gelegt. Auffällige Prüfkörper wurden komplett ausselektiert, wobei bei Prüfkörpern mit auffälligen Einzelwerten die unauffälligen Kennwerte in der Auswertung belassen wurden.

Die Selektion wurde nach folgenden Kriterien durchgeführt:

- Querkzugfestigkeit, E-Modul
- Versagensart Markröhre, sowie Klebstoffversagen im Lasteinleitungsbereich
- Messfehler oder Auffälligkeiten im Prüfprotokoll

Die ausselektierten Prüfkörper sind im Anhang B-4 serienweise fotodokumentiert. Am Beginn jeder Serie ist die kumulierte Häufigkeit der Querkzugfestigkeit inklusive der auffälligen Prüfkörper und den dazu angepassten 2pLN (2-parametrische Lognormalverteilung) und 2pW (2-parametrische Weibullverteilung) zu sehen. Darauffolgend sind jeweils ein Foto der Bruchansicht sowie der Bruchfläche der betroffenen Prüfkörper zu sehen.

Im Kapitel B-7 sind die Einzelauswertungen der Prüfungen gelistet und die ausgeschiedenen Prüfkörper sowie ausgeschiedene Einzelwerte rot hervorgehoben.

Prüfkörper, die eine Markröhre in einer der Schichten hatten, wurden komplett entfernt, da nicht in allen Serien entsprechende Proben vorhanden waren und die Probenanzahl zudem so gering war, dass der Einfluss weder statistisch noch durchgängig zwischen den Serien abbildbar war. Der negative Einfluss einer vorhandenen Markröhre auf Festigkeit und Steifigkeit wird im Kapitel 1-3.1.2 „Mark“ diskutiert. Prüfkörper, bei denen der Klebstoff im Lasteinleitungsbereich versagt hat, wurden gesondert auf deren Festigkeit und Steifigkeit untersucht. Bei unauffälligen Kenngrößen gegenüber der restlichen Datenreihe wurden sie mitausgewertet, obwohl die Verklebung nicht einwandfrei war.

## 2-5.5 STATISTISCHE VERTEILUNG DER DATEN

Im Rahmen der Ergebnisauswertungen wurde mit zwei Verteilungsmodellen gearbeitet und diese miteinander verglichen. BERGLEZ et al. [63] schreiben, dass die Logarithmische Normalverteilung (engl. LND) ein repräsentatives Verteilungsmodell für multiplikative Prozesse darstellt. Dazu zählen im Allgemeinen Untersuchungen zu Festigkeitskenngrößen.

Die Weibull-Verteilung lässt sich aus dem „Weakest-Link“ Modell ableiten, welches besagt, dass das Versagen des Elements mit geringster Festigkeit zum Versagen des Systems führt (siehe ‚Serieller Größeneffekt‘ in Kapitel 1-3.1.3). Aufgrund dieses Verhaltens bei Belastungen quer zur Faser und des Vorliegens von sprödem Material eignet sich die Weibull-Verteilung gut zur Beschreibung von Querkzuguntersuchungen und zur Untersuchung des Volumeneffektes (vgl. [2]).

### 2-5.5.1 Log-Normalverteilung

Bei der Untersuchung von Festigkeitskenngrößen können physikalisch nur Werte  $> 0$  auftreten. Die Logarithmusfunktion bildet diesen Sachverhalt ab, da sie nur für positive Abszissenwerte definiert ist. Für die Auswertung von Versuchsdaten mit großem Variationskoeffizienten, was für Zugprüfungen bei Holz für gewöhnlich zutrifft, erweist sich die LND als sinnvoll (vgl. [2]).

Eine Variable  $Y$  ist laut BRANDNER [40] log-normalverteilt, wenn:

$$X = \ln(Y) \sim ND \quad (2.10)$$

Die Dichtefunktion lautet (vgl. [63]):

$$f(y) = \frac{1}{y \cdot \sigma_X \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(y) - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right], \text{ für } y > 0 \quad (2.11)$$

mit den beiden Parametern:

$$\mu_X = \ln \left( \frac{\mu_Y^2}{\sqrt{\mu_Y^2 + \sigma_Y^2}} \right) \quad (2.12)$$

$$\sigma_X^2 = \ln \left( \frac{\sigma_Y^2}{\mu_Y^2} + 1 \right) \quad (2.13)$$

Dabei sind:

$\mu_X$  ..... Erwartungswert der logarithmisch transformierten Zufallsvariable  $X$   
 $\sigma_X^2$  ..... Varianz der logarithmisch transformierten Zufallsvariable  $X$

Die Verteilungsfunktion der Log-Normalverteilung ergibt sich nach SCHICKHOFER [2] aus dem Integral der Dichtefunktion.

### 2-5.5.2 Weibull-Verteilung

Wie auch schon die Log-Normalverteilung ist auch die Weibull-Verteilung nur für positive Werte einer Zufallsvariable definiert. Im Gegensatz zur Log-Normalverteilung ist die Verteilungsfunktion nach BERGLEZ et al. [63] bei der Weibull-Verteilung geschlossen lösbar:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right], \text{ für } x > 0 \quad (2.14)$$

Dabei sind:

$\alpha$  ..... Lageparameter  
 $\beta$  ..... Formparameter

### 2-5.5.3 Schätzung der Parameter

#### Log-Normalverteilung

Die Parameter der LND können über die Momentenmethode anhand des arithmetischen Mittels, welches das erste zentrale Moment darstellt, und der empirischen Varianz, dem zweiten Moment, abgeschätzt werden. Dies ist laut BERGLEZ et al. [63] eine sehr einfache Methode, welche im Allgemeinen konsistente Schätzer liefert. Gegenwärtig wird aber zunehmend die Maximum Likelihood Methode (MLE) zur Schätzung von Parametern eingesetzt.

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Parameter mittels MLE geschätzt. Dazu wurde im GNU Softwarepaket ‚R‘ im Package ‚MASS‘ mit der Funktion ‚fitdistr‘ gearbeitet. Bei der Schätzung der Parameter ergab sich die Varianz-Kovarianzmatrix nach BURY (in BRANDNER [40]) der Schätzer zu:

$$[V_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x^2}{n} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_x^2}{2n} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Die Varianzen ergeben sich zu

$$\text{Var}[\hat{\mu}_x] = \frac{\sigma_x^2}{n} \quad \text{und} \quad \text{Var}[\hat{\sigma}_x] = \frac{\sigma_x^2}{2n} \quad (2.16)$$

Da die Kovarianzen Null waren, waren die beiden geschätzten Parameter voneinander unabhängig.

#### Weibull-Verteilung

Die Verteilungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Weibullverteilung sind iterativ zu bestimmen. Die Maximum-Likelihood Methode (engl. MLE) bietet sich laut BERGLEZ et al. [63] dazu an und wird in dieser Arbeit, wie auch schon bei der Log-Normalverteilung in ‚R‘, mit der Funktion ‚fitdistr‘ in ‚MASS‘ numerisch durchgeführt.

Dabei ergab sich folgende Varianz-Kovarianzmatrix nach BURY (in BRANDNER [40])

$$[V_{ij}] = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1,10866 \frac{\alpha^2}{\beta^2} & 0,25702 \alpha \\ 0,25702 \alpha & 0,60793 \beta^2 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Die Varianzen ergeben sich zu

$$\text{Var}[\hat{\alpha}] = 1,10866 \frac{\alpha^2}{n \beta^2} \quad \text{und} \quad \text{Var}[\hat{\beta}] = 0,60793 \frac{\beta^2}{n} \quad (2.18)$$

Die beiden Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  sind nicht unabhängig, da die Kovarianzen ungleich Null sind.

#### Wahl der am besten geeigneten Verteilungsfunktion

„Generell gilt, dass jenes Modell die besten Aussagen trifft, das die empirischen Daten am besten approximiert.“ [2] In dieser Arbeit wurden die Verteilungen über die Summe der maximierten log-Likelihood-Funktion beurteilt. Dieser Wert wurde bei der Schätzung der Parameter in ‚R‘ mit der Bezeichnung ‚loglik‘ bei der Anwendung der Funktion ‚fitdistr‘ ausgegeben.

‚Loglik‘ steht laut RIPLEY [64] für „Log-Likelihood“ und soll laut WICKLIN [65] für die Verteilungsfunktion hoch sein. Die Verteilung mit dem höheren Wert für Log-Likelihood eignet sich besser für die Datenreihe.

## 2-5.6 KORRELATION

Die Korrelation beschreibt die Abhängigkeit zweier Größen, wobei der Grad des Zusammenhanges durch den Korrelationskoeffizienten  $r_{xy}$  angegeben wird. Die dimensionslose Größe kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, also negative sowie positive lineare Zusammenhänge beschreiben (vgl. [66]).

- $|r_{xy}| = 0$                kein linearer Zusammenhang
- $|r_{xy}| = 0$  bis 0,5       schwacher linearer Zusammenhang
- $|r_{xy}| = 0,5$  bis 0,8   mittlerer linearer Zusammenhang
- $|r_{xy}| = 0,8$  bis 1,0   starker linearer Zusammenhang
- $|r_{xy}| = 1,0$            perfekter (funktionaler) Zusammenhang

SCHIEFER et.al. [66] schreiben weiter, dass das Quadrat des Korrelationskoeffizienten  $r_{xy}$  das Bestimmtheitsmaß darstelle. Das Bestimmtheitsmaß  $B$  bzw.  $R^2$  gibt an, wie viel Prozent der gesamten Varianz (Streuung) durch das Regressionsmodell erklärt werden kann.

Die Streudiagramme wurden mit MS EXCEL® angefertigt und eine Trendlinie mit Potenzfunktion hinzugefügt. Es wurde ein möglicher Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeit  $f_{t,90}$  und Querzug-E-Modul  $E_{t,90}$  zur korrigierten Rohdichte  $\rho_{12}$  untersucht sowie eine Korrelation zwischen Querzugfestigkeit und Querzug-E-Modul.

## 2-5.7 SUBSERIENANALYSE

Folgendes zweistufiges hierarchisches Modell ist durch das Vorliegen von Subserien gegeben:

$$Z_{ik} = Y_k + X_i | k. \quad (2.19)$$

Dabei sind:

$Y_k$  ..... Mittelwert von Subserie  $k$

$X_i | k$  ..... unabhängig und identisch verteilte (engl. iid) Abweichung der Probe  $i$  von  $Y_k$  in Subserie  $k$

Mit  $i = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N, M$  ist laut BRANDNER et.al. [67] die Anzahl der Zufallsvariablen (Anzahl der Prüfkörper je Subserie),  $N$  die Anzahl der Elemente pro Variable (Anzahl der Subserien).

Alle Einträge in der Korrelationsmatrix  $\rho$  mit der Größe  $M \times M$  sind laut BRANDNER et al. [67] gleich, mit  $\rho_{ij} = \rho_{\text{equi}}$  für  $i, j = 1, \dots, M, \forall i \neq j$ , dabei bezeichnet  $\rho_{ij}$  die paarweise Korrelation und  $\rho_{\text{equi}}$  den Equikorrelationskoeffizienten.

$$\rho_{\text{equi}} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \quad (2.20)$$

Dabei sind:

$\sigma_X^2$  .....  $\text{Var}[X_i | k]$  (Varianz innerhalb der Subserie  $k$ )

$\sigma_Y^2$  .....  $\text{Var}[Y_k] = \text{CoVar}[Y_k + X_i | k, Y_k + X_i | k]$  (Varianz zwischen den Subserien)

$\sigma_X^2 + \sigma_Y^2$  ..  $\text{Var}[Z_{ik}]$  (Gesamtvarianz)

Die Erwartungswerte sind  $\mu_X = E[X_i | k] = 0$  und  $E[Z_{ik}] = E[Y_k] = \mu_Y$ .

Dieses hierarchische Modell nach KÄLLSNER und DITLEVSEN kann laut BRANDNER et al. [67] direkt aus der hierarchischen Materialstruktur von Holz abgeleitet werden. Das Ziel der Untersuchung ist das Feststellen der Korrelation zwischen den Prüfkörpern einer Subserie.

BRANDNER et al. [68] fassen folgende Bereiche von Equikorrelationskoeffizienten für Kenngrößen von Vollholz baupraktisch üblicher Qualitäten zusammen:

- $\rho_{\text{equi}}[\rho_{12}]$            0,80 ÷ 0,90
- $\rho_{\text{equi}}[E_{t,90}]$        0,60 ÷ 0,70
- $\rho_{\text{equi}}[f_{t,90}]$        0,40 ÷ 0,50

Dabei sei erwähnt, dass die Werte höher werden, je höher die Qualität und Sortierklasse des Holzes ist.

## 2-5.8 BERECHNUNG CHARAKTERISTISCHER WERTE

Die Berechnung der charakteristischen Werte  $m_k$  erfolgte nach ON EN 14358 (2016) [69]. Bei der Ermittlung der 5 %-Quantilwerte als Punktschätzer der Verteilungsfunktion für  $m$  wird eine unendlich große Prüfreihe angenommen. In der Berechnung der charakteristischen Querkzugfestigkeit wird zudem die Unsicherheit eines endlichen Prüfumfanges berücksichtigt. Für die vorliegenden Prüfergebnisse der Querkzugfestigkeit, dem Querkzug-E-Modul und der Rohdichte wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Die Parameter der Lognormalerteilung und folglich das 5 %-Quantil sowie der charakteristische Wert auf Basis des 5 %-Quantils werden hierfür wie folgt bestimmt:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad \text{und} \quad s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2}, 0,05 \right. \quad (2.21)$$

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (2.22)$$

Dabei sind:

- $\bar{y}$ .....Mittelwert der Stichprobe ( $y = \ln m$  für logarithmisch normalverteilte Variablen)
- $n$ .....Anzahl der Prüfergebnisse
- $m_i$ .....individueller Prüfwert der Zufallsgröße  $m$
- $s_y$ .....Standardabweichung der logarithmierten Prüfwerte
- $m_k$ .....5 %-Quantil der Zufallsgröße  $m$
- $k_s(n)$ .....Faktor zur Berechnung charakteristischer Werte unter Einbeziehung des Stichprobenumfanges

## 2-6 VERSAGENSARTEN

Im Zuge der Prüfungen konnten mehrere verschiedene Versagensarten charakterisiert werden. Bei der Clusterung wurde auf die Beobachtungen von DILL-LANGER [30], STUEFER [31] und BIDA KOV [42] Rücksicht genommen und die Versagen in die zwei Hauptgruppen „Interfacebrüche“, sowie „Lamellenbrüche“ eingeteilt. Obwohl in dieser Arbeit nur mit Brettabschnitten und nicht mit Lamellen gearbeitet wurde, wurde hier die Nomenklatur von DILL-LANGER [30] übernommen. Von Lamellen spricht man bei längskeilgezinkter Halbware für die Produktion von Brettschicht-, als auch Brettsperholz. In Anlehnung an STUEFER [31] wurden Untergruppen der Versagensarten erstellt.

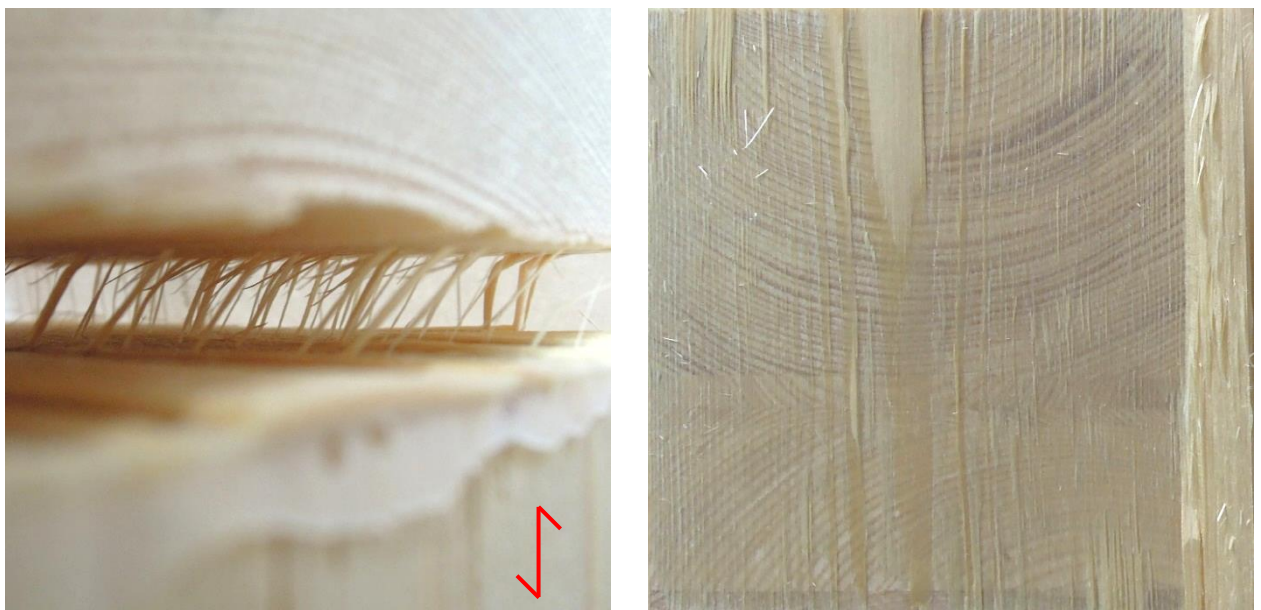
Eine ergänzende Beschreibung der Versagensarten ist im Kapitel 1-3.2 zu finden.

### 2-6.1 INTERFACEBRÜCHE

Die Brüche im Nahbereich einer Klebefuge wurden in dieser Arbeit ein weiteres Mal unterteilt, nämlich in Interfacebrüchen im Lasteinleitungsbereich und Interfacebrüchen im Prüfkörper.

#### 2-6.1.1 Interfacebruch Lasteinleitung (IFL)

Vom *Interfacebruch Lasteinleitung* wird gesprochen, wenn der querzugbeanspruchte Brettabschnitt in der Fugennähe zum Lasteinleitungsblock versagt hat.



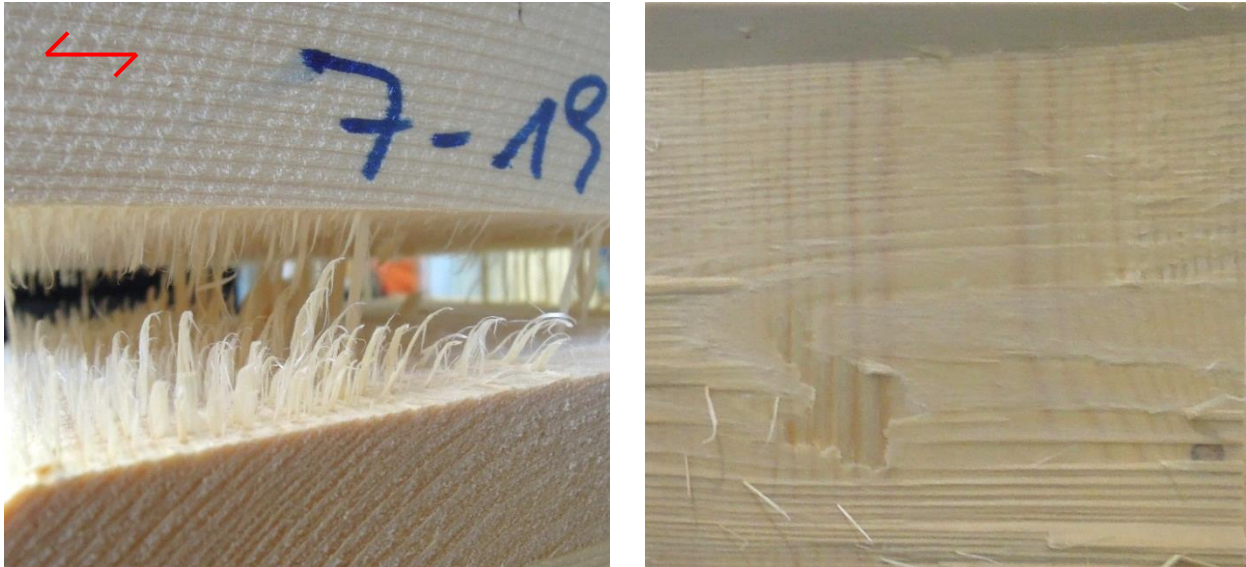
**Abbildung 2-36** *Interfacebruch Lasteinleitung (IFL) bei Prüfkörper 3-05*  
(links: Bruchfuge mit Fasern; rechts: Faserbelag am Lasteinleitungsblock)

Es versagen die Fasern des Prüfkörpers (Abbildung 2-36-links) und nicht die stehenden Fasern des Lasteinleitungsblockes. Ein Faserbelag des Brettabschnittes (Abbildung 2-36-rechts), stellt sicher, dass es kein Klebstoffversagen gegeben hat. Typisch ist, wie auch schon DILL-LANGER [30] in Abbildung 1-36-links dargestellt hat, dass im Randbereich ein Bereich mit Radialbruch versagt hat.



### 2-6.1.2 Interfacebruch im Prüfkörper (IFP)

Bei *Interfacebrüchen* im Prüfkörper versagt der Nahbereich von Klebstofffugen zwischen den zu untersuchenden Brettabschnitten.



**Abbildung 2-37** *Interfacebruch im Prüfkörper (IFP) bei Prüfkörper 7-19*  
 (links: Bruchfuge mit Fasern; rechts: Faserbelag an der benachbarten Schicht)

Ein Faserbelag (siehe Abbildung 2-37) an der benachbarten Lage, stellt wiederum sicher, dass es ein Holzversagen und keinesfalls ein Klebstoffversagen gegeben hat.

### 2-6.1.3 Mischbruch Lasteinleitung (MBL)

Im Gegensatz zu reinen Interfacebrüchen im Lastenteilbereich (vgl. Kapitel 2-6.1.1) ist bei *Mischbrüchen im Lastenteilbereich* ein ausgeprägter Faserbelag des angrenzenden Brettabschnittes am Lastenteilblock vorhanden. Typisch für Mischbrüche ist sowohl das Vorhandensein von Bereichen mit Tangentialbruch als auch Bereichen mit Radialbruch.



**Abbildung 2-38** *Mischbruch im Lastenteilbereich (MBL) bei Prüfkörper 4-18*  
 (links: Bruchansicht; rechts Bruchfläche)



## 2-6.2 LAMELLENBRÜCHE

### 2-6.2.1 W-Bruch (WB)

Wie auch schon bei den Untersuchungen von Brettschichtholz von STUEFER [31] konnten auch bei der Untersuchung des Quersugverhaltens von Brettsperrholz *W-Brüche* festgestellt werden.



**Abbildung 2-39** *W-Bruch (WB) bei Prüfkörper 1-03*  
(links: Bruchansicht; rechts: Bruchfläche)

### 2-6.2.2 Jahrringbruch (JB)

*Jahrringbrüche* kommen in der vorliegenden Untersuchung selten vor, dennoch konnten sie bei der Untersuchung von Brettsperrholz sowie bei der Untersuchung der Einzelschicht festgestellt werden.



**Abbildung 2-40** *Jahrringbruch (JB) bei Prüfkörper 1-08*  
(links: Bruchansicht; rechts: Bruchfläche)

### 2-6.2.3 Markröhrenbruch (MR)

Das Versagen des juvenilen Holzes wird in dieser Arbeit als Markröhrenbruch, nicht wie bei STUEFER [31] als Kernbruch benannt. Der Versagensmodus ist derselbe und basiert auf den geringeren Festig- und Steifigkeiten im marknahen Bereich und den in Abbildung 1-24 dargestellten Spannungsspitzen zufolge der Jahrringkrümmung.



Abbildung 2-41 *Markröhrenbruch bei Prüfkörper 3-19*  
 (links: *Bruchansicht*; rechts: *Bruchfläche*)

### 2-6.2.4 Mischbruch Prüfkörper (MBP)

Beim *Mischbruch im Prüfkörper* treten Tangential- sowie Radialbrüche innerhalb einer Lamelle auf.



Abbildung 2-42 *Mischbruch Prüfkörper (MBP) bei Prüfkörper 7-11*  
 (links: *Bruchansicht*; rechts: *Bruchfläche*)



### 2-6.3 KLEBSTOFFVERSAGEN LASTEINLEITUNG (KV)

Nicht immer konnte ein perfektes Aufkleben des Lasteinleitungsblockes gewährleistet werden. Dies basiert auf die große Kapillarwirkung der Hirnholzflächen.



*Abbildung 2-43      Klebstoffversagen im Lasteinleitungsbereich (KV) bei Prüfkörper 7-01  
(links: Bruchansicht; rechts: Bruchfläche)*

Wie in Abbildung 2-43-rechts zu sehen, ist bei Prüfkörpern mit Klebstoffversagen in einigen Bereichen kein Faserbelag des Prüfkörpers am Lasteinleitungsblock zu sehen.

## KAPITEL 3: ERGEBNISSE

Nach der, wie im Kapitel 2-5.1 erklärten Auswertung der Querkzugfestigkeit, der Steifigkeit sowie der Rohdichte, werden die Ergebnisse in diesem Kapitel dargestellt, statistisch aufbereitet und interpretiert. Eine ergänzende Diskussion der Erkenntnisse wird im anschließenden Kapitel 4-1 geführt.

Im Folgenden werden die empirischen Verteilungen der einzelnen Serien und die Versagensarten näher beleuchtet. Daraufaufgehend werden die Ergebnisse der ermittelten Kenngrößen graphisch in Boxplots und tabellarisch dargestellt, ehe auf die Subserienanalyse näher eingegangen wird. Bevor der Fokus auf den Volumeneffekt gerichtet wird, wird eine Regressionsanalyse der drei Kenngrößen durchgeführt. Nicht zuletzt wird auf das Teilversagensverhalten der untersuchten Prüfkörper eingegangen. Die Einzelauswertungen für jeden Prüfkörper jeder Serie sind im Anhang B-7 zu finden.

### 3-1 EMPIRISCHE VERTEILUNGSFUNKTIONEN

Serienweise wurde eine kumulierte Verteilungsfunktion (CDF) angefertigt. Die Plots der Verteilungen sämtlicher Serien sind im Anhang B-2 vorzufinden.

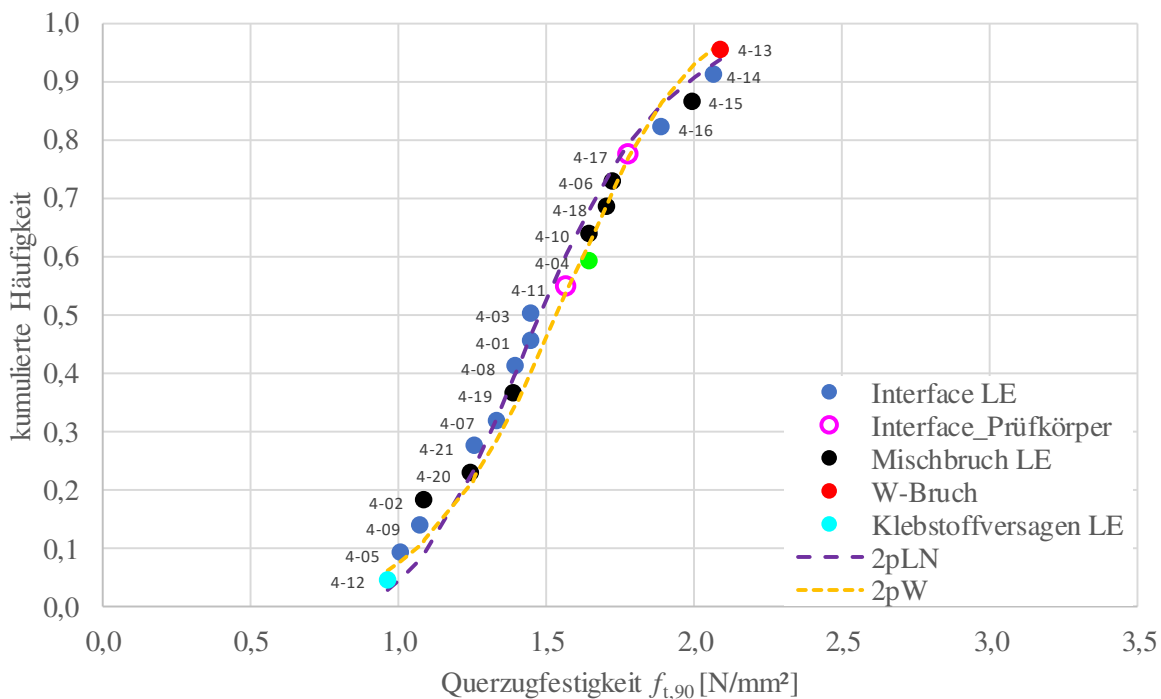


Abbildung 3-1 empirische Verteilungsfunktion Serie 4 (5sCL)

In Abbildung 3-1 ist die kumulierte Häufigkeit der Zufallsvariablen der ermittelten Querkzugfestigkeit der Serie 4 (5sCL) abgebildet. Jedem Versuchskörper wurde in der Grafik die Versagensart (vgl. Kapitel 2-6) farblich zugewiesen. So konnten die Versagensarten ihrem Versagenslastniveau nach visuell beurteilt werden, was sich vor allem bei der Prüfkörperselektion im Anhang B-4 als sehr hilfreich herausstellte. Die farbliche Zuordnung unterstützt zudem das Erkennen möglicher Cluster an Versagensarten. Zusätzlich sind in diesen Grafiken die Verteilungsfunktionen der Lognormalverteilung, als auch der Weibullverteilung mit den geschätzten Parametern (Kapitel 2-5.5.3) geplottet.

**Tabelle 17** Parametertabelle für 2pLN

	n	$\mu$	$\sigma$	Var [ $\mu$ ]	Var [ $\sigma$ ]	$\sum \ln(L)$
<b>Serie 1 (1s)</b>	40	0,6500	0,2590	0,0017	0,0008	-28,7178
<b>Serie 2 (5sGL)</b>	21	-0,1332	0,3034	0,0044	0,0022	-1,9531
<b>Serie 3 (3sCL)</b>	20	0,5539	0,2030	0,0021	0,0010	-7,5611
<b>Serie 4 (5sCL)</b>	21	0,3899	0,2277	0,0025	0,0012	-6,9083
<b>Serie 5 (7sCL)</b>	20	0,3096	0,1826	0,0017	0,0008	-0,5590
<b>Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	19	0,4510	0,1269	0,0008	0,0004	3,6882
<b>Serie 7 (5sVL)</b>	17	0,3274	0,2036	0,0024	0,0012	-2,6293

In Tabelle 17 sind die geschätzten Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  für die Log-Normalverteilung gelistet. Außerdem sind die Varianzen der beiden Parameter vorzufinden.

**Tabelle 18** Parametertabelle für 2pW

	n	$\beta$	$\alpha$	Var [ $\beta$ ]	CVar [ $\beta, \alpha$ ]	Var [ $\alpha$ ]	$\sum \ln(L)$
<b>Serie 1(1s)</b>	40	3,8343	2,1871	0,1946	0,0142	0,0092	-32,5705
<b>Serie 2 (5sGL)</b>	21	3,1086	1,0275	0,2417	0,0129	0,0059	-4,8495
<b>Serie 3 (3sCL)</b>	20	4,8504	1,9319	0,6261	0,0253	0,0090	-9,6462
<b>Serie 4 (5sCL)</b>	21	5,0820	1,6495	0,7507	0,0210	0,0056	-6,8432
<b>Serie 5 (7sCL)</b>	20	6,2322	1,4903	1,1726	0,0199	0,0032	-0,7391
<b>Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	19	10,6824	1,6630	4,1143	0,0230	0,0014	5,7298
<b>Serie 7 (5sVL)</b>	17	6,9623	1,5154	1,8690	0,0225	0,0031	-0,0241

In Tabelle 18 sind die beiden geschätzten Parameter  $\beta$  und  $\alpha$  der Weibullverteilung vorzufinden. Mit  $\beta$  wird dabei der Formparameter bezeichnet, mit  $\alpha$  hingegen der Skalierungsparameter. Des Weiteren sind die Einträge der symmetrischen Varianz-Kovarianzmatrix (vgl. Formel (2.15)) angeführt. Wie auch schon in Tabelle 17 ist in der rechten Spalte der Tabelle die „Log-Likelihood“ zu finden. Damit wird festgestellt, welcher Verteilung die Zufallsvariablen der jeweiligen Serien folgen. Es gilt festzuhalten, dass außer bei der Serie 5sGL, der Serie 5sCL300<sup>2</sup> und der Serie 5sVL die Werte eher einer 2p Log-Normalverteilung folgen (grün markiert) als einer 2p Weibullverteilung. Speziell im Bereich der ‚Tails‘ (Verteilungsränder) weicht die 2pWD meist stärker von den ermittelten Werten ab, als dies bei der 2pLND der Fall ist.

**Tabelle 19** Auswertung der Versagensarten

	1s	5sGL	3sCL	5sCL	7sCL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sVL	$\Sigma$
<b>Lamellenbrüche [%]</b>	23	14	24	5	10	10	15	15
<b>Interfacebrüche [%]</b>	78	86	76	95	90	90	85	85

In Tabelle 19 wurden die Versagensarten der einzelnen Serien sowie über alle Versuchskörper in Prozent ausgewertet. Es wurden dabei die beiden Hauptgruppen der Versagensarten herangezogen. Es ist dabei ein deutlicher Trend in Richtung Interfacebrüche zu sehen. In allen Serien gab es mehr als Dreiviertel Interfacebrüche. Es sticht die Serie 4 (5sGL) heraus, bei der fast sämtliche Prüfkörper im Interface versagt haben. Über alle Prüfserien hinweg gibt es lediglich etwa 15 % reine Lamellenbrüche.

## 3-2 MATERIALKENNWERTE

Im folgenden Kapitel 3-2 wird auf die ermittelten Materialkennwerte eingegangen. Die Ergebnisse werden sowohl tabellarisch als auch graphisch in Boxplots dargestellt. Um den Einfluss des seriellen Volumeneffektes auf die Festigkeit und auf die Steifigkeit besser darstellen zu können, erfolgt die Darstellung nicht aufsteigend nach Seriennummer, sondern aufsteigend mit der Schichtanzahl. Nach der siebenschichtigen Serie 5 wird die Serie 7, mit unterschiedlichen Schichtstärken, abgebildet, ehe die Auswertung der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) folgt. Ganz rechts wird die Brettschichtholzserie (5sGL) dargestellt.

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Serien zusätzlich farblich unterschieden. Die Serie 1 (1s) wird rot hervorgehoben. Jene Serien, die zusätzlich in Subserien unterteilt wurden, werden grau hervorgehoben. Die Serie 2 (5sGL) wird mit gelber Farbe dargestellt. Für die statistische Interpretation der Ergebnisse werden neben den Extremwerten auch der Median sowie auch der Mittelwert der einzelnen Serien angegeben. Um die Streuung der ermittelten Kennwerte darstellen zu können, werden sowohl die Standardabweichung als auch der Variationskoeffizient (COV) tabellarisch angeführt.

Um die Abweichung der ermittelten Werte mit den aktuell gültigen charakteristischen Werten validieren zu können, wurden diese in der letzten Zeile der Tabellen angeführt. Die charakteristischen Werte für Brettsperrholz wurden der FORMELSAMMLUNG HOLZBAU (2017) [14] entnommen, die charakteristischen Werte für Vollholz (Serie 1) hingegen der ON EN 338 (2016) [57]. Jene Werte für das Brettschichtholz stammen aus der ON EN 14080 (2013) [70]. Für jede Kenngröße wurde auch serienweise die empirische 5 % Quantile ermittelt.

### 3-2.1 QUERZUGFESTIGKEIT

Bei der statistischen Auswertung der Querzugfestigkeit  $f_{t,90}$  wurden neben der empirischen 5 % Quantile auch noch die 5 % Quantilwerte der Lognormalverteilung und der Weibullverteilung ermittelt.

**Tabelle 20** statistischer Überblick Querzugfestigkeit

	Serie	1s	3sCL	5sCL	7sCL	5sVL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sGL
<b>n</b>	[--]	40	20	21	20	17	19	21
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,13	1,27	0,96	1,00	0,82	1,18	0,58
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,43	2,62	2,09	1,85	1,80	1,85	1,64
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,98	1,78	1,51	1,39	1,41	1,58	0,92
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,92	1,70	1,45	1,40	1,48	1,62	0,83
<b>Stabw.</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,54	0,38	0,34	0,26	0,26	0,20	0,31
<b>COV</b>	[%]	27,2 %	21,6 %	22,6 %	18,4 %	18,5 %	12,4 %	34,1 %
<b>p=0,05 LND</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,25	1,25	1,02	1,01	0,99	1,27	0,53
<b>p=0,05 WD</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,01	0,54	0,56	0,93	0,99	1,26	0,40
<b>p=0,05 emp.</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,21	1,27	0,97	1,00	0,84	1,20	0,59
$f_{t,90,k,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Es ist eine Abnahme der Querzugfestigkeit  $f_{t,90}$  mit zunehmender Schichtanzahl zu beobachten. Außerdem sieht man bei zunehmender Schichtanzahl und Homogenisierung eine Abnahme der Streuung der ermittelten Festigkeitswerte. Es konnte versuchstechnisch bei Brettsperrholz keine Auswirkung unterschiedlicher Schichtstärken auf die Belastbarkeit quer zur Faser festgestellt werden. Sehr wohl stellte sich ein Unterschied der Querzugfestigkeit  $f_{t,90}$  zwischen Brettschichtholz zu Brettsperrholz dar. Auf diese Beobachtung wird im Kapitel 3-3 gesondert eingegangen.

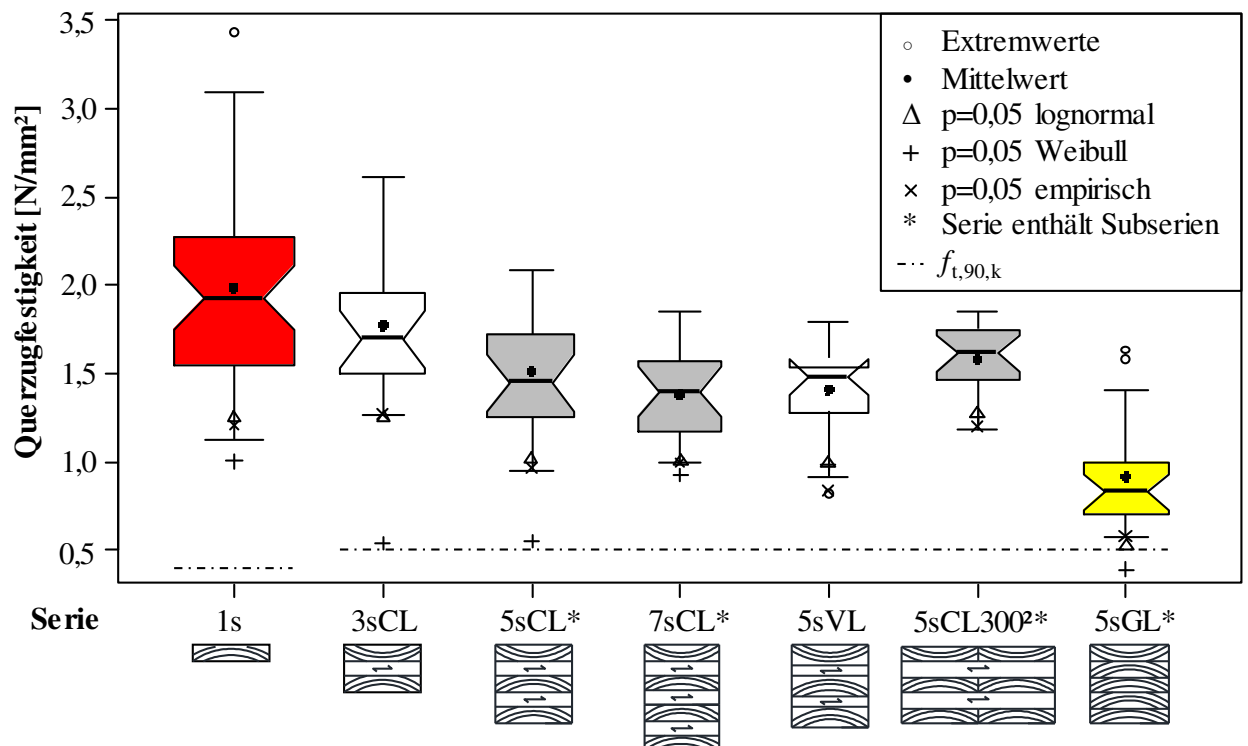


Abbildung 3-2 Boxplot Querszugfestigkeit

Im Boxplot der Abbildung 3-2 ist weiters zu sehen, dass bei Vollholz (1s) die 5 % Quantilwerte für die Querszugfestigkeit mehr als doppelt so hoch liegen wie der charakteristische Wert. Ähnliche Beobachtungen gibt es bei den Brettsperrholzserien. Bei Brettschichtholz (5sGL) liegen die ermittelten 5 % Quantilwerte hingegen sehr nahe am charakteristischen Wert  $f_{t,90,k}$ .

### 3-2.2 QUERSZUG-E-MODUL

Ein ähnliches Verhalten wie bei der Bestimmung der Querszugfestigkeit (vgl. Kapitel 3-2.1) kann auch bei der Ermittlung des Querszug-E-Moduls  $E_{t,90}$  beobachtet werden. Die Steifigkeit und auch die Streuung der Steifigkeit nehmen demnach mit zunehmender Schichtanzahl ab. Die Werte der Serie 7 (5sVL) lassen außer einer größeren Streuung, keine Auswirkung unterschiedlicher Schichtstärken auf die Steifigkeit erkennen.

Tabelle 21 statistischer Überblick Querszug-E-Modul

	Serie	1s	3sCL	5sCL	7sCL	5sVL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sGL
<b>n</b>	[--]	40	20	21	21	18	20	21
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	638	563	582	571	529	652	356
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1264	864	814	753	847	798	557
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	969	733	681	664	678	718	448
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	980	740	680	662	696	725	434
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	157	80	66	43	82,7	44	59
<b>COV</b>	[%]	16,2 %	11,0 %	9,6 %	6,4 %	12,5 %	6,1 %	13,1 %
<b>p=0,05 emp.</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	638	572	584	579	530	652	360
$E_{t,90,05,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	247	250	250	250	250	250	250

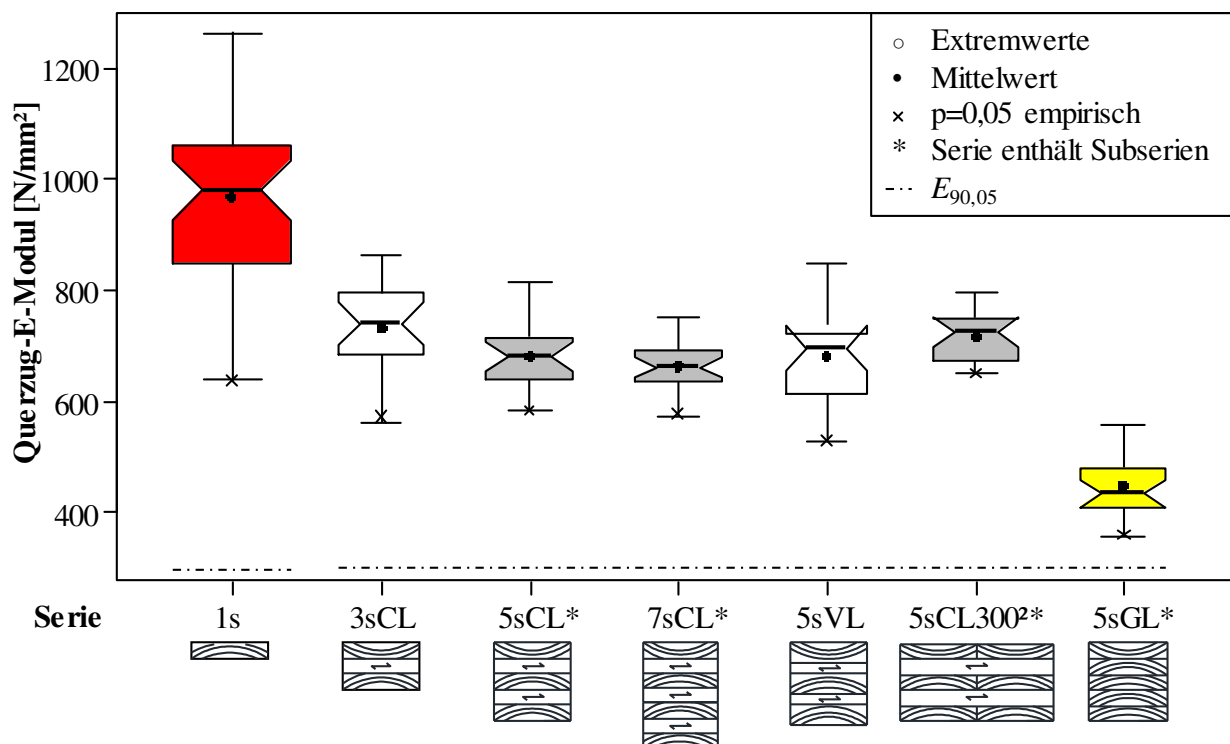


Abbildung 3-3 Boxplot Querzug-E-Modul

Homogenisierungseffekte lassen bei der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) die Streuungsparameter kleiner werden. Ein sehr deutlicher Abfall des E-Moduls kann bei der Brett-schichtholzserie (5sGL) festgestellt werden. Verglichen mit den Brettsperrholzserien liegt dabei der E-Modul in etwa um ein Drittel tiefer.

Bei der Betrachtung der charakteristischen Werte für den Querzug-E-Modul  $E_{t,90,05}$  erkennt man, dass die 5 % Quantilwerte der untersuchten Brettsperrholzserien alle deutlich höher sind, im Mittel in etwa doppelt so hoch. Diese Beobachtung stimmt nicht für die Brett-schichtholzserie (5sGL), dort ist die empirische 5 % Quantile nur etwa 20 Prozent höher als der charakteristische Wert.

### 3-2.3 ROHDICHTE

Die Rohdichte im Bruchbereich beträgt im Mittel über alle Serien rd. 450 kg/m<sup>3</sup>. Auffällig ist, dass die Werte der Serie 5sCL um 4 % höher liegen.

Tabelle 22 statistischer Überblick Rohdichte im Bruchbereich

		1s	3sCL	5sCL	7sCL	5sVL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sGL
<b>n</b>	[--]	40	20	21	21	18	20	21
<b>min</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	356	384	379	385	381	386	379
<b>max</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	560	561	550	536	550	512	535
<b>mean</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	450	461	472	451	450	449	460
<b>median</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	444	451	474	455	445	448	463
<b>Stabw</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	54	50	43	41	43,7	31	36
<b>COV</b>	[%]	12,1 %	10,8 %	9,1 %	9,2 %	10,0 %	6,8 %	7,9 %
<b>p=0,05 emp.</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	363	387	381	386	385	390	381
<b><math>\rho_{k,EN}</math></b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	350	385	385	385	385	385	385



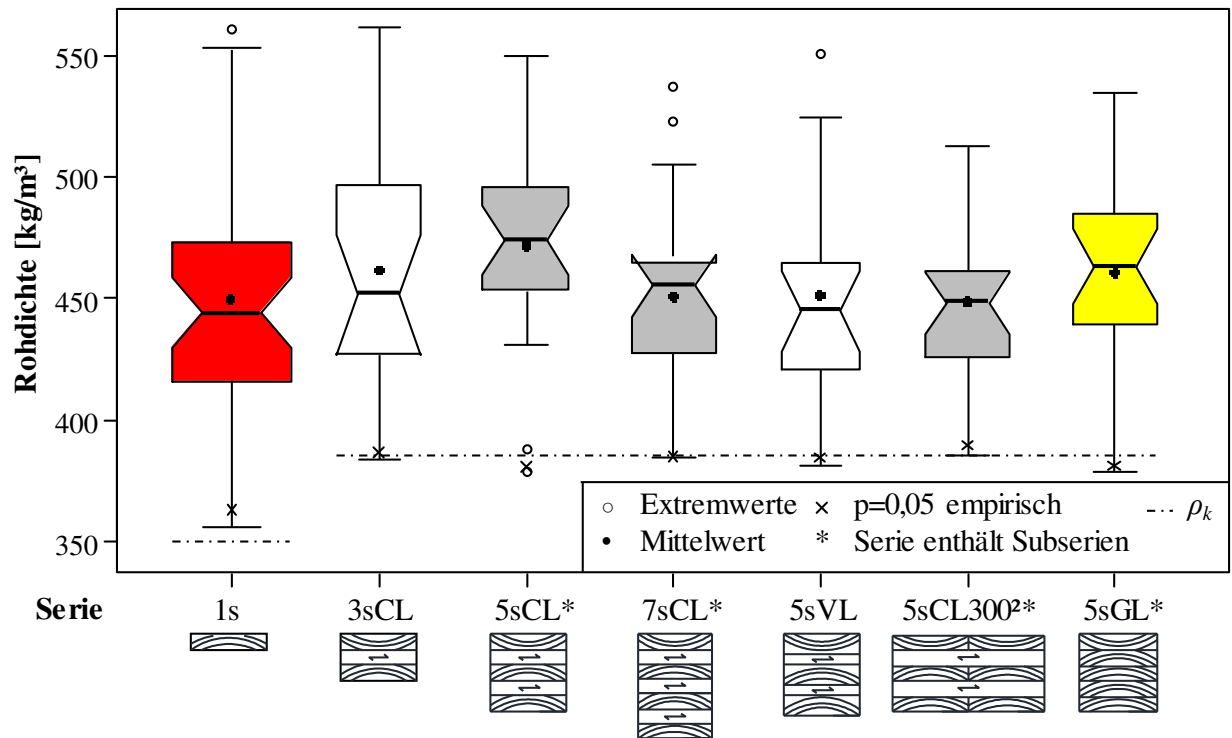


Abbildung 3-4 Boxplot Rohdichte

Weiters ist bemerkenswert, dass auch die Brett-schichtholzserie 5sGL bei ähnlichen Rohdichten versagt hat, wie die Brettsperrholzserien, obwohl die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  als auch die Dehnsteifigkeit  $EA_{\perp}$  deutlich tiefer sind, als bei BSP.

Auch bei der Streuung der Werte ist kein gravierender Unterschied zwischen den Serien zu beobachten. Die empirischen 5 % Quantile bewegen sich bei allen Serien im Bereich der charakteristischen Rohdichte  $\rho_k$ , nur bei der Vollholzserie (1s) liegt der 5 % Quantilwert etwas höher als  $\rho_k$ .

Diese Beobachtungen lassen eine Interpretation der Ergebnisse ohne relevante Rohdichteinflüsse zu.

### 3-3 SUBSERIENANALYSE

Im vorliegenden Kapitel wird auf die Ergebnisse der Subserien der Serien 2 (5sGL) und 4 (5sCL) eingegangen. Die Darstellung der Ergebnisse der Subserien der Serien 5 (7sCL) und 6 (5sCL300<sup>2</sup>) befindet sich im Anhang B-5 und werden hier nicht weiter erörtert.

Wie auch schon bei den Ergebnissen der Gesamtserien im Kapitel 3-2 werden die Erkenntnisse sowohl graphisch in Form von Boxplots als auch tabellarisch dargestellt. Es soll auf die Festigkeitskenngröße, den E-Modul sowie auf die Rohdichte im Bruchbereich der Subserien eingegangen werden.

In den Tabellen sind neben der Spannweite der Werte auch die Mittelwerte und Mediane sowie die Streuungsparameter angeführt. Die Brettsperrholzserien (5sCL) und die Brettschichtholzserie (5sGL) werden sowohl in den Boxplots als auch tabellarisch direkt gegenübergestellt. Die Voraussetzung für die direkte Gegenüberstellung ist dieselbe Rohdichteverteilung der Prüfkörper innerhalb einer Subserie beider Serien. Dies wird mit dem Prüfkörper-Assembling (siehe Kapitel 2-2.3) sichergestellt, im Zuge dessen alle Prüfkörper einer Subserie beider Serien von denselben Brettern stammen. Somit sind Rohdichteinflüsse zwischen den Serien weitestgehend ausgeschlossen.

Zur besseren Orientierung wurde die Brettsperrholzserie (5sCL) in den folgenden Ausführungen grau hervorgehoben, die Brettschichtholzserie (5sGL) wurde hingegen gelb markiert.

#### 3-3.1 QUERZUGFESTIGKEIT

Es ist ersichtlich, dass die Mittelwerte der Querzugfestigkeit  $f_{t,90}$  der Brettsperrholzserie in etwa um 40 % über jenen der Brettschichtholzserie liegen. Bei der Streuung der Werte lässt sich aufgrund der geringen Probenanzahl je Subserie keine Tendenz ablesen.

**Tabelle 23** Vergleich der Querzugfestigkeit der Subserien der Serien 5sGL-gelb & 5sCL-grau

	Subserie	a	b	c	d	e	f	g
<b>n</b>	[--]	3	3	3	3	3	3	3
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,09	1,01	1,08	0,96	2,00	1,71	1,25
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,45	1,73	1,40	1,65	2,09	1,89	1,39
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>1,33</b>	<b>1,46</b>	<b>1,27</b>	<b>1,39</b>	<b>2,05</b>	<b>1,79</b>	<b>1,30</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,45	1,65	1,33	1,57	2,07	1,78	1,26
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,21	0,39	0,17	0,38	0,05	0,09	0,08
<b>COV</b>	[%]	15,6 %	27,0 %	13,2 %	27,1 %	2,3 %	5,1 %	6,0 %
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,64	0,70	0,61	0,70	1,27	0,61	0,58
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,07	0,96	0,92	0,83	1,64	1,41	1,00
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>0,79</b>	<b>0,85</b>	<b>0,81</b>	<b>0,76</b>	<b>1,50</b>	<b>0,93</b>	<b>0,79</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,67	0,89	0,91	0,75	1,58	0,77	0,79
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,24	0,13	0,18	0,07	0,20	0,42	0,21
<b>COV</b>	[%]	30,3 %	15,8 %	21,7 %	8,6 %	13,3 %	45,5 %	26,6 %
$f_{t,90,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

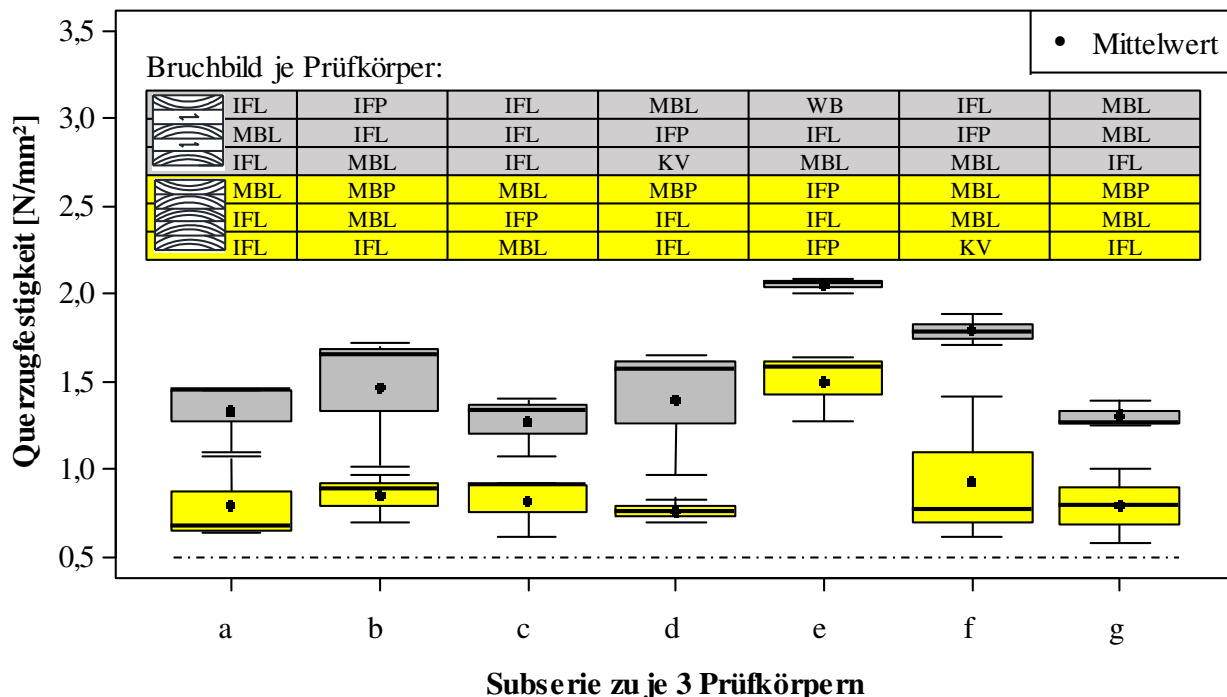


Abbildung 3-5 *Boxplot Vergleich Querzugfestigkeit der Subserien in Serie 2 (5sGL-gelb) versus jene in Serie 4 (5sCL-grau)*

Der Boxplot in Abbildung 3-5 wurde mit den Versagensarten der einzelnen Prüfkörper ergänzt, wobei auffällig ist, dass überwiegend Interfacebrüche stattgefunden haben.

### 3-3.2 QUERZUG-E-MODUL

Ein ähnliches Verhalten, wie auch schon bei der Querzugfestigkeit festgestellt wurde, kann auch beim Querzug-E-Modul  $E_{t,90}$  beobachtet werden.

Tabelle 24 *Vergleich des Querzug-E-Moduls der Subserien der Serien 5sGL-gelb & 5sCL-grau*

	Subserie	a	b	c	d	e	f	g
<b>n</b>	[--]	3	3	3	3	3	3	3
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	656	715	592	582	781	685	606
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	700	725	639	680	814	752	646
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>671</b>	<b>719</b>	<b>622</b>	<b>621</b>	<b>792</b>	<b>713</b>	<b>631</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	657	716	634	600	782	701	640
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	25	6	26	52	19	35	22
<b>COV</b>	[%]	3,7 %	0,8 %	4,2 %	8,4 %	2,4 %	4,9 %	3,4 %
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	429	474	407	356	526	414	374
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	481	510	441	390	557	514	416
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>448</b>	<b>486</b>	<b>423</b>	<b>374</b>	<b>546</b>	<b>457</b>	<b>399</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	434	475	422	377	554	443	407
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	29	21	17	17	17	51	22
<b>COV</b>	[%]	6,4 %	4,2 %	4,0 %	4,6 %	3,1 %	11,3 %	5,5 %

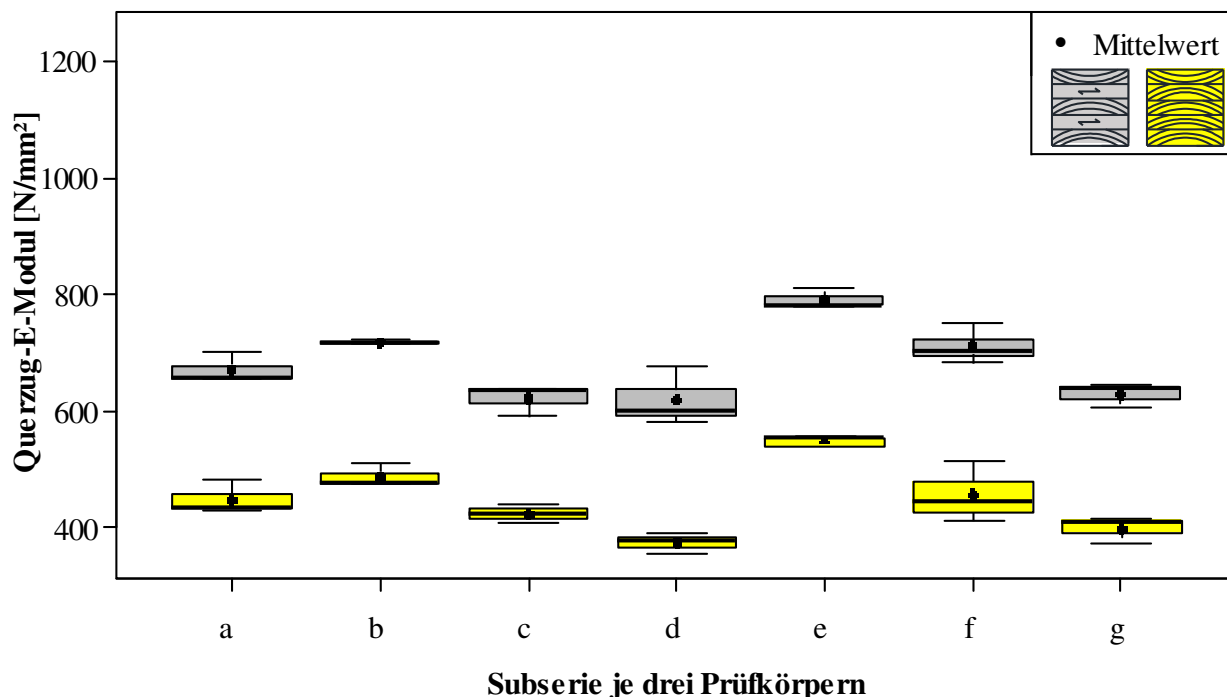


Abbildung 3-6 *Boxplot Vergleich Querzug-E-Modul der Subserien in Serie 2 (5sGL-gelb) versus jene in Serie 4 (5sCL-grau)*

Im Boxplot in Abbildung 3-6 ist über alle Subserien hinweg  $E_{1,90}$  bei Brettspertholz in etwa um 30 % bis 40 % höher als bei Brettschichtholz.

### 3-3.3 ROHDICHTE

Bei der Darstellung der Rohdichte im Bruchbereich zeigt sich, dass die unterschiedlichen Ergebnisse für Brettschichtholz und Brettspertholz kaum davon abhängen.

Tabelle 25 *Vergleich der Rohdichte im Bruchbereich der Subserien der Serien 5sGL-gelb & 5sCL-grau*

	Subserie	a	b	c	d	e	f	g
<b>n</b>	[--]	3	3	3	3	3	3	3
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	479	461	485	430	533	379	441
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	496	477	500	474	550	460	466
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>485</b>	<b>469</b>	<b>494</b>	<b>453</b>	<b>543</b>	<b>409</b>	<b>451</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	479	469	496	453	544	388	445
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	8	8	22	9	44	13
<b>COV</b>	[%]	2,0 %	1,7 %	1,6 %	4,8 %	1,6 %	10,9 %	2,9 %
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	471	440	483	390	486	379	420
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	490	466	495	463	535	458	434
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>480</b>	<b>454</b>	<b>487</b>	<b>435</b>	<b>507</b>	<b>432</b>	<b>429</b>
<b>median</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	479	456	484	451	500	458	433
<b>Stabw</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	13	7	39	25	45	8
<b>COV</b>	[%]	2,0 %	2,9 %	1,4 %	9,0 %	5,0 %	10,5 %	1,8 %

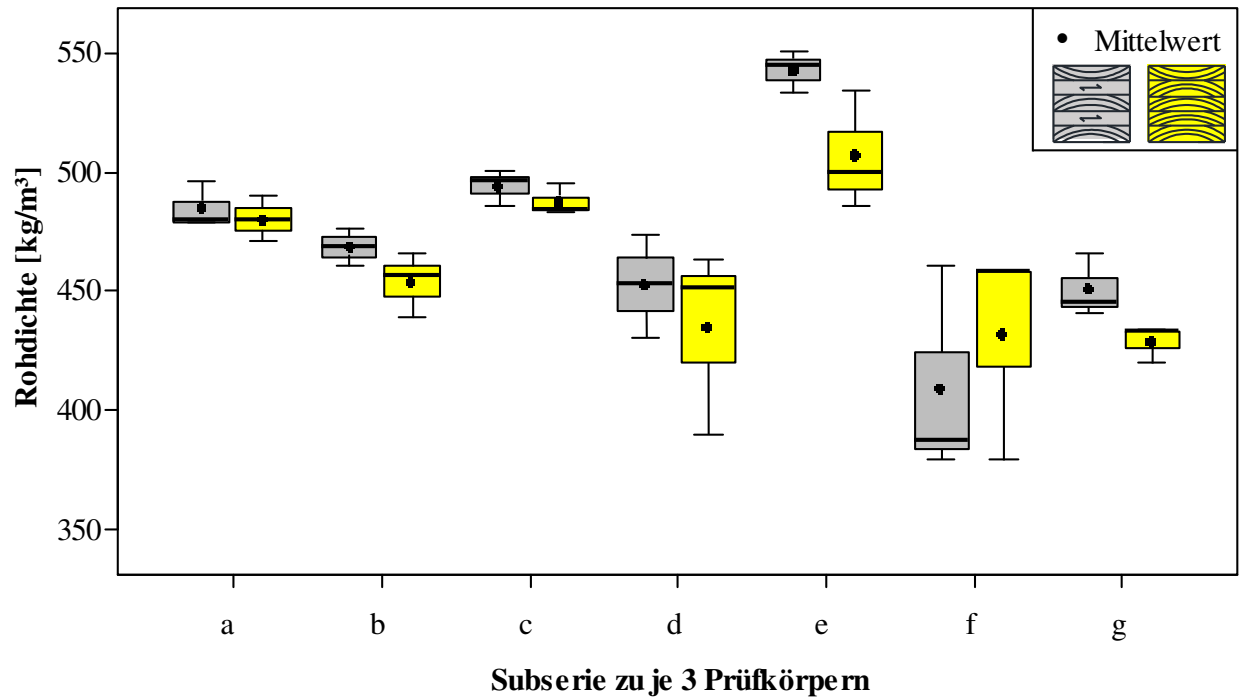


Abbildung 3-7 Boxplot Vergleich Rohdichte Serie 2 (5sGL) versus Serie 4 (5sCL)

Im Boxplot in Abbildung 3-7 ist zu sehen, dass die Mittelwerte der Subserien beider Serien immer auf ähnlichem Niveau liegen.

Die hier bewiesene Unabhängigkeit der Rohdichte beim Vergleich von Brettchichtholz und Brettsperrholz lassen auf unterschiedliches mechanisches Verhalten der beiden Ingenieurholzbauprodukte schließen. Dieses unterschiedliche Verhalten ist auf den *Sperreffekt* von Brettsperrholz zurückzuführen und wurde bereits in der FEM-Analyse im Kapitel 2-1 validiert. Eine zusammenfassende Betrachtung sowie eine visuelle Darstellung und eine Modellbildung dieses Effektes gibt es in der Konklusion im Kapitel 4-1.

### 3-3.4 EQUIKORRELATION

Bei der Bestimmung der Equikorrelationskoeffizienten für die Subserienanalyse wurden neben der Rohdichte im Bruchbereich auch jene Koeffizienten für die globale Rohdichte der Prüfkörper bestimmt. Dies erscheint zielführend, da die Basis für die Bestimmung von  $\rho_{\text{equi}}$  dann für alle Materialkenngrößen dieselbe ist.

**Tabelle 26** Equikorrelation

	$E[Z]=\bar{z}$	$\text{Var}[Z]$	$\text{Var}[Y]$	$\text{Var}[X]$	$\rho_{\text{equi}}$	
<b>2 (5sGL)</b>	0,92	0,094	0,058	0,036	0,62	$f_{t,90}$
<b>4 (5sCL)</b>	1,51	0,112	0,075	0,037	0,67	
<b>5 (7sCL)</b>	1,35	0,057	0,033	0,024	0,58	
<b>6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	1,58	0,035	0,002	0,034	0,05	
<b>2 (5sGL)</b>	447,67	3290	2789	501	0,85	$E_{t,90}$
<b>4 (5sCL)</b>	681,10	4096	3516	580	0,86	
<b>5 (7sCL)</b>	655,44	1311	1044	267	0,80	
<b>6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	730,75	1407	1047	360	0,74	
<b>2 (5sGL)</b>	460,42	1923	1474	449	0,77	$\rho_{12}$
<b>4 (5sCL)</b>	472,41	1759	1485	273	0,84	
<b>5 (7sCL)</b>	441,42	1119	729	390	0,65	
<b>6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	449,80	1225	218	1007	0,18	
<b>2 (5sGL)</b>	453,29	590	516	74	0,87	$\rho_{12,\text{glob}}$
<b>4 (5sCL)</b>	459,29	385	309	75	0,80	
<b>5 (7sCL)</b>	450,56	155	123	32	0,79	
<b>6 (5sCL300<sup>2</sup>)</b>	467,91	51	33	17	0,66	

Mit der Berechnung des Equikorrelationskoeffizienten wird ersichtlich, dass die globale Rohdichte und der Querkzug-E-Modul der Prüfkörper innerhalb der Subserien stärker korrelieren als die Querkzugfestigkeit.

Diese Beobachtung kann laut BRANDNER et al. [68] so interpretiert werden, dass die Festigkeit stark von lokalen Holzeigenschaften abhängt, dazu zählen sämtliche Holzmerkmale. Im Gegensatz dazu stellt die Rohdichte einen Durchschnittswert über das gesamte Prüfkörpervolumen dar.

Sehr gering sind die Unterschiede der Korrelationen der Prüfkörper innerhalb der Subserien aller drei Materialeigenschaften zwischen der Brettschichtholzserie (5sGL) und der Brettsperrholzserie (5sCL). Dies ist damit erklärbar, dass die Prüfkörper dieser Subserien eine nahezu idente Rohdichteverteilung hatten (vgl. Kapitel 2-2.3).

Es fällt auf, dass es bei der Querkzugfestigkeit der Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) quasi keine Korrelation zwischen den Prüfkörpern innerhalb der Subserien gibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Serie, im Gegensatz zu allen anderen Serien, neben dem seriellen zudem ein *paralleles System* vorliegt. Im Allgemeinen sind parallele, sowie auch serielle Elemente laut BRANDNER [71] voneinander unabhängig.



### 3-4 REGRESSIONSANALYSE

Bei der Regressionsanalyse zwischen Querkzugfestigkeit und Querkzug-E-Modul zur Rohdichte lassen sich bei den Brettsperrholzserien nur schwache Zusammenhänge, per Definition im Kapitel 2-5.6, feststellen. Bei Vollholz und Brettschichtholz konnte ein *mittlerer Zusammenhang* zwischen  $E_{t,90}$  und  $\rho_{12}$  festgestellt werden.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit zum Querkzug-E-Modul zeigt sich, dass bei Brettsperrholz die Kenngrößen nur schwach voneinander abhängig sind. Beim Brettschichtholz hingegen zeigt sich eine *mittlere Abhängigkeit* der Festigkeit quer zur Faser zur Steifigkeit.

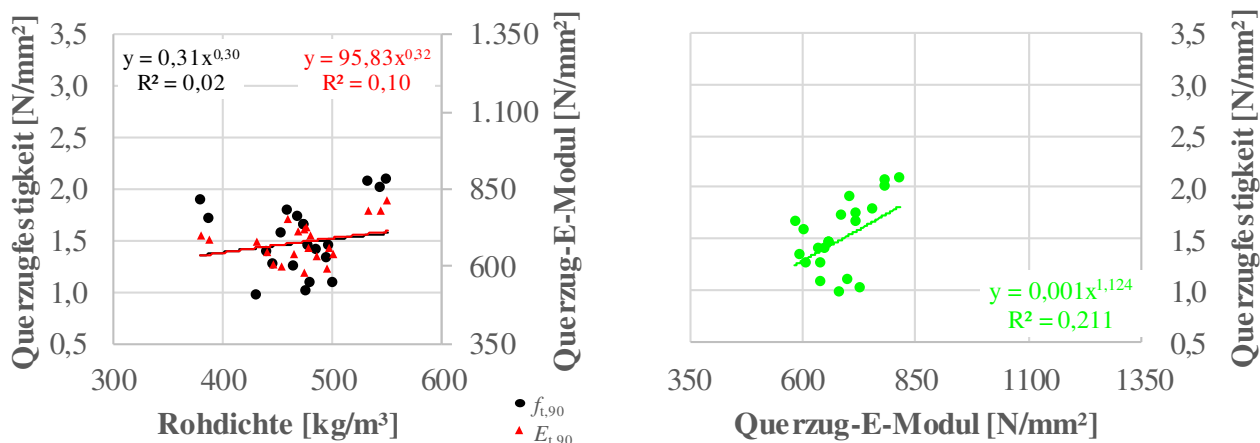


Abbildung 3-8 **Regressionsplot Serie 4 (5sCL)**  
(links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

Stellvertretend für die Brettsperrholzserien sind in Abbildung 3-8 die Regressionsplots der Serie 4 (5sCL) dargestellt. Die Plots sämtlicher anderer Serien befinden sich im Anhang B-6. Auf eine tabellarische Darstellung der Regressionsmodelle und Korrelationen wird hier aufgrund der geringen Aussagekraft verzichtet.

### 3-5 TEILVERSAGEN

Bei der Auswertung des Teilversagens wird ersichtlich, dass es häufig kein ideal sprödes Versagen nach der Weakest-Link Theorie gibt.

Tabelle 27 **Auswertung des Teilversagensverhaltens**

	Serie	1s	3sCL	5sCL	7sCL	5sVL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sGL
N	[Stk.]	40	20	21	20	17	19	21
n	[Stk.]	27	17	16	10	14	19	16
n/N	[%]	68 %	85 %	76 %	50 %	82 %	100 %	76 %
$\zeta_{\min}$	[%]	16 %	18 %	18 %	78 %	31 %	16 %	13 %
$\zeta_{\max}$	[%]	96 %	96 %	96 %	96 %	99 %	82 %	97 %
$\zeta_{\text{mean}}$	[%]	59 %	69 %	68 %	92 %	71 %	50 %	68 %
$\zeta_{\text{median}}$	[%]	61 %	85 %	85 %	95 %	78 %	55 %	79 %
$\zeta_{\text{cov}}$	[%]	44 %	42 %	43 %	7 %	37 %	42 %	41 %

Anmerkung: N = Ausgewertete Prüfkörper; n = Prüfkörper mit Teilversagen

Wie in Tabelle 27 abzulesen, gibt es bei den verschiedenen Serien in etwa bei 20 % bis 30 % der Prüfkörper einen idealen Sprödbbruch. Auffällig sind die Serie 5 (7sCL), wo jeder zweite Prüfkörper nahezu ideal spröde versagt hat und die Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>), wo kein einziges ideales Sprödbbruchversagen auftrat.

Bei jenen Prüfkörpern, die ein Teilversagen gezeigt haben, traten im Mittel bei einem Lastniveau von 60 % bis 70 % der Maximalkraft erste Schädigungen ein. Wiederum zeigen die Serie 7sCL sowie 5sCL300<sup>2</sup> ein anderes Verhalten als alle anderen. Bei der siebenschichtigen Brettspertholzserie, wo nur jeder zweite Prüfkörper ein Teilversagen zeigt, gibt es erst kurz vor dem Totalversagen erste Vorschädigungen. Genau gegenverkehrt verhält sich die Serie 5sCL300<sup>2</sup>, wo jeder Prüfkörper ein Teilversagen, im Mittel bei rund 50 % der Maximallast, zeigt. Bei der Serie 5sCL300<sup>2</sup> kann diese Beobachtung mit dem parallelen Systemverhalten und damit einhergehender Lastumlagerung innerhalb der Brettabschnitte einer Lage erklärt werden. Warum die Serie 7sCL sich anders zeigt ist gegenwärtig nicht nachvollziehbar. Allgemein gilt: Das Ausmaß dieser Schädigungen noch deren Einfluss auf die Querkzugkenngrößen kann aus diesen Untersuchungen allerdings nicht abgeleitet werden.

### 3-6 VOLUMENEFFEKT

Für die Beschreibung dieses Größeneffektes wurde der ermittelte Formparameter  $k = 5,0820$  und das dazugehörige Referenzvolumen  $V_{ref} = 0,003375 \text{ m}^3$  der Serie 5sGL verwendet.

$$\frac{f_{t,90}}{f_{t,90,ref}} = \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{\frac{1}{k}} \text{ mit } k_{vol} = \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.1)$$

Dabei sind:

- $f_{t,90,ref}$  ..... Referenzfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
- $f_{t,90}$  ..... gesuchte Festigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
- $V_{ref}$  ..... Referenzvolumen [m<sup>3</sup>]
- $V$  ..... Volumen [m<sup>3</sup>]
- $k$  ..... Formparameter  $\beta$  der Weibullverteilung (2pW)

Die Formparameter der übrigen Serien sind in Tabelle 18 zu finden.

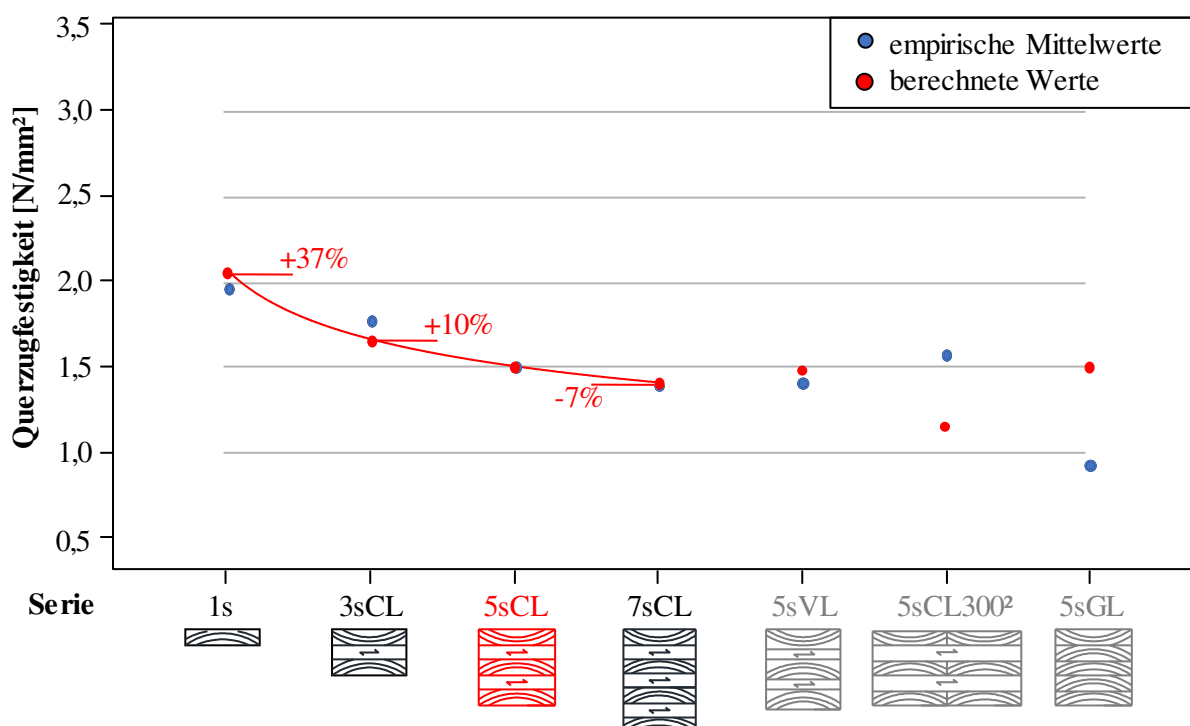


Abbildung 3-9 volumeneabhängige Festigkeitsabnahme

In Abbildung 3-9 wird ersichtlich, dass die Theorie der volumenabhängigen Festigkeitsabnahme (vgl. Kapitel 1-3.1.3) bei gleichbleibender Lamellenstärke für Brettsperrholz bedingt gültig ist. Demnach nimmt die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  mit zunehmender Schichtanzahl, bei annähernd gleichbleibenden Rohdichten im Bruchbereich (siehe Kapitel 3-2.3), ab.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Formelbeziehung für den Volumeneffekt (siehe Formel (1.3)) für die Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>) nicht gültig ist. Dies liegt daran, dass neben einem seriellen System im Sinne der Weakest-Link Theorie, wie bei der Referenzserie, zudem ein paralleles System vorliegt. Systemeffekte lassen die Festigkeit bei dieser Serie im Vergleich zur Referenzserie ansteigen.

### 3-7 BEOBACHTUNGEN

Im Zuge der Auswertungen wurde eine Beobachtung gemacht, die hier dargestellt wird, aber für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit keine Relevanz hat.

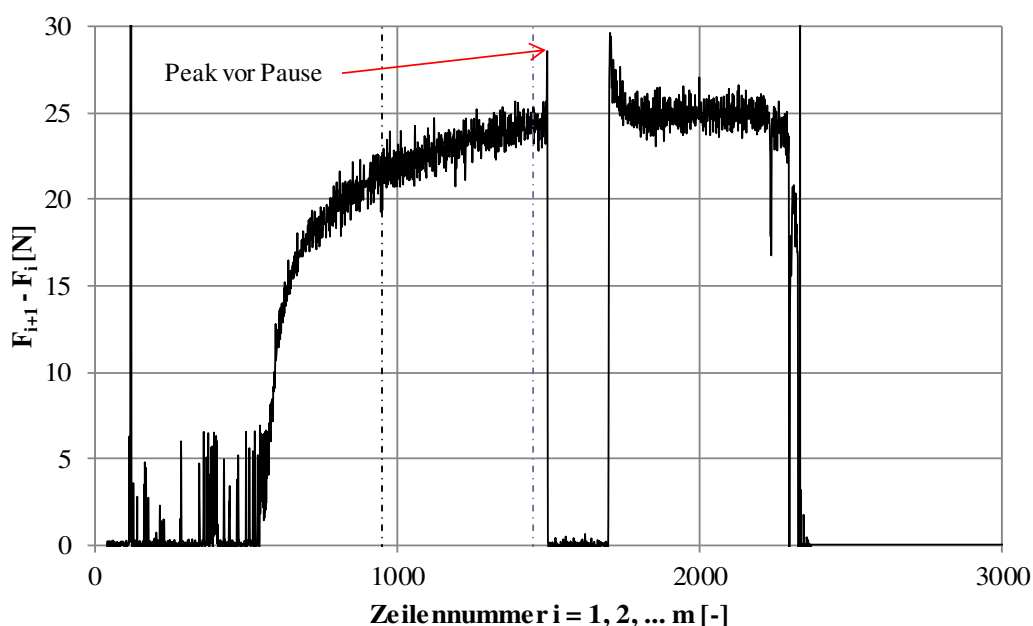


Abbildung 3-10 Beobachtung eines Peaks der Kraftänderung vor der Belastungspause (Prüfkörper 3-18)

Wie am Beispiel des Prüfkörpers 3-18 im Kraftänderungsdiagramm in Abbildung 3-10 zu erkennen ist, gab es häufig einen Kraftpeak vor und nach der Belastungspause zur Abnahme der Wegaufnahme. Der Peak trat unabhängig von der Kraft und vom Belastungsniveau immer unmittelbar vor und nach der Pause auf. Da es auf die Ergebnisse dieser Arbeit keine Auswirkungen hat, wurde eine Ursachenforschung unterlassen. Man kann davon ausgehen, dass es sich um einen regelungstechnischen Grund der Maschinensteuerung handelt.

Tabelle 28 Auswertung eines Peaks der Kraftänderung vor der Belastungspause

	1s	3sCL	5sCL	7sCL	5sVL	5sCL300 <sup>2</sup>	5sGL
<b>N</b> [--]	40	20	21	20	17	19	21
<b>n</b> [--]	26	18	8	3	2	3	7
<b>n/N</b> [%]	65 %	90 %	38 %	15 %	12 %	16 %	33 %

Anmerkung: N = Anzahl ausgewerteter Prüfkörper; n = Anzahl Prüfkörper mit Peak vor Belastungspause

Das lokale Kraftänderungsmaximum ist in jeder Serie aufgetreten, in Serie 1 (1s) und 3 (3sCL) jedoch sehr ausgeprägt.

# KAPITEL 4: DISKUSSION & CONCLUSIO

Im vorliegenden Kapitel sollen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Arbeit diskutiert und mit bereits bekanntem Wissen verglichen werden. Schlussendlich sollen in der Conclusio die Folgerungen der Arbeit zusammengefasst werden.

## 4-1 DISKUSSION

In der Diskussion wird im Speziellen auf die empirisch ermittelten Daten aus den Versuchsserien des Kapitels 3 eingegangen.

### 4-1.1 GRÖSSENEFFEKTE

Die Anwendbarkeit des Volumenfaktors  $k_{vol}$  für querzugbeanspruchtes Brettschichtholz gemäß ON EN 1995-1-1(2015) [39], kann mit den vorliegenden Ergebnissen für BSP überprüft und auch für dieses Holzbauprodukt bestätigt werden.

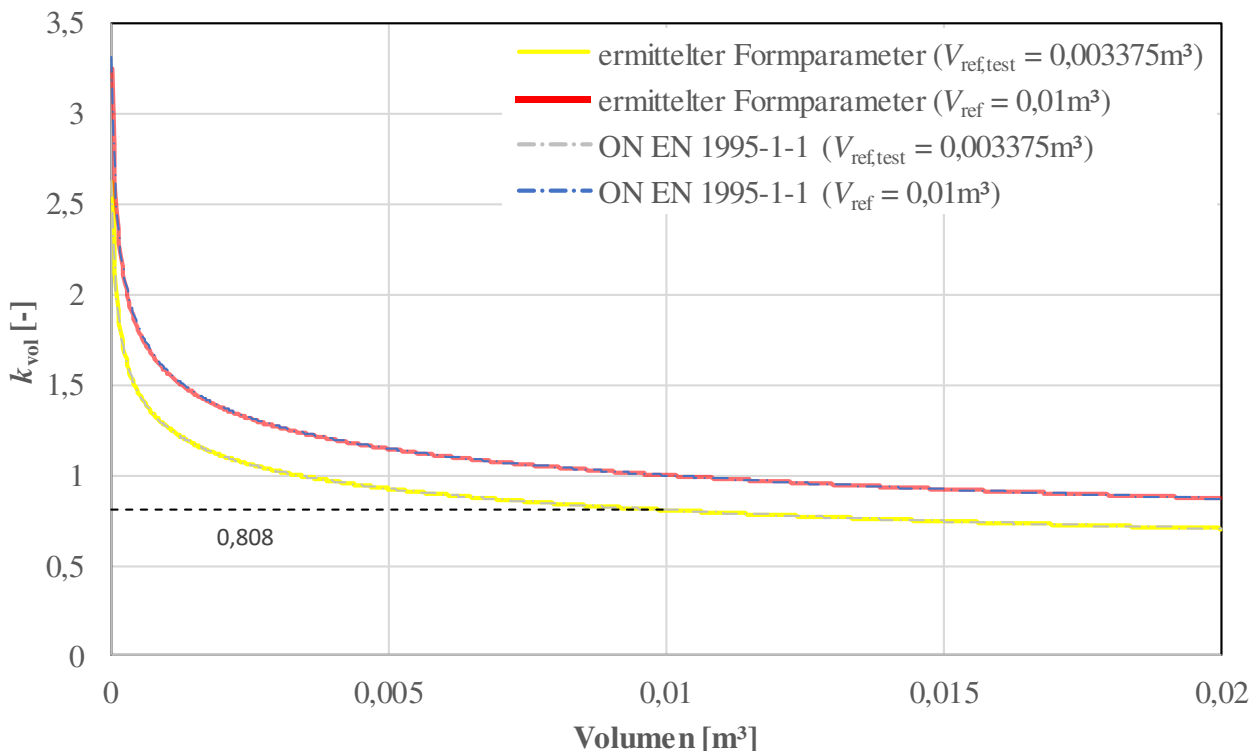


Abbildung 4-1 Anpassung des Referenzvolumens für  $k_{vol}$

Aufgrund der Skaleninvarianz kann die Potenzfunktion mit der Potenzzahl von  $1/k = 1/5$  verschoben werden und so an das vorhandene Referenzvolumen  $V_{ref,test} = 0,003375 \text{ m}^3$  angepasst werden (siehe Abbildung 4-1). Der Volumenfaktor  $k_{vol}$  für dieses Referenzvolumen liegt in etwa 20 % unter jenem mit Referenzvolumen von  $V_{ref} = 0,01 \text{ m}^3$  laut Eurocode 5 [39]. Die Referenzfestigkeit  $f_{t,90,ref,mean}$  kann über die Beziehung in Formel (3.1) über die Relation der Referenzvolumina entsprechend angepasst werden. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde für die Mittelwerte der Querszugsfestigkeit, bezogen auf die Serie 5sCL, die Referenzfestigkeit  $f_{t,90,ref,mean} = 1,215 \text{ N/mm}^2$  beim Bezugsvolumen  $V_{ref} = 0,01 \text{ m}^3$  (laut

ON EN 1995-1-1(2015) [39]) ermittelt. Somit kann der Größenfaktor  $k_{vol}$  für die vorliegenden Untersuchungen nach Formel (6.51) in ON EN 1995-1-1(2015) [39] mit  $V_{ref} = 0,01m^3$  verwendet werden. Für eine weitere Überprüfung bietet sich eine Referenzprüfserie mit einem Prüfkörpervolumen von  $0,01 m^3$  an. Für die baupraktische Adaptierung der Querkzugfestigkeit bei Brettsperrholz unter Berücksichtigung des tatsächlich querkzugbeanspruchten Volumens bietet es sich an diesen Volumenfaktor  $k_{vol}$  realitätsnäher auf einen Höhen- bzw. Schichtanzahlfaktor  $k_h$  zu reduzieren und zusätzlich bei Ausdehnung der Querkzugbeanspruchung in der Fläche der BSP Elemente eventuell um einen Systembeiwert  $k_{sys}$ , zur Berücksichtigung der sich dabei ergebenden parallelen Systemwirkung, zu ergänzen.

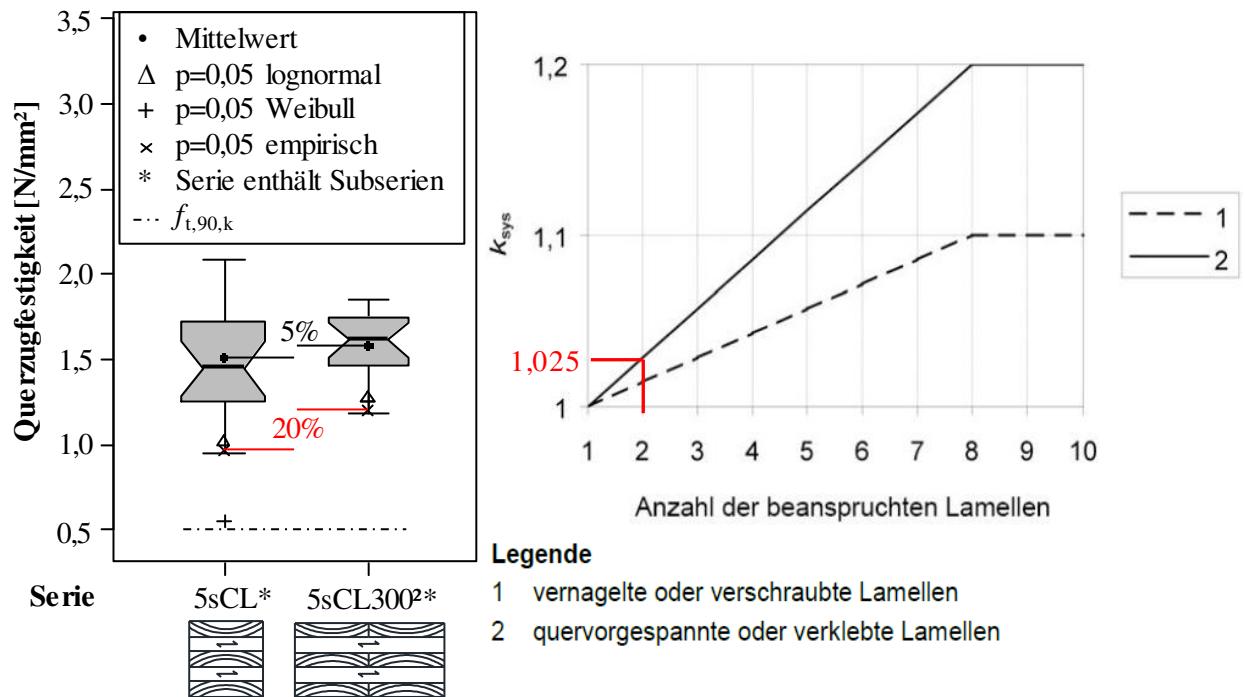


Abbildung 4-2 **paralleler Größeneffekt**  
 (links: Prüfauswertung; rechts:  $k_{sys}$  nach ON EN 1995-1-1(2015) [39])

Bei den Untersuchungen konnte eine Erhöhung der Mittelwerte der Querkzugfestigkeit aufgrund von Systemeffekten resultierend aus dem parallelen Systemwirken von 5 % festgestellt werden. Bei den Quantilwerten beträgt die Erhöhung sogar rund 20 %, was auf die ebenfalls beobachtete Abnahme der Streuungen in Serie 5sCL300<sup>2</sup> im Vergleich zu Serie 5sCL zurückzuführen ist. Die ON EN 1995-1-1(2015) [39] schlägt für den vorliegenden Fall von zwei quasi starr miteinander verbundenen und parallel beanspruchten Lamellen einen Systemfaktor  $k_{sys}$  von 1,025, auf 5 %-Quantilniveau vor und liegt demnach deutlich auf der konservativen Seite.

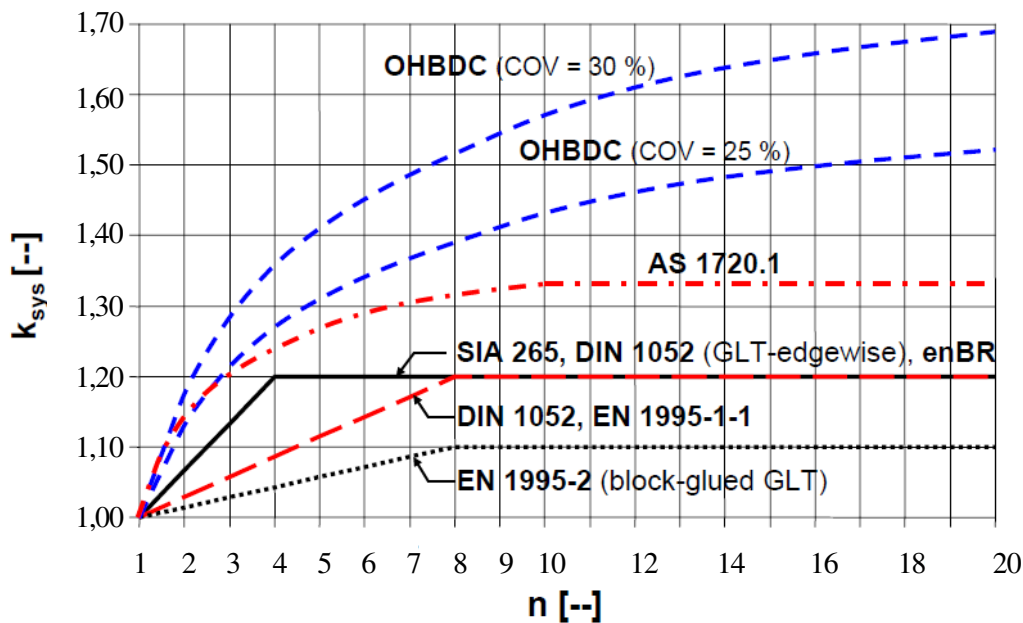


Abbildung 4-3 Systemeffekt – Normenvergleich (in Anlehnung an [72])

Ein Normenvergleich in Abbildung 4-3 zeigt, dass der Eurocode 5 [39] Systemeffekte im Allgemeinen konservativ betrachtet. Die schweizerische Holzbaunorm SIA 265 [73], welche diesen ebenfalls mittels einem bi-linearen Ansatz beschreibt, hingegen berücksichtigt den Systemfaktor  $k_{sys}$  mit doppelter Steigung der Funktion, begrenzt ihn aber gleich wie die ON EN 1995 (2016) [39] mit 20 %. Die australische Holzbaunorm AS 1720.1 [74] beschreibt, im Gegensatz zu den vorhin erwähnten Normenwerken, den Systemfaktor auf Basis eines nichtlinearen Modells. Die maximale Erhöhung der Festigkeitskenngrößen beträgt hierbei  $k_{sys} = 1,33$  bei  $n \geq 10$ . Auch der Ontario Highway Bridge Design Code OHBDC [75] beschreibt den Systemfaktor mit einem nichtlinearen Modell und berücksichtigt dabei zusätzlich die Variabilität der Grundkenngröße.

Ein Querschnittsnachweis bei Brettsperrholz unter Berücksichtigung beider Größeneffekte könnte folgendermaßen lauten:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_h \cdot k_{sys} \cdot f_{t,90,d} \quad (4.1)$$

Dabei sind:

- $\sigma_{t,90,d}$  ..... Bemessungswert der Quersugspannungen [N/mm<sup>2</sup>]
- $k_h$  ..... Höhen- (Schichtanzahl-)faktor [-]
- $k_{sys}$  ..... Systemfaktor [-]
- $f_{t,90,d}$  ..... Bemessungswert der Quersugfestigkeit (Referenzfestigkeit) [N/mm<sup>2</sup>]



## 4-1.2 VERGLEICH MIT BIDA KOV [42]

Um die vorliegenden Ergebnisse einordnen zu können, wird ein Vergleich mit den Ergebnissen von BIDA KOV [42] angestellt. Es können die Ergebnisse der Serie 5sCL300<sup>2</sup> den Ergebnissen des Typs C von BIDA KOV [42] gegenübergestellt werden. Alle anderen Serien sind nicht miteinander vergleichbar.

	Serie	5sCL300 <sup>2</sup>	Type C Bidakov
<b>n</b>	[--]	19	25
<b>min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,18	0,56
<b>max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,85	2,11
<b>mean</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	<b>1,58</b>	<b>1,43</b>
<b>Stabw.</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,20	0,46
<b>COV</b>	[%]	12,4 %	32,0 %
<b>p=0,05 emp.</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,20	0,65



**Abbildung 4-4** Vergleich 5sCL300<sup>2</sup> vs. Type C von BIDA KOV [40]  
(links: tabellarischer Vergleich; rechts: Prüfkonfiguration (links: JANTSCHER; rechts: BIDA KOV [42]))

Bei der Betrachtung der Tabelle in Abbildung 4-4 erkennt man, dass der Mittelwert der Querkzugfestigkeit der Untersuchungen von BIDA KOV [42] etwas tiefer liegt als jener in dieser Arbeit ermittelte. Außerdem streuen die Daten von BIDA KOV [42] stärker als die empirischen Daten der Serie 5sCL300<sup>2</sup> der vorliegenden Arbeit. Diese Beobachtung kann unter anderem auf die unterschiedliche Holzartenwahl zurückgeführt werden. Die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  streut bei gemeiner Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) laut KOLLMANN [28] stärker als bei Fichtenholz (*Picea abies* L.). Die größere Streuung kann weiters möglicherweise auf Unterschiede in der Versuchsdurchführung als auch auf differente Aufbau- bzw. Auswahlkriterien in der Herstellung der Versuchskörper, z.B. durch Einbindung von Prüfkörpern mit Markröhre oder anderen ausgeprägten Holzmerkmalen, zurückgeführt werden.

Auffällig ist, dass die Zugfestigkeit rechtwinkelig zur Faser laut KOLLMANN [28] bei Kiefernholz größer ist als bei Fichtenholz, was dem vorliegenden Vergleich widerspricht. Dies wird wiederum auf Unterschiede in den Prüfkonfigurationen der verglichenen Serien zurückgeführt. Die direkt aufgeklebten Stahlplatten von BIDA KOV [42] verursachen, wie in Kapitel 2-1.2.3 erörtert, lokale Spannungsspitzen in der Lasteinleitungsfuge, welche in Folge zu einer Unterschätzung der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  führen. Diese These wird mit der Aussage von BIDA KOV [42] bestätigt, dass die meisten Prüfkörper in der Nähe der Lasteinleitungsfuge versagt haben. Bei den hier durchgeführten Prüfungen der Serie 5sCL300<sup>2</sup> haben hingegen nur etwa ein Fünftel in oder in der Nähe der Lasteinleitungsfuge versagt.

Bei den Auswertungen von BIDA KOV [42] geht nicht hervor, wie viele der 25 untersuchten Prüfkörper mit direkt aufgeklebten Stahlplatten untersucht worden sind. Bei der Versuchsbeschreibung geht er nämlich auch auf dieselbe Versuchskonfiguration, die hier verwendet wurde, ein und zeigt sogar ein Foto eines Prüfkörpers mit aufgeklebten Lasteinleitungsblöcken in der Prüfmaschine.

Die Untersuchungen von BIDA KOV [42] sind im Allgemeinen kritisch zu beleuchten. Er vergleicht die Ergebnisse von unidirektional verklebten Prüfkörpern mit jenen von orthogonal verklebten (siehe Abbildung 1-38). Jene Proben des Typs B sind zwar orthogonal verklebt, doch stellt ein zweischichtiger Prüfkörper keine gesperrte Struktur im Sinne eines symmetrisch aufgebauten Querschnittes wie bei Brettsperrholz dar. Deshalb wird nicht näher darauf eingegangen; ein Vergleich mit den, in dieser Arbeit vorliegenden Ergebnissen, ist aufgrund anderer Spannungsverteilungen ohnedies nicht möglich.

Über den Querkzug-E-Modul und die Rohdichte kann keine Aussage getroffen werden, da BIDA KOV [42] diese Daten in seinen Ergebnissen nicht anführt. Es muss kritisch hinterfragt werden, warum die Wegaufnehmer in Abbildung 1-41, montiert am selben Prüfkörper, deutlich voneinander abweichen. Dies könnte auf Exzentrizitäten in der Lasteinleitung oder auf mangelhaft montiertes Messequipment hindeuten. Eine E-Modulbestimmung im Sinne der ON EN 408(2012) [44] ist mit den gezeigten Daten nicht möglich.

Die Aussage von BIDA KOV [42], dass die Querkzugfestigkeit bei tangentialer Belastung am größten und bei radialer Belastung am geringsten sei, kann nicht bestätigt werden und wird auch auf Basis der umfangreichen Literaturrecherche im Kapitel 1-3 dementiert. Weiters wird angemerkt, dass es aufgrund der Jahrringkrümmung nur selten zu rein radialer beziehungsweise tangentialer Belastung kommt.

### 4-1.3 BRETTSPERRHOLZ VS. BRETTSCHICHTHOLZ

Wie im Zuge der Subserienanalyse im Kapitel 3-3 erörtert, zeigen Brettsperrholz und Brettschichtholz ein komplett unterschiedliches Querkzugverhalten. Auch in den Finite Elemente Studien im Kapitel 2-1.3 konnte dies festgestellt werden. Dieser Umstand wird auf den *Sperreffekt*, also auf die, auf die Längsstauchung, reduzierte Querstauchung, zurückgeführt. Durch diesen Effekt kommt es zu, im Vergleich zu Brettschichtholz, anderen Spannungsverteilungen im Prüfkörper, was sich sowohl auf Querkzugfestigkeit als auch auf den Querkzug-E-Modul von Brettsperrholz positiv auswirkt. Der Mittelwert der Querkzugfestigkeit ist bei Brettsperrholz in etwa um 40 % höher als jener von Brettschichtholz. Beim Querkzug-E-Modul beträgt dieser positive Einfluss des Sperreffekts rund 33 %.

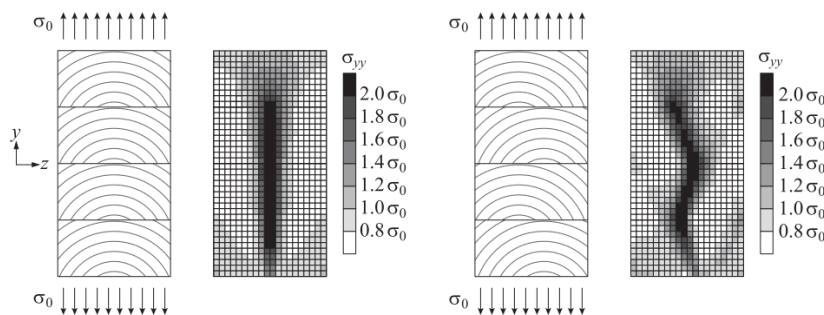


Abbildung 4-5 Spannungsakkumulationen in Brettschichtholz [11]

Wie in Abbildung 4-5 von DANIELSON [11] dargestellt, kommt es bei Brettschichtholz zu einer Spannungsakkumulation im Zentrum des Prüfkörpers. Dieses Spannungsfeld basiert einerseits auf der ungehinderten Querstauchung, was in der Abbildung 2-5 im Zuge der FEM-Analysen festgestellt wurde. Andererseits und wesentlich stärker werden diese Spannungsspitzen aber von der Jahrringlage beeinflusst. Dies verdeutlicht DANIELSON [11] mit der Vergleichsmodellierung in Abbildung 4-5-rechts. Diese Bereiche mit akkumulierten Spannungen wirken rissinitiiierend und sind somit ausschlaggebend für das typische Versagensverhalten von querkzugbeanspruchtem Brettschichtholz. Wie im Kapitel 1-3.1.3 zum Bruchverhalten beschrieben, gibt es meistens im Zentrum des Prüfkörpers einen Initialriss, dem eine Spannungsumlagerung und die Möglichkeit einer weiteren Laststeigerung folgen, ehe bei fortschreitendem Risswachstum das Totalversagen eintritt. Ein typischer Initialriss im spannungsakkumulierten Bereich wurde in Abbildung 4-6-links mit „1“ markiert.

Bei Brettsperrholz hingegen treten die beschriebenen Spannungsakkumulationen nicht in diesem Ausmaß auf. Wie bei den Finite Elemente Untersuchungen gezeigt, sind die Spannungen aufgrund der orthogonalen Schichtung im Zentrum geringer als bei Brettschichtholz. Des Weiteren können sich die Spannungsspitzen zufolge der Jahrringkrümmung nicht akkumulieren, sondern werden Schicht für Schicht unterbrochen. So kommt es nur in der Schwerachse des Prüfkörpers zu lokalen Spannungsakkumulationen. Von der Spannungsverteilung mutet dies einer Aneinanderreihung von Einzelbrettern an, was sich auch im Bruchverhalten widerspiegelt. Sämtliche Brettsperrholzprüfkörper zeigen dieselbe Charakteristik in der Arbeitslinie wie die Einzelschichten der Serie 1 (1s). Ein Nachbruchverhalten wie bei Brettschichtholz nach dem erfolgten Initialriss im Bereich akkumulierter Spannungsspitzen war bei Brettsperrholz nie zu beobachten. Dies wird in den Kraft-Traversenwegdiagrammen im Anhang B-3 verdeutlicht.

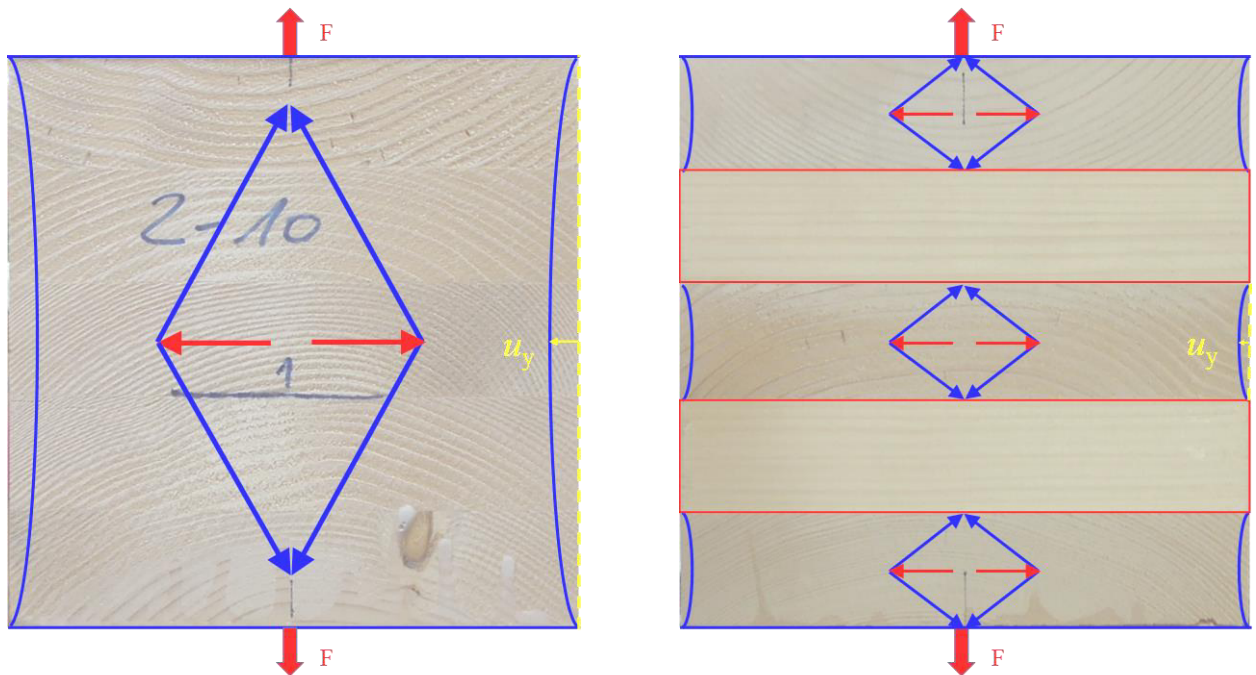


Abbildung 4-6 Gegenüberstellung Fachwerkmodell für Querzug von BSH (links) und BSP (rechts)

In Anlehnung an SCHICKHOFER [76] wurde in Analogie zum Fachwerkmodell für Querdruck bei Brett-schichtholz und Brettsperrholz ein Fachwerkmodell für Querzug angefertigt. Hier wird das große Spannungsfeld bei Brett-schichtholz in der Mitte des Querschnittes deutlich ersichtlich. Außerdem erkennt man horizontale Querdruckreaktionskräfte, welche auf eine Querzug-Schubkombination in den Fugen hindeuten. Im Zuge der Finiten Elemente Analyse wurde der Fokus auf die Spannungen  $\sigma_z$  gelegt.

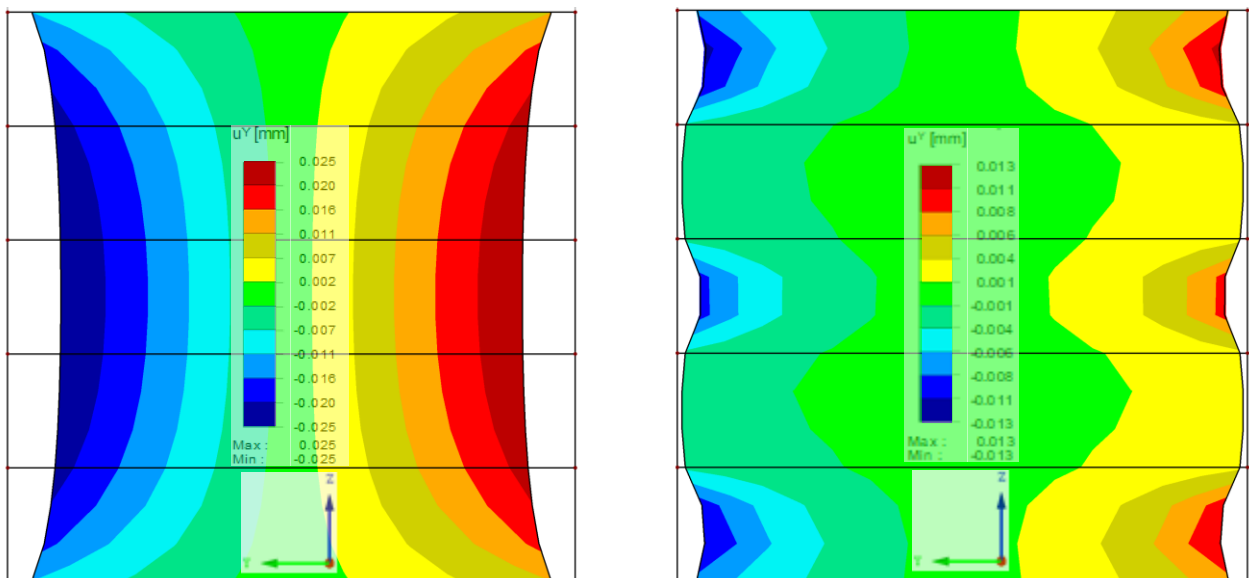


Abbildung 4-7 Gegenüberstellung von Verformungen von BSH (links) zu BSP (rechts) im FEM-Modell bei Zug quer zur Faser

In Abbildung 4-7 werden die Querstauchungen von Brett-schichtholz und Brettsperrholz auf Basis der angefertigten vereinfachten Finite-Elemente Modelle gegenübergestellt. Dabei ist die Auswirkung der orthogonalen Verklebung deutlich zu sehen. Die Querstauchung von Brettsperrholz wird dabei annähernd auf das Längsstauchungsverhalten der Querlagen reduziert.

## 4-1.4 CHARAKTERISTISCHE KENNWERTE

Bei der Berechnung der charakteristischen Kennwerte für Brettspertholz und Brettschichtholz auf Basis der Serien 5sCL und 5sGL nach ON EN 14358 (2016) [69] zeigen sich folgende Werte:

**Tabelle 29** *Vergleich charakteristischer Kennwerte für Querkzugkenngrößen bei BSP und Vergleich mit BSH*

	$f_{t,90,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>BSP</b>	0,75	580	680	400
<b>BSH</b>	0,39	360	450	390

Dazu gibt es anzumerken, dass sowohl bei der Ermittlung der Werte für Brettschichtholz als auch Brettspertholz keine Versuchskörper mit Markröhren berücksichtigt wurden. Sowohl STUEFER [31] als auch BLASS [29] beziffern den Festigkeitsabfall bei Vorhandensein von Markbrettern mit rund 40 % (vgl. Abbildung 1-28). Auf Bauteilgröße wird diese Auswirkung für das flächenhafte Holzbauprodukt Brettspertholz nicht im selben Umfang erwartet, da davon ausgegangen werden kann, dass nicht alle Bretter eine Markröhre aufweisen werden und es zu Lastumlagerungen im Systemverbund kommen wird. Die in Tabelle 28 angeführten Werte für die charakteristische Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,k}$  sind, diesen Umstand entsprechend berücksichtigend, somit noch nach unten zu korrigieren. Für Brettschichtholz bedeutet dies, dass mit den vorliegenden Testergebnissen, korrigiert auf das Referenzvolumen von  $V_{ref} = 0,01 \text{ m}^3$ , die normative charakteristische Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$  nicht bestätigt werden kann obwohl der Einfluss von Mark in diesen Daten unberücksichtigt blieb.

Weiters gilt es zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen bei einer Holzaustragsfeuchte  $u = 12 \pm 2 \%$ , entsprechend der Nutzungsklasse 1, durchgeführt wurden. Da die ON EN 1995 [39] bei den Festigkeitskenngrößen nicht zwischen Nutzungsklasse 1 und 2 unterscheidet, muss im konservativen Fall eine Festigkeitsminderung zufolge einer höheren Holzaustragsfeuchte bei NKL 2 stattfinden.

## 4-2 CONCLUSIO

Mit der systematischen Untersuchung des Querkzugverhaltens von Brettsperrholz kann bewiesen werden, dass, ähnlich wie bei Brettschichtholz von STUEFER [31], eine volumenabhängige Festigkeitsänderung beobachtet werden kann. Dieser serielle Größeneffekt basiert auf der „Weakest-Link“ Theorie von WEIBULL (1939) [37] und besagt, dass bei zunehmendem Volumen die Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  abnimmt. Die Funktion für den Volumenfaktor  $k_{vol}$  aus der ON EN 1995- 1-1 (2015) [39] für die volumenabhängige Querkzugfestigkeit bei Brettschichtholz ist nahezu ident mit der in dieser Arbeit ermittelten Funktion für die Beschreibung des seriellen Systemeffektes. Aufgrund der Skaleninvarianz der Funktion von  $k_{vol}$  kann eine Anpassung des Referenzvolumens beziehungsweise der Referenzfestigkeit direkt erfolgen. Neben dem seriellen Größeneffekt (Höhen- bzw. Schichtanzahlereffekt) kann bei Brettsperrholz auch ein paralleler Systemeffekt zufolge von synchron belasteten Lamellen beobachtet werden. Dieser Systemeffekt lässt, im Gegensatz zum „Weakest-Link“ Effekt, die Querkzugfestigkeit ansteigen. Die Verbesserung kann beim Mittelwert mit 5 % beziffert werden, beim 5 %-Quantilwert mit rund 20 %. Dies lässt auf Homogenisierungseffekte bei zunehmender Anzahl vergleichbar QZ-beanspruchter Lamellen je Lage schließen. Der Systembeiwert  $k_{sys}$  in ON EN 1995- 1- 1 (2015) [39] liegt demnach deutlich auf der konservativen Seite. Eine Auswirkung des Plattentyps, also der Variation von Schichtstärken benachbarter Lagen auf die Querkzugfestigkeit von Brettsperrholz, konnte versuchstechnisch nicht nachgewiesen werden. Sehr wohl konnte der Unterschied zwischen Brettschichtholz und Brettsperrholz beim Querkzugverhalten erarbeitet werden. Demnach hat Brettsperrholz im Vergleich zu Brettschichtholz, bei selber Rohdichteverteilung der verglichenen Querschnitte, eine um 40 % höhere Querkzugfestigkeit. Aufgrund der orthogonalen Schichtung von Brettsperrholz kommt es im Querschnitt zu geringerer Spannungsakkumulation, welche maßgebend von der Jahrringlage und -krümmung beeinflusst wird. Ein zentrales Spannungsfeld im Brettschichtholzquerschnitt verursacht Initialrisse, die die Festigkeit deutlich herabsetzen. Eine ähnliche Steigerung ist bei der Dehnsteifigkeit  $EA_{\perp}$  zu beobachten. Der Querkzug-E-Modul bei Brettsperrholz ist in etwa um ein Drittel höher als bei Brettschichtholz. Es kann weiters gezeigt werden, dass sowohl die Querkzugfestigkeit als auch der Querkzug-E-Modul auf Bauteilgröße, also bei zufälliger Jahrringlage, kaum von der Rohdichte abhängen. Sehr wohl gibt es einen schwachen linearen Zusammenhang zwischen Querkzug-E-Modul und Querkzugfestigkeit.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass es limitierende Faktoren gibt und diese somit nicht als „allgemein gültig“ interpretiert werden können. Es gilt zu erwähnen, dass die hergestellten Prüfkörper nicht zufällig aus industriell gefertigten BSP-Platten stammen und somit der Effekt von in ihrer Breite angeschnittenen Lamellen nicht berücksichtigt wird. Dies könnte bei den untersuchten Querschnittsgrößen zu ausgeprägten asymmetrischen Spannungsverteilungen führen. Global, auf eine Platte betrachtet, ist zu erwarten, dass sich dieser Effekt ausgleicht und somit auf die Querkzugfestigkeit kaum Einfluss haben wird. Weiters muss berücksichtigt werden, dass keine ausgeprägt längsorientierten BSP-Schichtaufbauten, also mit Doppel- oder Dreifachlagen, untersucht wurden. Bei solchen Aufbauten wird der Sperrereffekt schwächer sein und das Querkzugverhalten von BSP wird sich dem von BSH annähern. Außerdem wurden nur Untersuchungen ohne Schmalseitenverklebung durchgeführt. Die Möglichkeit höherer innerer Spannungen bei Brettsperrholz mit tragender Schmalseitenverklebung in Folge von Quell- und Schwinderscheinungen bei veränderten klimatischen Verhältnissen und deren Auswirkung auf die Querkzugfestigkeit gilt es noch zu diskutieren. Die vorliegenden Ergebnisse können nicht auf Brettsperrholzprodukte mit nachgiebig verbundenen Lamellen angewandt werden. Solche Massivholzprodukte (HOLZ 100, MHM u.ä.) haben in der Regel keine flächig miteinander verbundenen Lamellen und können daher nur bedingt bzw. in geringerem Ausmaß Zugspannungen normal zur Plattenebene aufnehmen.

Zusammenfassend wird erwähnt, dass im Zuge dieser Masterarbeit eine charakteristische Querkzugfestigkeit für Brettsperrholz  $f_{t,90,k} = 0,75 \text{ N/mm}^2$  bei einem Referenzvolumen  $V_{ref} = 0,01 \text{ m}^3$ , einer Holzfeuchte von rund 12 %, einer charakteristischen Rohdichte  $\rho_k = 400 \text{ kg/m}^3$  und ohne Berücksichtigung von Markbrettern ermittelt wurde. Der Querkzug-E-Modul  $E_{t,90,05}$  wurde mit  $580 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{t,90,mean}$  mit  $680 \text{ N/mm}^2$  beziffert. Für eine normative Festlegung sind, wie bereits erwähnt, Einflüsse aus höherer Holzfeuchtigkeit und Wuchsmerkmale wie Mark ergänzend zu berücksichtigen. Die Querkzugfestigkeit für BSH liegt lt. den vorliegenden Untersuchungen mit  $f_{t,90,k} = 0,39 \text{ N/mm}^2$  deutlich unter den normativen Festlegungen.

## 4-3 AUSBLICK

---

Aufbauend auf diese Arbeit wurde ein FFG-Collective Research Projekt mit dem Titel „Ausklüngen in BSP und BSP-Rippenplatten“ [77] in Angriff genommen (vgl. Kapitel 1-2). Die vorliegenden Ergebnisse sollen dazu als Basiskenngrößen für das Querkzugverhalten von Brettsperrholz liefern.

Im Zuge des Projektes sollen einerseits numerische Studien für die Bestimmung maßgebender Parameter bei Ausklüngen in BSP-Platten und BSP-BSH-Rippenplatten durchgeführt werden und daraus Berechnungsmodelle inkl. Randbedingungen abgeleitet werden. In weiterer Folge soll das Berechnungsmodell mittels Prüfungen validiert werden. Man will auch erste Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Ausklüngen anstellen. Dazu soll die Prüfkongfiguration mit einer konstanten Last bei konstantem Klima der Nutzungsklasse 2 für ein Jahr beobachtet werden und sowohl die Kriechverformungen als auch die Rissbildung und -ausbreitung protokolliert werden. [77]

Um realitätsnahe Prüfungen durchführen zu können, werden neben der Ausklüngen-geometrie auch die Plattentypen, sowie Verstärkungsmaßnahmen variiert. Aufgrund der Tatsache, dass der Ausklüngengrund bei Brettsperrholz je nach Geometrie in einer Längs- oder Querlage zu liegen kommt, bedarf es einen Fokus auf die Querkzug-Rollschub Spannungsinteraktion. Solche Interaktionen von Querkzug- und Schubspannungen würden zu einer deutlichen Reduktion der Widerstandsfähigkeit derartig beanspruchter Bauteile führen. [77]

Neben der Ausklüngenhöhe sollen auch die Ausklüngenlänge sowie -neigung variiert werden. Bei den Plattentypen soll der Schwerpunkt bei 5- und 7- schichtigen Aufbauten liegen, wobei jeweils drei verschiedene Schichtstärkenvariationen untersucht werden sollen. Verstärkungsmaßnahmen sollen mittels Vollgewindeschrauben unter Variation der Anordnung und Neigung geprüft werden. Durch die Variation der Neigung soll die Wirkung der Schrauben als Querkzug- und / oder Schubverstärkung beeinflusst werden. Die Prüfung unausgeklünger Referenzprüfkörper erfolgt durch eine 4-Punkt-Biegeprüfung, wobei Basiskenngrößen der Platte bestimmt werden. Als Basiskenngrößen zählen neben der Rollschubfestigkeit auch die Biege- und Schubsteifigkeit, woraus E-Modul und Rollschubmodul bestimmt werden. Die Festigkeit der ausgeklünger Prüfkörper soll dann mittels einer 3-Punkt-Biegeprüfung erfolgen. [77]

*„Die Motivation für das Durchführen dieses Projektes liegt in der fehlenden Regelung für die Bemessung von Ausklüngen in BSP und BSP-Rippenplatten sowie in der Bewusstseinsbildung im Sinne des bewussten Erkennens von Konstruktionsdetails und Ausführungsvarianten welche Querkzugspannungen in ausgeklünger BSP-Plattenelementen und Rippendecken mit BSP als lastverteilendes Element hervorrufen“ [77]*

Nach dem Abschluss dieses FFG-Projektes sollen Bemessungs- und Ausführungsvorschläge als Basis für die Normung vorliegen [77].



## ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Hausegger, „www.proholz.at,“ [Online]. Available: <http://www.proholz.at/co2klimawald/waldland-oesterreich/>. [Zugriff am 07 September 2019].
- [2] G. Schickhofer, *Der Roh- und Werkstoff Holz*, I. f. H. u. Holztechnologie, Hrsg., Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006.
- [3] A. Isop, *zuschnitt 65*, Wien: proHolz Austria, 2017.
- [4] F. Colling, *Holzbau*, Mering: Springer Verlag, 2014.
- [5] E. Treml, *Holzanatomie*, Salzburg: Fachhochschule Salzburg, Standort Kuchl, 2011.
- [6] J.-D. Godet, *Holzführer*, Stuttgart: Ulmer, 2006.
- [7] P. Niemz, „Holz und Holzwerkstoffe,“ in *Skript zur Vorlesung Werkstoffe 1 (Materialeigenschaften)*, Zürich, ETH Zürich, 2011.
- [8] T. Ehrhart, *Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettsperrholz*, TU Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2014.
- [9] T. Bogensberger, „Elastizitätstheorie, Materialsteifigkeiten und Materialfestigkeiten,“ in *Studienblätter Holzbau 2*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2016.
- [10] P. Niemz, *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993.
- [11] H. Danielsson, *Perpendicular to grain fracture analysis of wooden structural element*, Lund University: Division of Structural Mechanics, 2013.
- [12] Schickhofer et al., *BSPHandbuch*, TU Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2010.
- [13] M. Paulitsch und M. C. Barbu, *Holzwerkstoffe der Moderne*, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 2015.
- [14] G. Schickhofer, „Brettsperrholz,“ in *Formelsammlung Holzbau*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [15] E. Guttmann, „zuschnitt,“ *Massiv über Kreuz*, Nr. 31, 2008.
- [16] A. Isop, „zuschnitt,“ *Planungsprozesse*, Nr. 70, 2018.
- [17] F. Latke und M. Stieglmeier, „zuschnitt,“ *Planungsprozesse*, Nr. 70, pp. 6-7, 2018.
- [18] G. Jauk, „holzkurier,“ [Online]. Available: <https://www.holzkurier.com/holzprodukte/2018/11/bsp-produktion-2017-markt-waechst.html>. [Zugriff am 10 September 2019].
- [19] Pabst Holz, „www.pabst-holz.com,“ [Online]. Available: <https://pabst-holz.com/produkte/pabst-clt/>. [Zugriff am 7 September 2019].
- [20] A. Hofmann, „Woodplan,“ [Online]. Available: <https://www.woodplan.at/referenzprojekte/>. [Zugriff am 10 September 2019].
- [21] KLH Massivholz GmbH, „Bauteilkatalog,“ *Konstruktion*, Nr. 1, pp. 15-16, 2012.

- [22] Stora Enso, „Technikordner,“ *Konstruktion*, Nr. 05, p. 37, 2015.
- [23] M. Wallner-Novak, J. Koppelhuber und K. Pock, „Brettsperrholzbemessung,“ *Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode*, Bd. 1, p. 68, 2013.
- [24] M. Augustin, S. Zimmer, T. Bogensberger und T. Sleik, A contribution to the desing of ripped plates, Graz: holz.bau forschung gmbh, 2016.
- [25] KLH Massivholz GmbH, „Europäische Technische Bewertung,“ *ETA-06/0138*, p. 7, 2017.
- [26] Holzbau Unterreiner, „Das Brettsperrholz,“ *Prospekt*, 2018.
- [27] G. Stecher, A. Kraler und R. Maderebner, „Radiusholz" - Curved Cross Laminated Timber (CLT) Elements,“ Innsbruck, Universität Innsbruck, 2014.
- [28] F. Kollmann, *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Hamburg: Springer Verlag , 1951.
- [29] H. J. Blass, *Querzugfestikeit von Vollholz und Brettschichtholz*, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 1998.
- [30] G. Dill-Langer, *Schädigung von Brettschichtholz bei Zugbeanspruch*, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen Universität Stuttgart, 2004.
- [31] A. Stuefer, „Einflussparameter auf die Querzugfestigkeit von BSH Lamellen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2011.
- [32] H. J. Blass, *Ermittlung der Querzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1999.
- [33] A. Stuefer, „Einflussparameter auf die Querzugfestigkeit von BSH-Lamellen,“ in *Präsentation*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2011.
- [34] U. Lohmann, *Holz Handbuch*, Rosenheim: DRW-Verlag, 1990.
- [35] M. Rosenthal, *Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz*, Dresden: TU Dresden, 2009.
- [36] G. Schickhofer, *Das schwächste Glied in dre Kette bestimmt den Level*, Garmisch: Internationales Holzbau-Forum, 2006.
- [37] W. Weibull, *A statistical theory of the strength of materials*, Stockholm: centralstabens litografiska anstalts förlag, 1939.
- [38] S. Aicher, *Evaluation of different size effect models for tension perpendicular to grain strength of glulam*, Stuttgart/Kyoto: Otto-Graf-Institute, 2002.
- [39] ÖNORM B 1995-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
- [40] R. Brandner, *Stochastic System Action and Effects in Engineered Timber Products and Structures*, Graz: TU Graz, 2012.
- [41] H.-L. Mistler, *Über die Querzugfestigkeit von Fichten-Brettschichtholz in Abhängigkeit von der Bauteilgröße und der Verteilung der Beanspruchung*, Karlsruhe: Bruder-Verlag, 1982 .
- [42] A. Bidakov, „CLT Strength in Tension Perpendicular to Grain,“ in *Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber*, Aachen, Shaker Verlag GmbH, 2018, pp. 182-195.

- [43] G. Stecher, Zur Berechnung der Tragfähigkeit und Verformung einfach gekrümmter Brettsperrholzelemente, Innsbruck: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2017.
- [44] ÖNORM EN 408, „Holzbauwerke-Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2012.
- [45] I. Feichter, Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2013.
- [46] M. Tripolt, „Prüftechnische Bestimmung des orthotropen Elastizitätsverhaltens von Fichtenholz,“ in *Präsentation*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2018.
- [47] K. B. Dahl, „Linear shear properties of spruce softwood,“ in *Wood Science and Technologie*, Trondheim, Springer-Verlag, 2009, pp. 499-525.
- [48] T. Ehrhart, „Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration and Parameter Study,“ in *INTER / 48-06-01*, Zürich / Graz, pp. 61-76.
- [49] M. Tripolt, Prüftechnische Bestimmung des orthotropen Elastizitätsverhaltens von Fichtenholz, Technische Universität Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2018.
- [50] S. Hering, Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen, Zürich: ETH Zürich, 2011.
- [51] A. Schweizer, „www.schweizer-fn.de,“ [Online]. Available: <https://www.schweizer-fn.de/maschinenelemente/schweissnaht/schweissverbindung.php>. [Zugriff am 8 November 2019].
- [52] Würth GmbH, „Europäische Technische Zulassung ETA-11/0190,“ 2013.
- [53] R. Brandner, A. Ringhofer und J. Scheibenreiter, Probleme und Lösungsansätze für die Verschraubung in Hartlaubholzprodukten, Innsbruck: Internationales Holzbauforum IHF, 2019.
- [54] Keller&Kalmbach, „keller-kalmbach.de,“ [Online]. Available: <https://keller-kalmbach.de/produkte/verbindungselemente/schrauben/ringschrauben/din-580-ringschraube/p/200580712>. [Zugriff am 8 November 2019].
- [55] ON EN 14081-1, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [56] ÖNORM DIN 4074-1, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
- [57] ON EN 338, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [58] Purbond, „Purbond HB S309,“ in *IK-Polyurethanklebstoff zur Herstellung von tragenden Holzbauteilen*, 2009.
- [59] HBM, „www.hbm.com,“ [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/2514/praeziser-aufnehmer-zum-messen-von-weg-und-dehnung/>. [Zugriff am 3 November 2019].
- [60] HBM, „www.hbm.com,“ [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/0792/tipps-und-tricks-genauigkeitsklasse/>. [Zugriff am 3 November 2019].
- [61] HBM Messtechnik, „www.hbm.com,“ [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/2290/catman-messtechnik-software/>. [Zugriff am 08 12 2019].

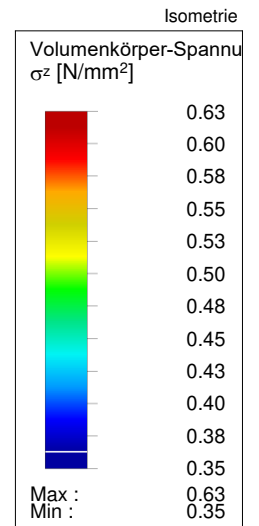
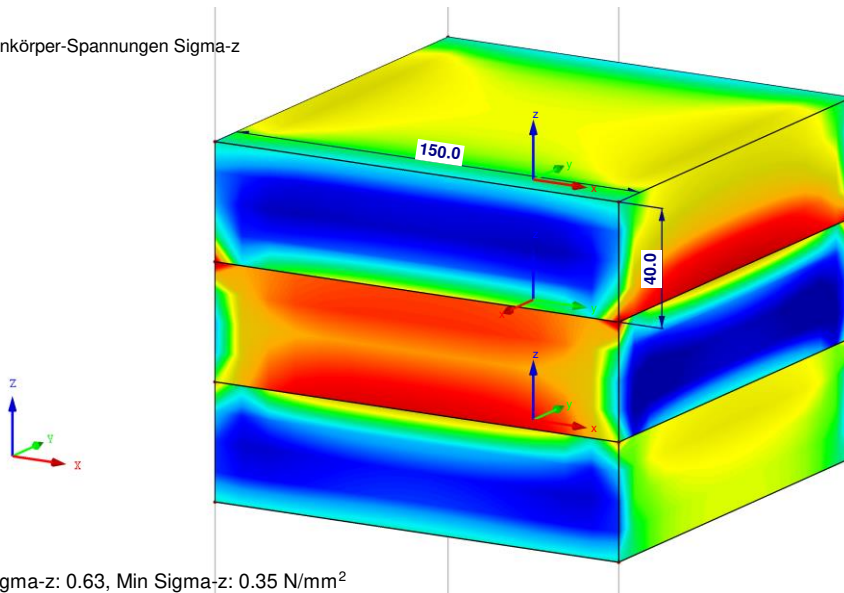
- [62] EN 13183-1, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
- [63] P. Berglez, R. Brandner und M. Fellendorf, *Mathematik 3 für Bauingenieure*, Graz: TU Graz, 2019.
- [64] B. Ripley, *Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS*, Oxford, 2019.
- [65] R. Wicklin, „Maximum likelihood estimation in SAS/IML,“ 2011. [Online]. Available: <https://blogs.sas.com/content/iml/2011/10/12/maximum-likelihood-estimation-in-sasiml.html>. [Zugriff am 31 Dezember 2019].
- [66] H. Schiefer und F. Schiefer, *Statistik für Ingenieure*, Stuttgart: Springer Vieweg, 2018.
- [67] R. Brandner, K. Bratulic und A. Ringhofer, *Serial Correlation of Withdrawal Properties from Axially Loaded Self Tapping Screws*, Graz: TU Graz, 2015.
- [68] R. Brandner und G. Schickhofer, „Spatial correlation of tensile perpendicular to grain properties in Norway spruce timber,“ in *Wood Science and Technology*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2014, pp. 337-352.
- [69] ON EN 14358, *Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [70] ON EN 14080, *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [71] R. Brandner, „strukt. Zuverlässigkeit - Systeme,“ in *Risiko im konstruktiven Ingenieurbau*, Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [72] R. Brandner und G. Schickhofer, *System effects of structural elements - determined for bending and tension*, Graz: Institute for Timber Engineering and Wood Technology, 2006.
- [73] SIA 265, *Holzbau*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018.
- [74] AS 1720.1, *Timber structures*, Sydney: Standards Australia Limited, 2010.
- [75] OHBDC, *Ontario highway bridge design code*, Onatrio: Ministry of Transportation, Quality and Standards Division.
- [76] G. Schickhofer, *Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz - Ausgewählte Forschungsaktivitäten und Einsatzbereiche*, IBK - Kolloquium ETH Zürich: TU Graz, 2011.
- [77] A. Thiel, FFG Collective Research "Ausklinkungen in BSP und BSP-Rippenplatten, Wien: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, 2019.
- [78] G. Flatscher, K. Bratulic, R. Brandner und G. Schickhofer, „Zusammenfassende und weiterführende Arbeiten zum Verhalten von BSP-Tragwerken bei der Beanspruchungssituation Erdbeben,“ *holz.bau forschungs gmbh*, Graz, 2013.
- [79] ON EN 384, *Bauholz für tragende Zwecke- Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.

# ANHANG B ERGEBNISSE

## B-1 FEM Auswertungen

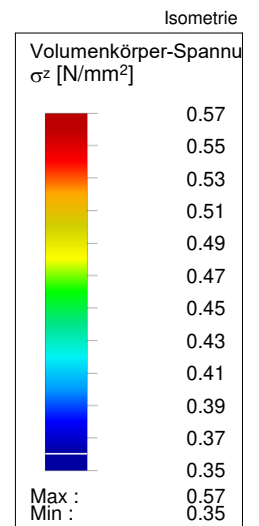
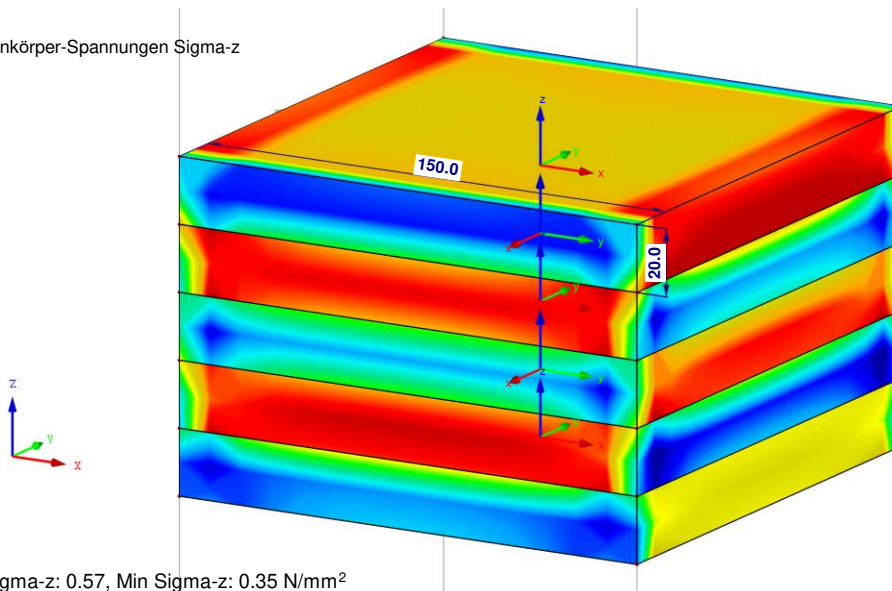
### B-1.1 Variation der Schichtaufbauten

LF 1  
Volumenkörper-Spannungen Sigma-z



Max Sigma-z: 0.63, Min Sigma-z: 0.35 N/mm<sup>2</sup>

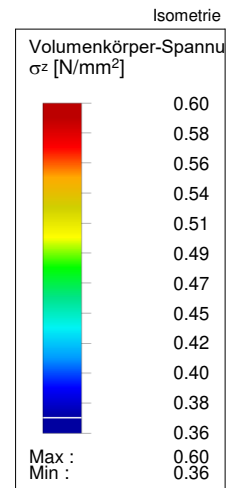
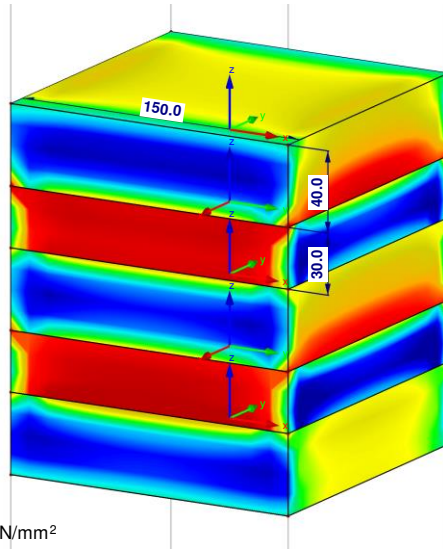
LF 1  
Volumenkörper-Spannungen Sigma-z



Max Sigma-z: 0.57, Min Sigma-z: 0.35 N/mm<sup>2</sup>

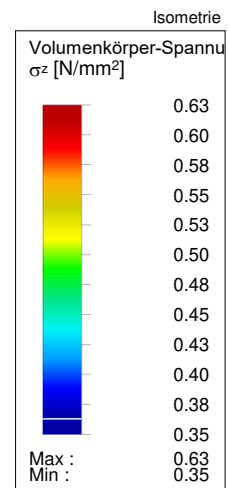
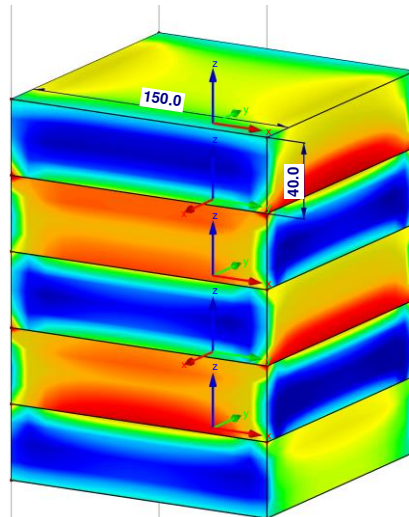
**Abbildung 4-8** Variation der Schichtaufbauten  
(oben: BSP 120 3s (40 40 40); unten: BSP 100 5s (20 20 20 20 20))

LF 1  
Volumenkörper-Spannungen Sigma-z



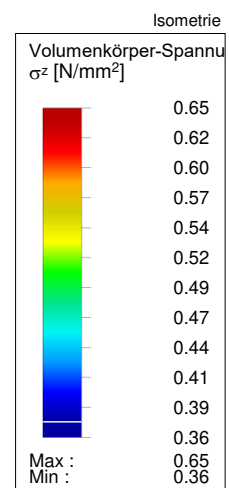
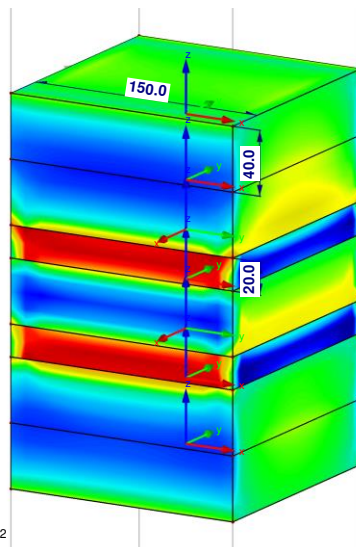
Max Sigma-z: 0.60, Min Sigma-z: 0.36 N/mm<sup>2</sup>

LF 1  
Volumenkörper-Spannungen Sigma-z



Max Sigma-z: 0.63, Min Sigma-z: 0.35 N/mm<sup>2</sup>

LF 1  
Volumenkörper-Spannungen Sigma-z



Max Sigma-z: 0.65, Min Sigma-z: 0.36 N/mm<sup>2</sup>

**Abbildung 4-9** Variation der Schichtaufbauten  
(oben: BSP 180 5s (40 30 40 30 40); mittig: BSP 200 5s (40 40 40 40 40);  
unten: BSP 7ss (40 40 20 40 20 40 40))



## B-2 empirische Verteilungsfunktionen

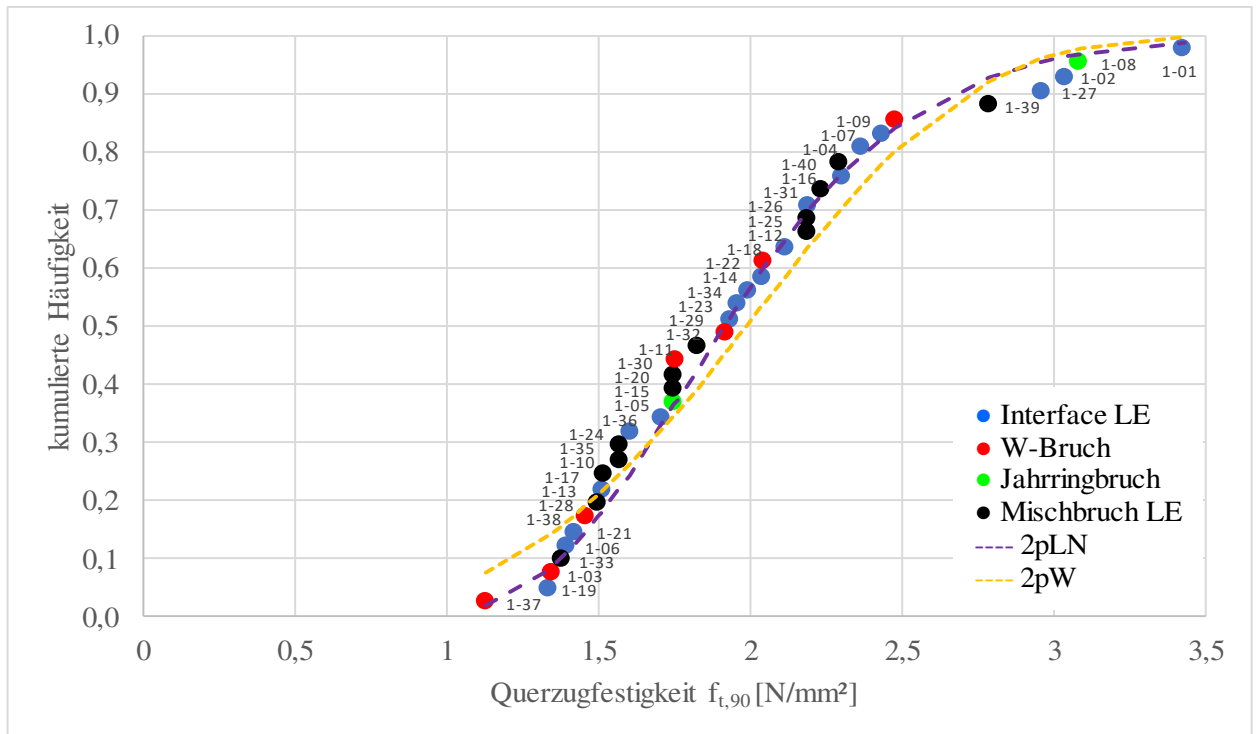


Abbildung 4-10 empirische Verteilungsfunktion Serie 1 (1s)

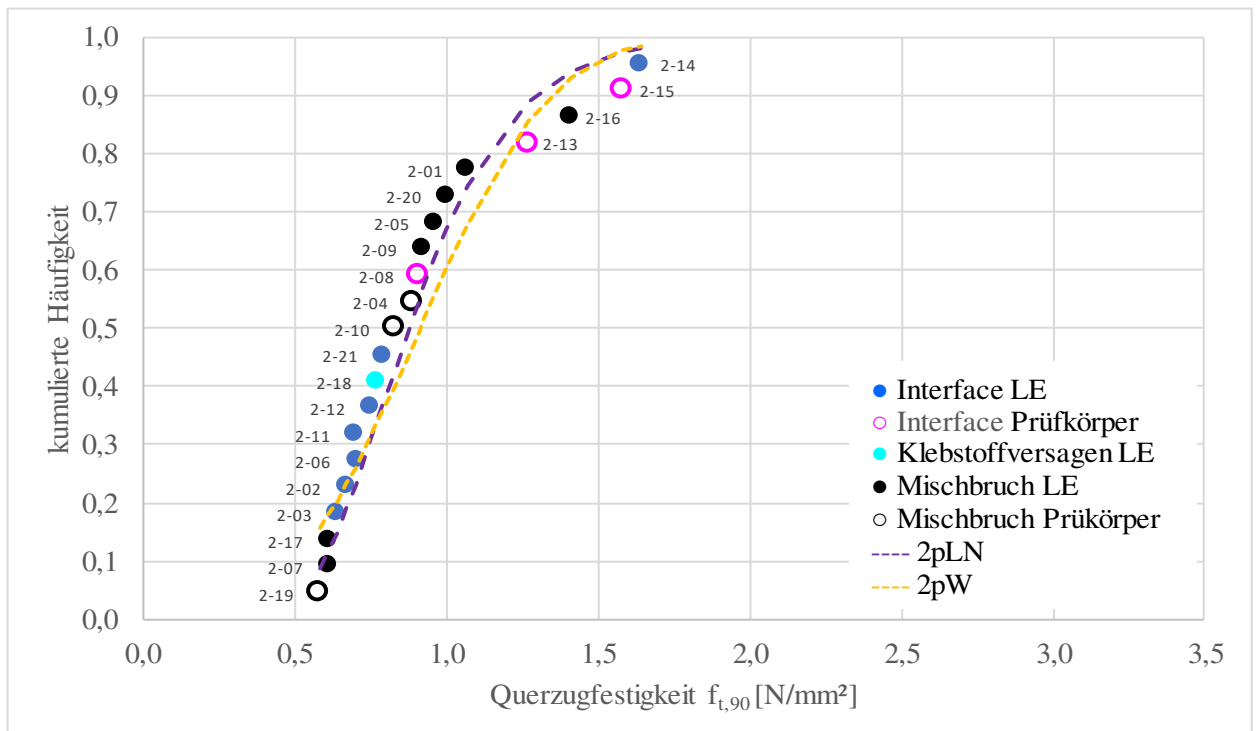


Abbildung 4-11 empirische Verteilungsfunktion Serie 2 (5sGL)

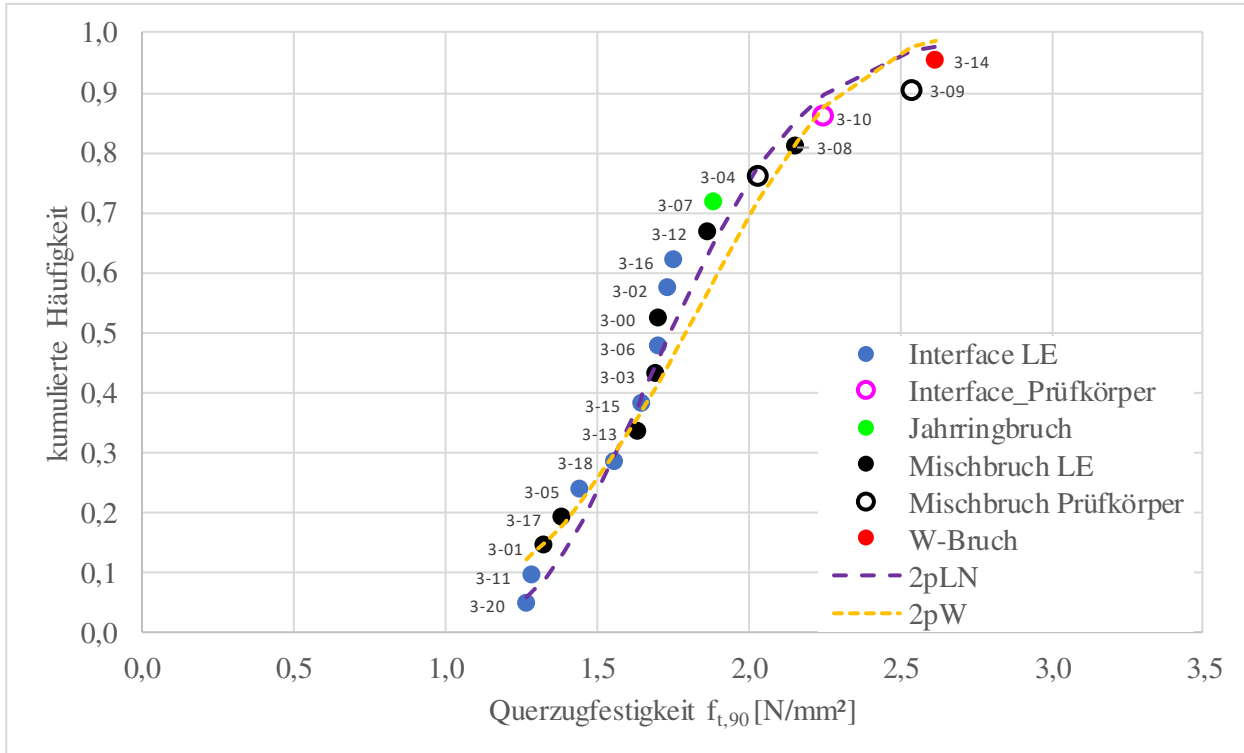


Abbildung 4-12 empirische Verteilungsfunktion Serie 3 (3sCL)

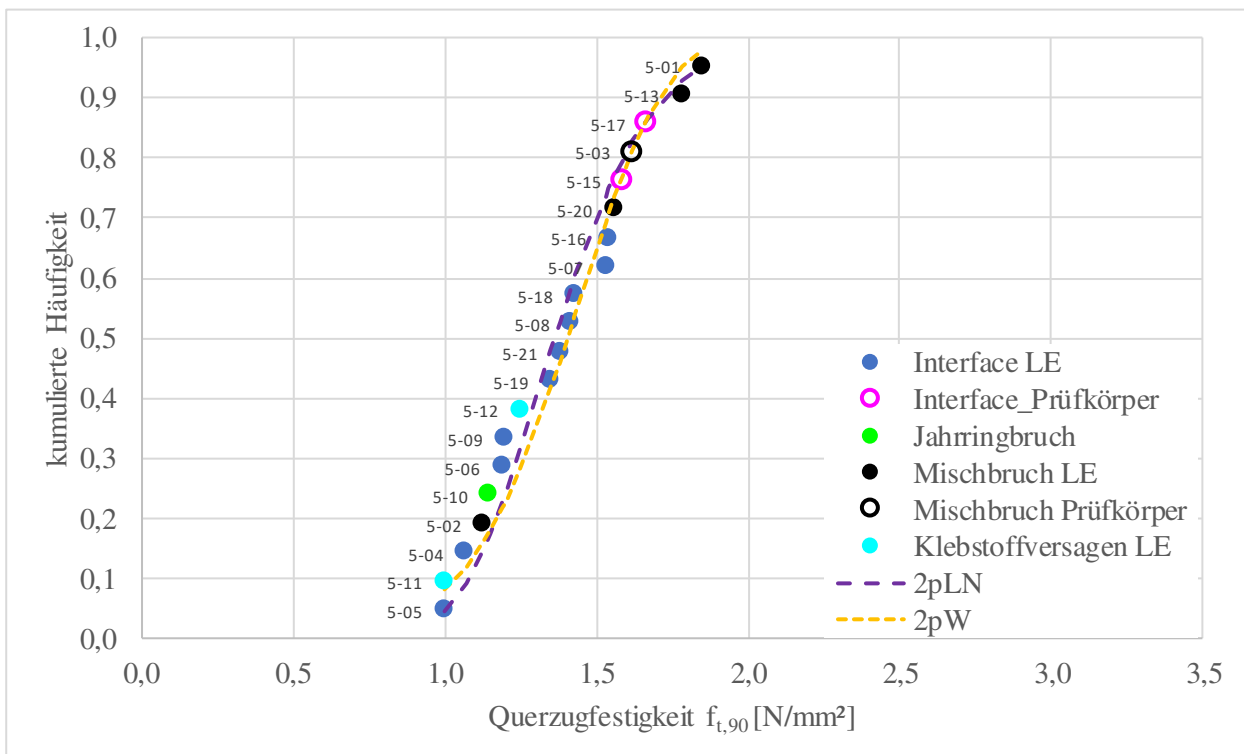


Abbildung 4-13 empirische Verteilungsfunktion Serie 5 (7sCL)

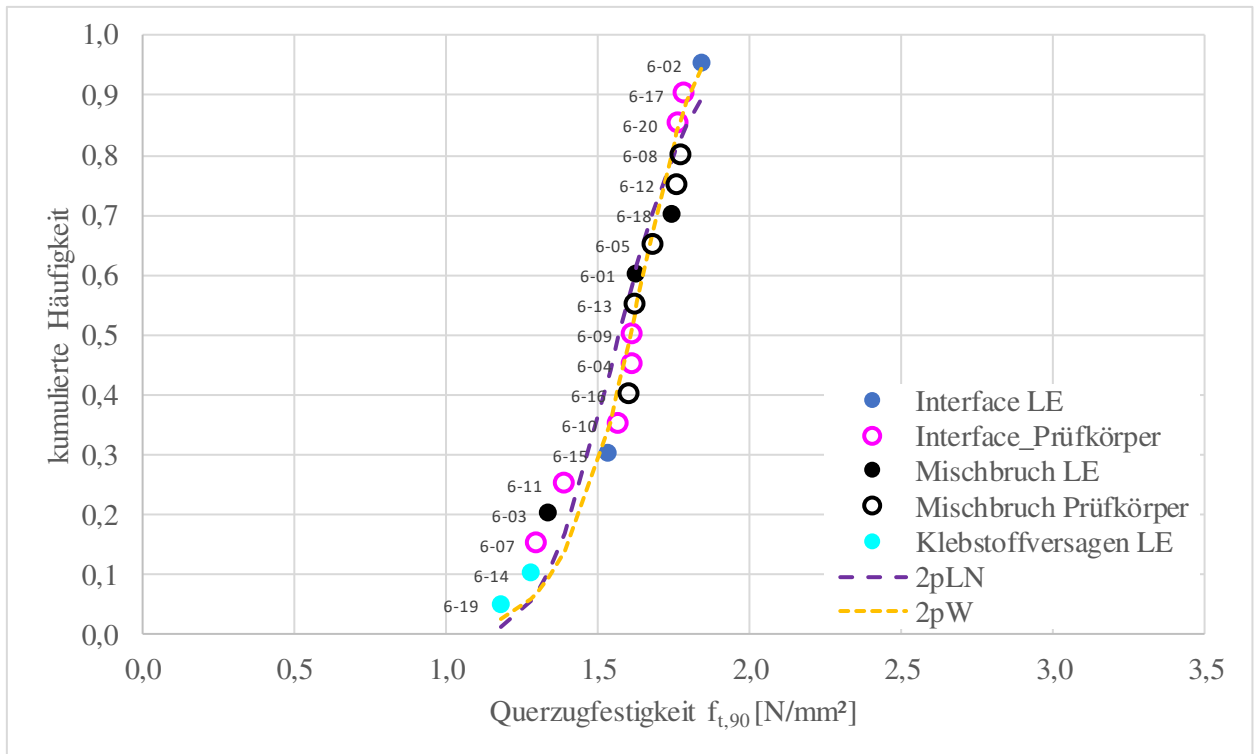


Abbildung 4-14 empirische Verteilungsfunktion Serie 6 (5sCL300²)

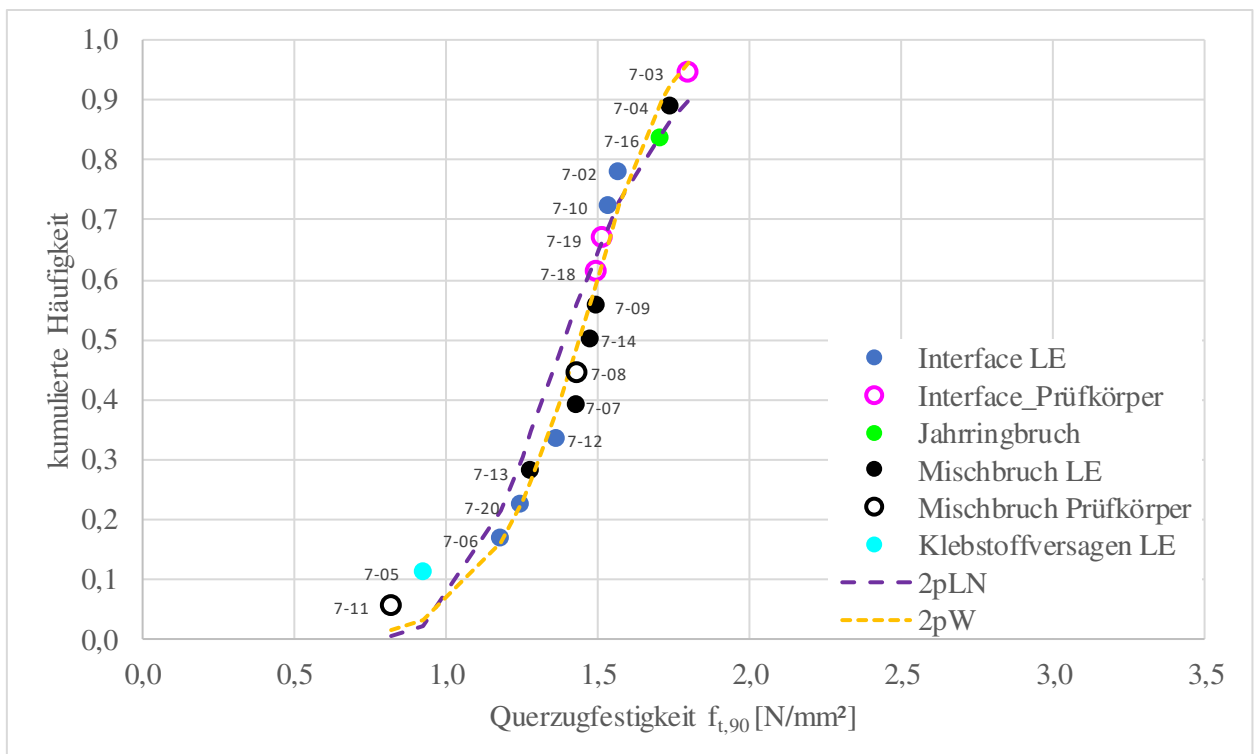


Abbildung 4-15 empirische Verteilungsfunktion Serie 7 (5sVL)

## B-3 Kraft-Verformungskurven

Prüfserie 1: 1-01 bis 10

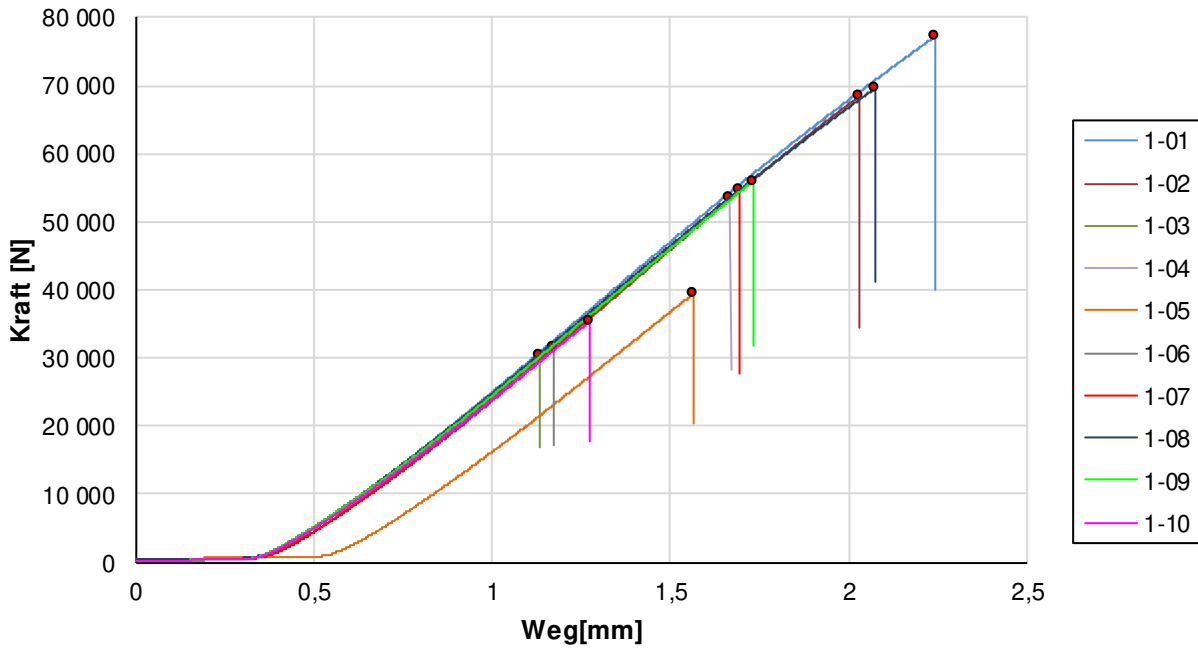


Abbildung 4-16 Kraft-Verformungskurven 1-01 bis 1-10

Prüfserie 1: 1-11 bis 20

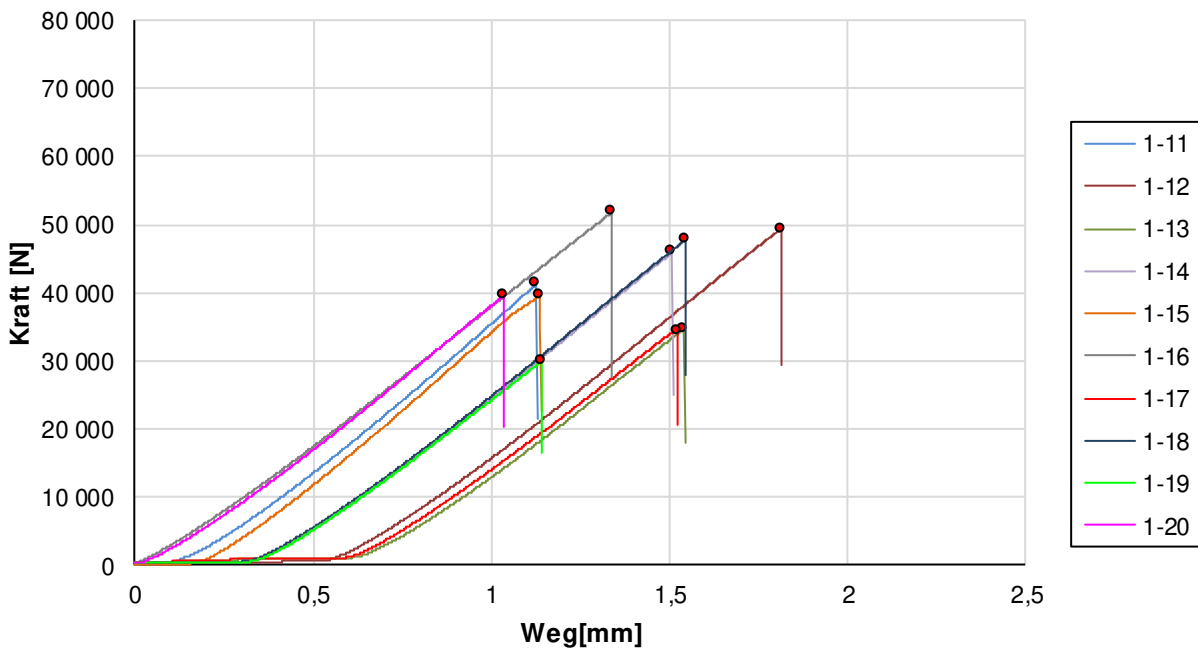


Abbildung 4-17 Kraft-Verformungskurven 1-11 bis 1-20

### Prüfserie 1: 1-21 bis 30

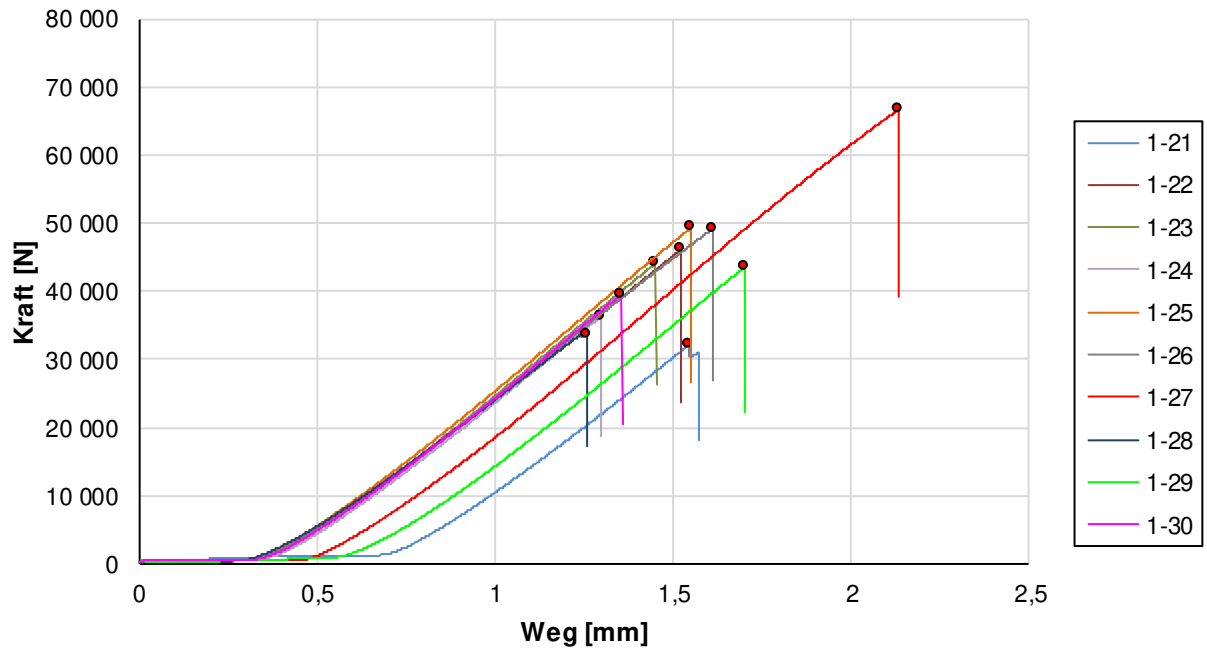


Abbildung 4-18 Kraft-Verformungskurven 1-21 bis 1-30

### Prüfserie 1: 1-31 bis 40

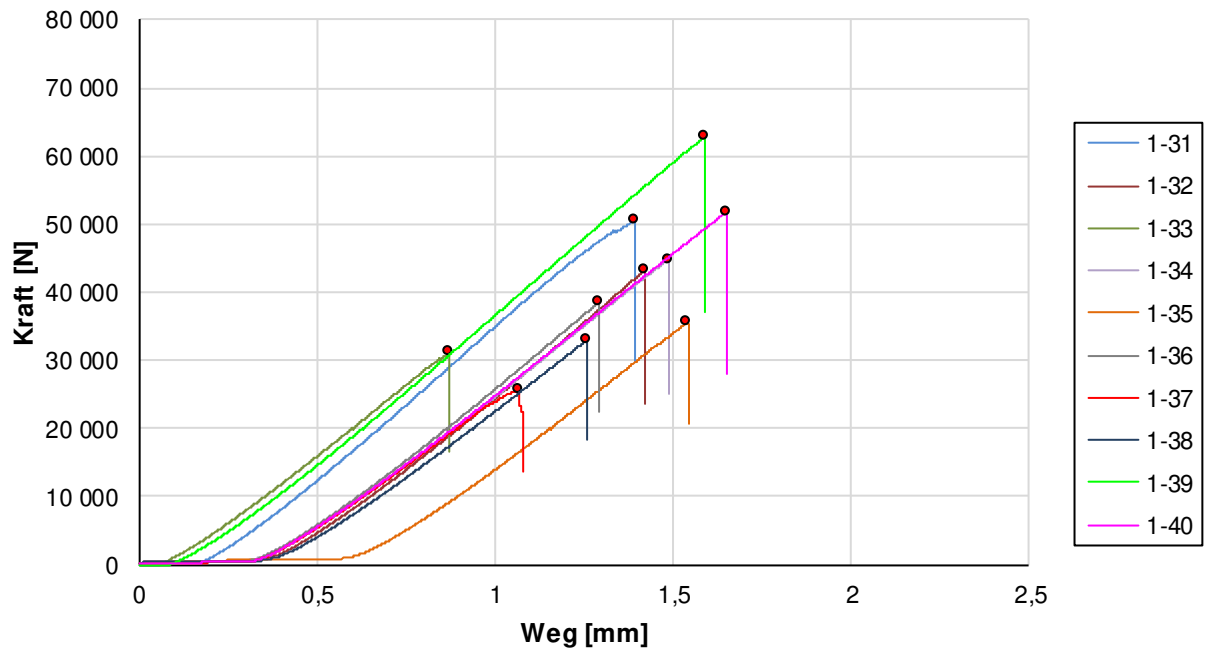


Abbildung 4-19 Kraft-Verformungskurven 1-31 bis 1-40

## Prüfsreihe 2: 2-01 bis 11

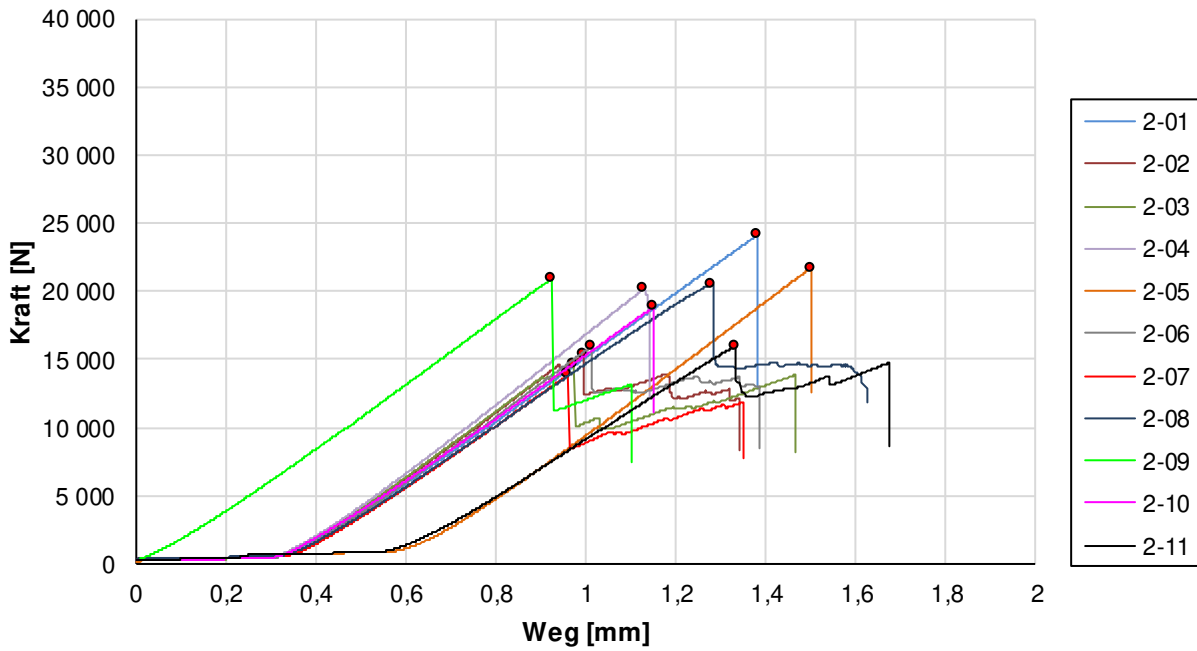


Abbildung 4-20 Kraft-Verformungskurven 2-01 bis 2-11

## Prüfsreihe 2: 2-12 bis 21

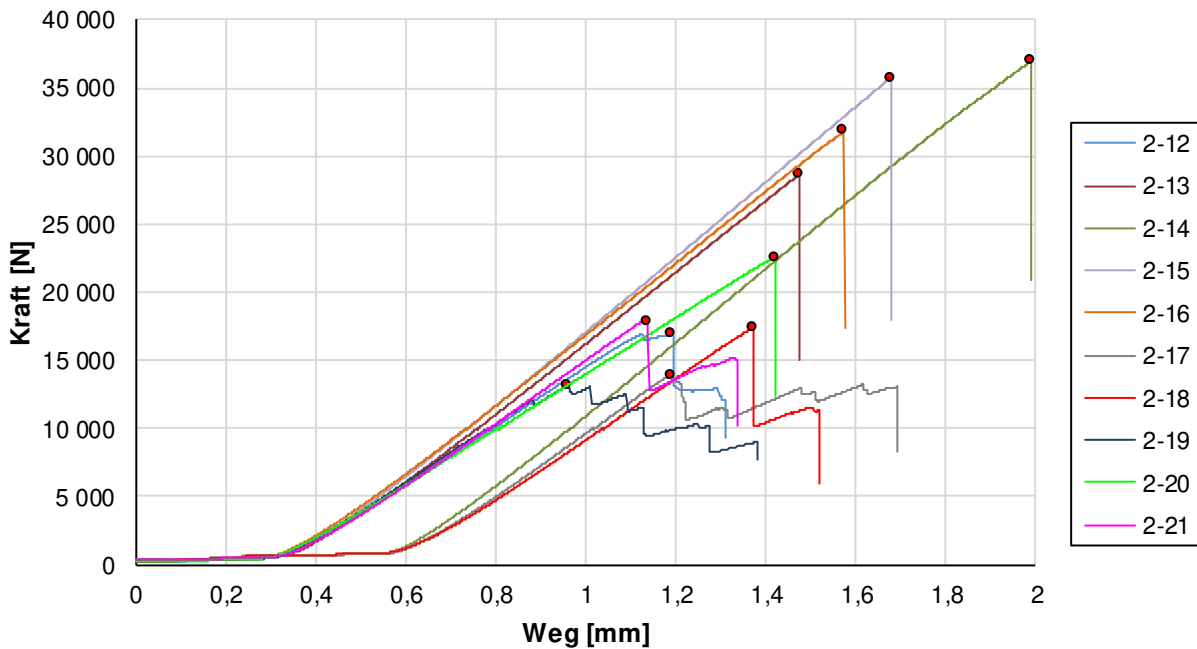


Abbildung 4-21 Kraft-Verformungskurven 2-12 bis 2-21

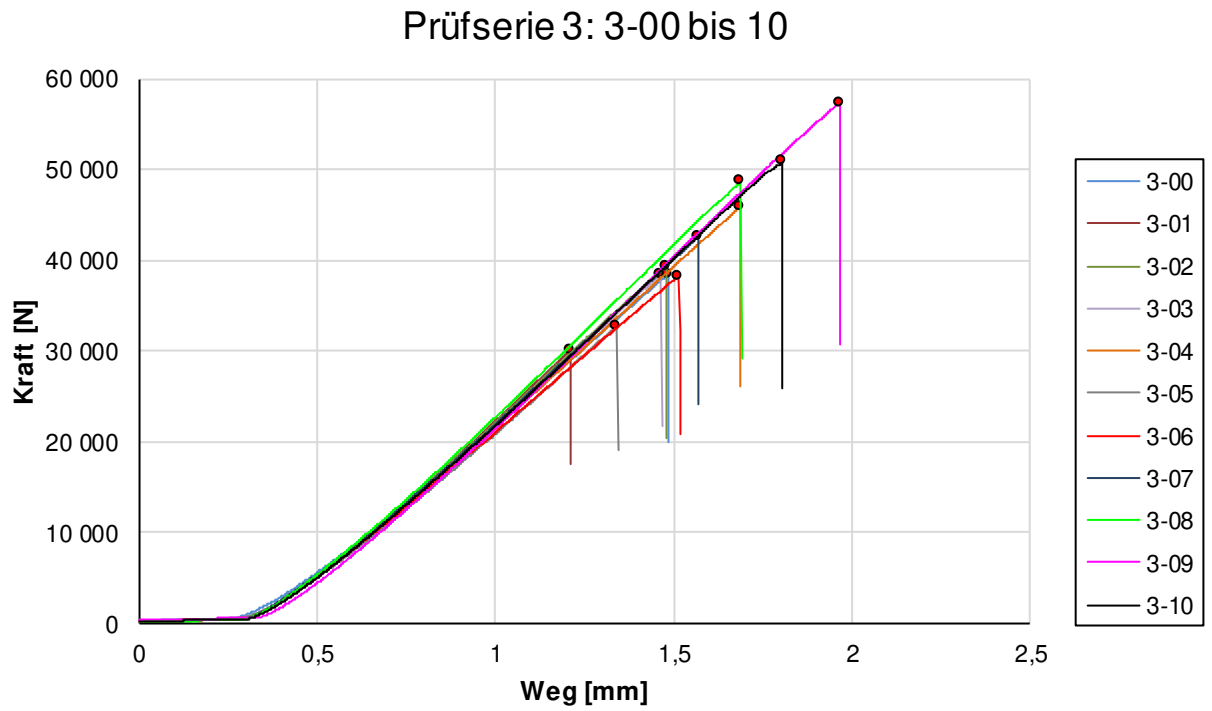


Abbildung 4-22 Kraft-Verformungskurven 3-00 bis 3-10

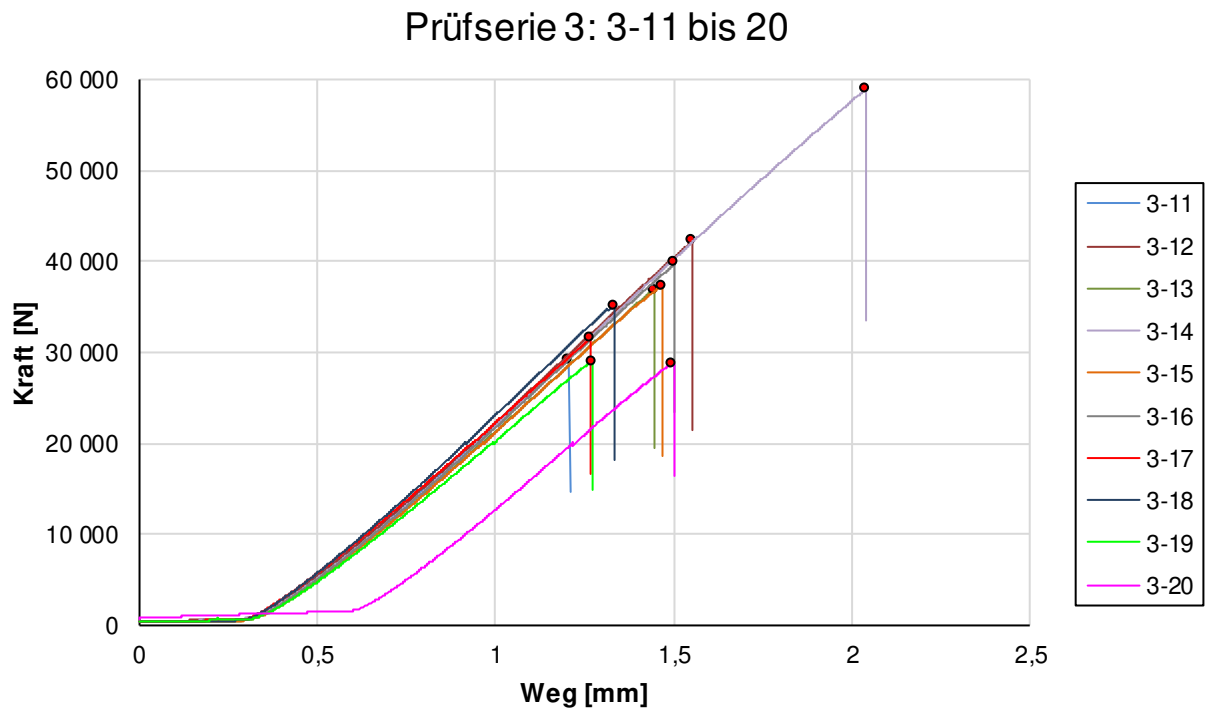


Abbildung 4-23 Kraft-Verformungskurven 3-11 bis 3-20



## Prüfsreihe 4: 4-01 bis 11

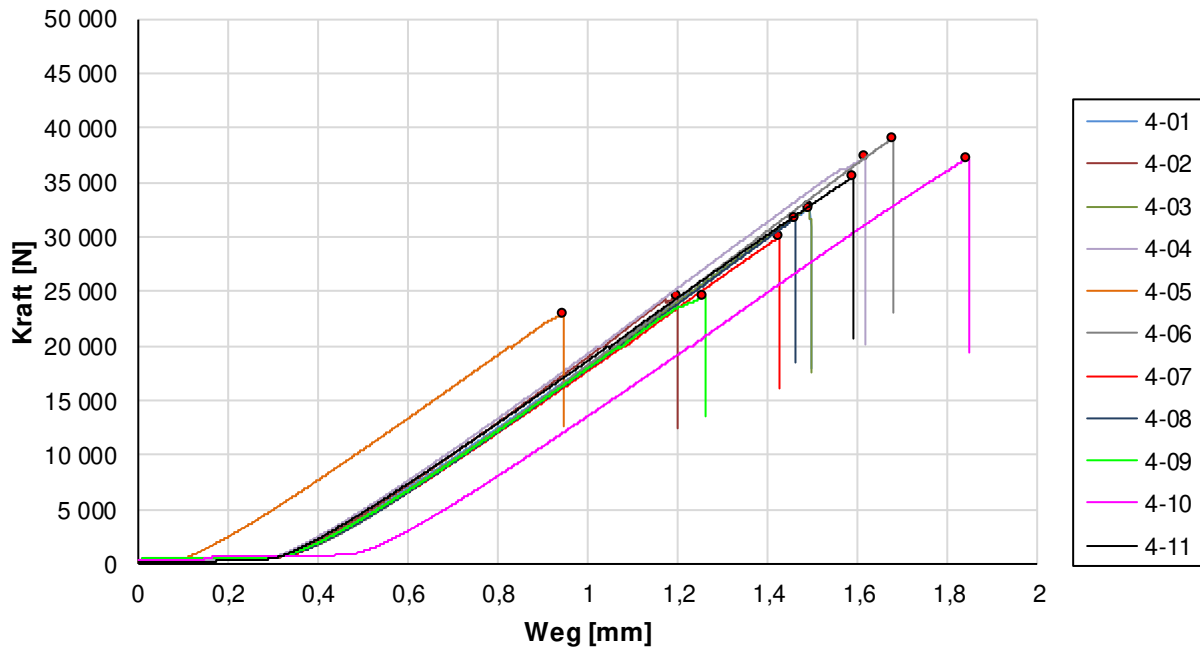


Abbildung 4-24 Kraft-Verformungskurven 4-01 bis 4-11

## Prüfsreihe 4: 4-12 bis 21

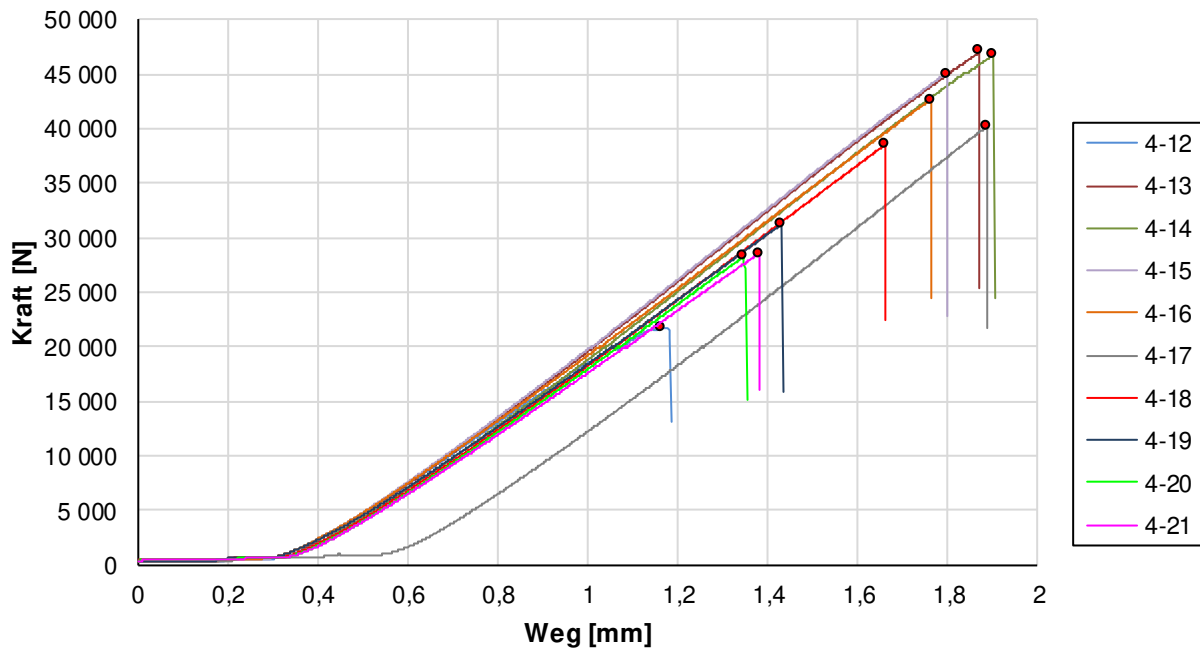


Abbildung 4-25 Kraft-Verformungskurven 4-12 bis 4-21

### Prüfserie 5: 5-01 bis 11

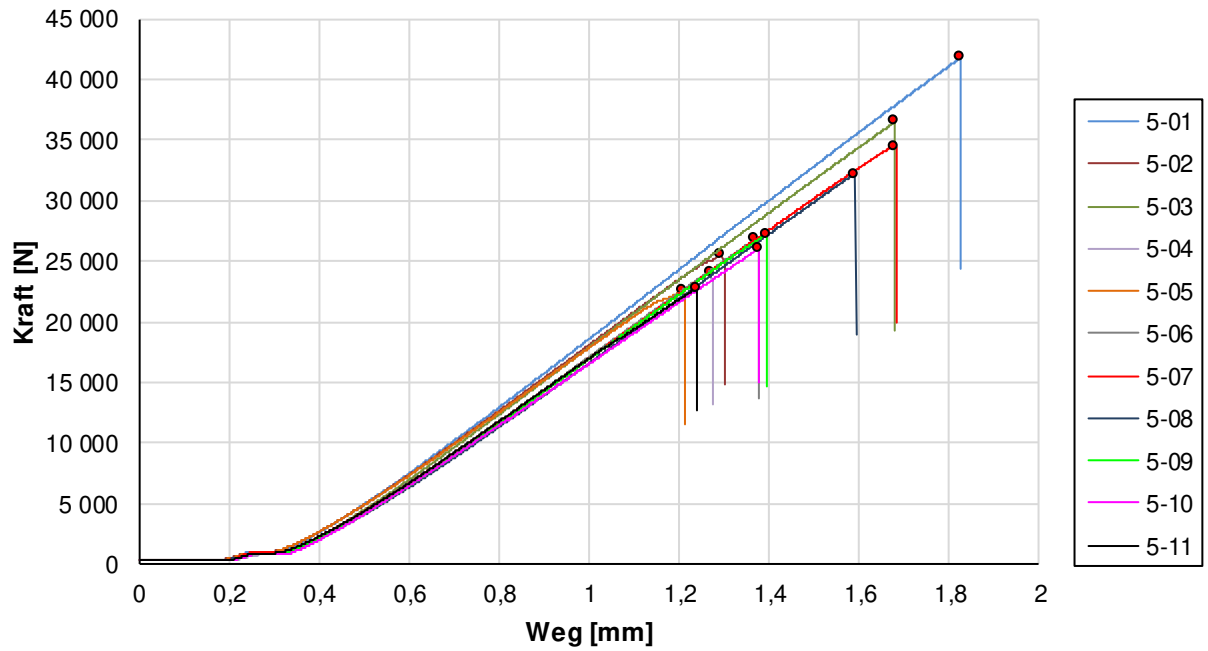


Abbildung 4-26 Kraft-Verformungskurven 5-01 bis 5-11

### Prüfserie 5: 5-12 bis 21

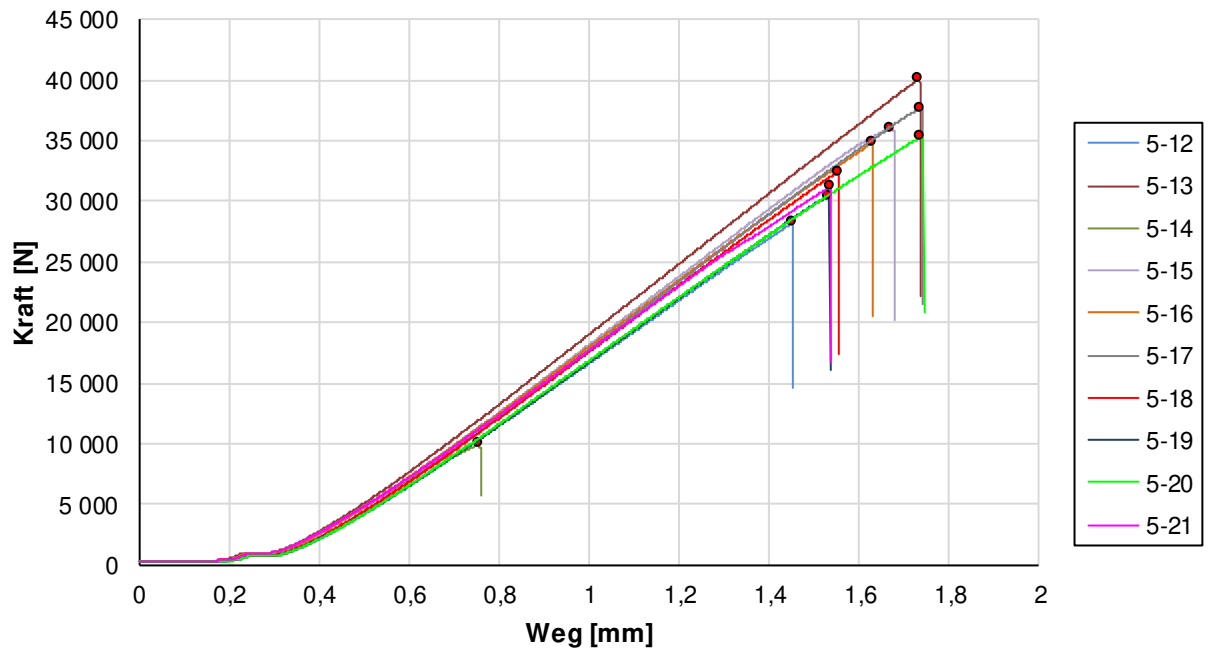


Abbildung 4-27 Kraft-Verformungskurven 5-12 bis 5-21

### Prüfserie 6: 6-00 bis 10

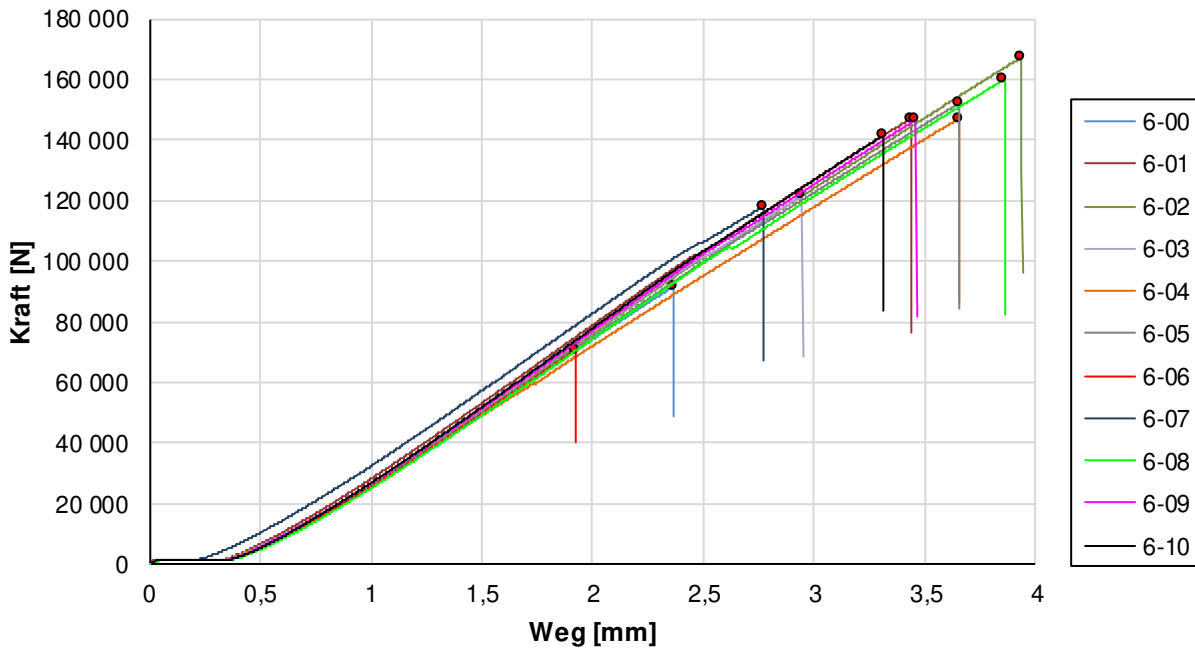


Abbildung 4-28 Kraft-Verformungskurven 6-00 bis 6-10

### Prüfserie 6: 6-11 bis 20

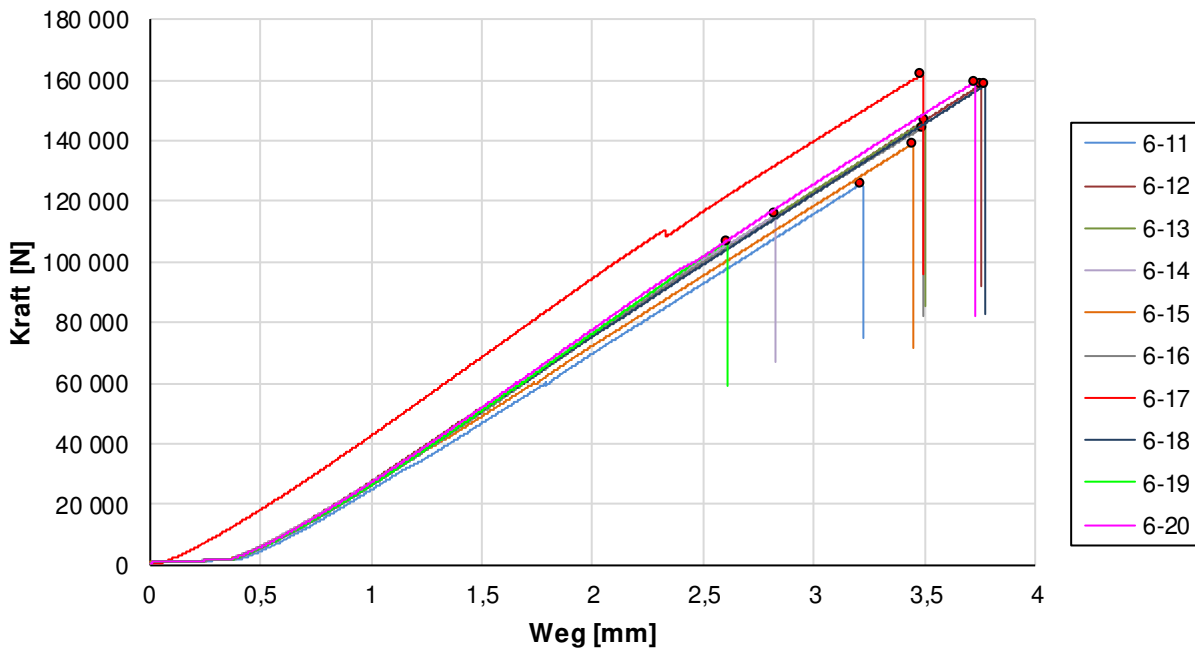


Abbildung 4-29 Kraft-Verformungskurven 6-11 bis 6-20

### Prüfserie 7: 7-01 bis 10

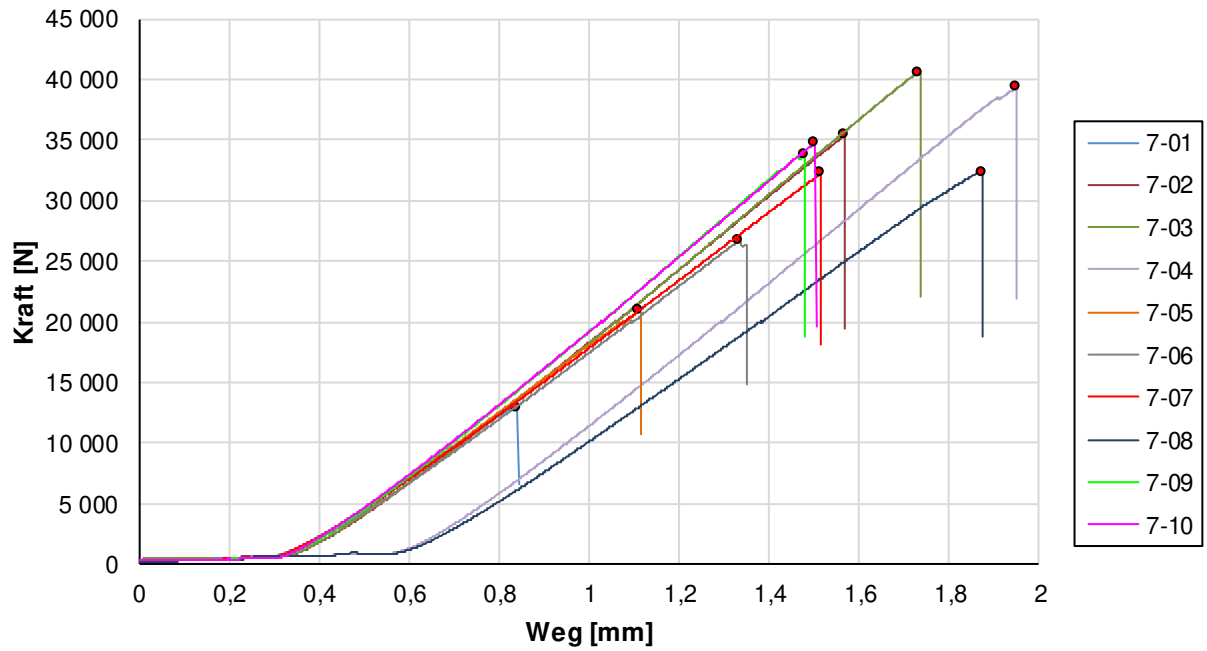


Abbildung 4-30 Kraft-Verformungskurven 7-01 bis 7-10

### Prüfserie 7: 7-11 bis 20

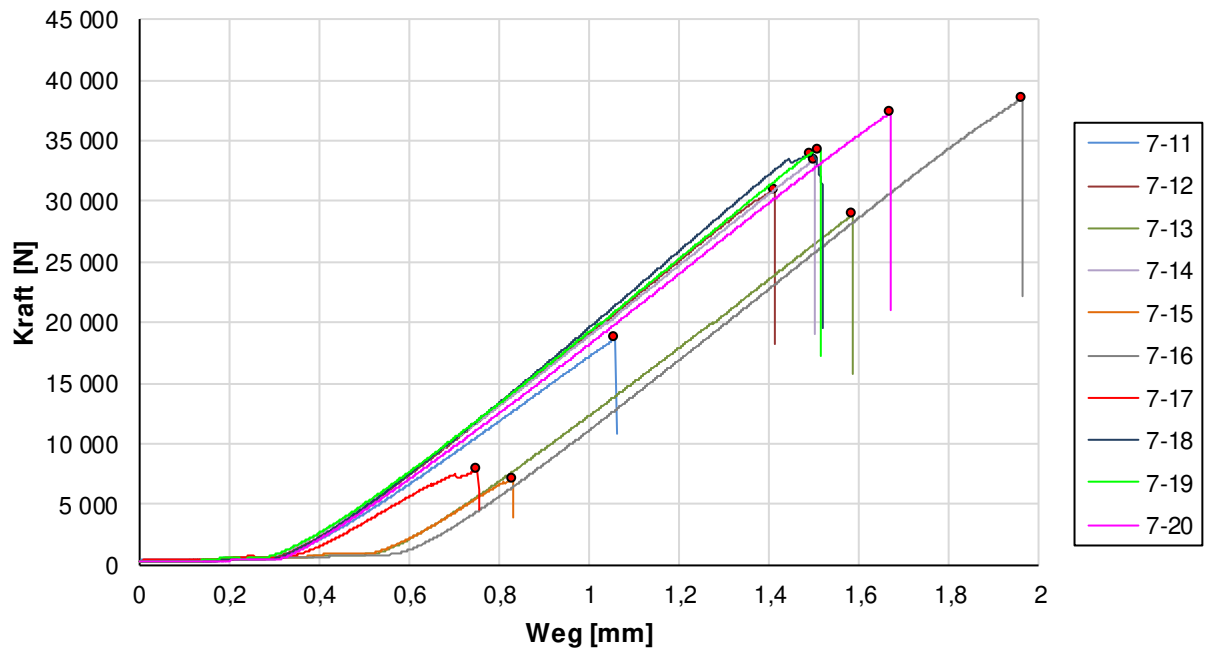


Abbildung 4-31 Kraft-Verformungskurven 7-11 bis 7-20

## B-4 Prüfkörperselektion

### B-4.1 Serie 3 (3sCL)

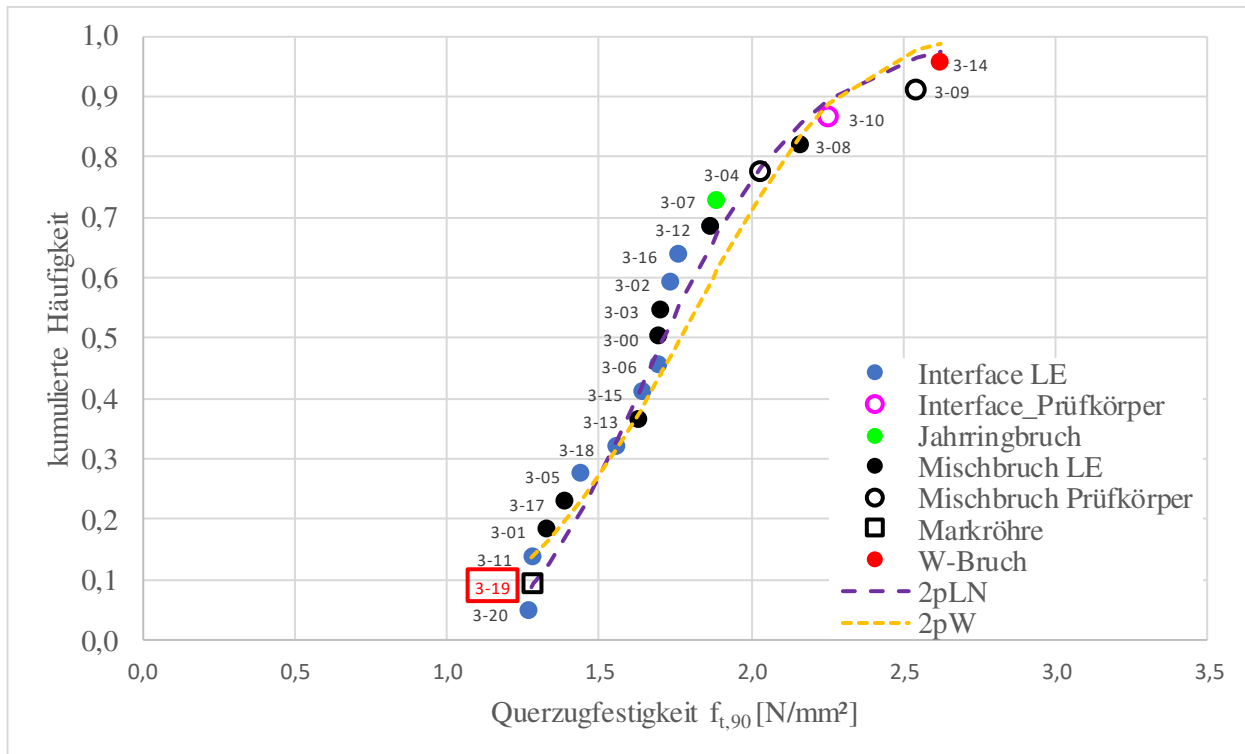


Abbildung 4-32 empirische Verteilung mit Ausreißer Serie 3 (3sCL)



Abbildung 4-33 Ausreißerelimination Prüfkörper 3-19

B-4.2 Serie 5(7sCL)

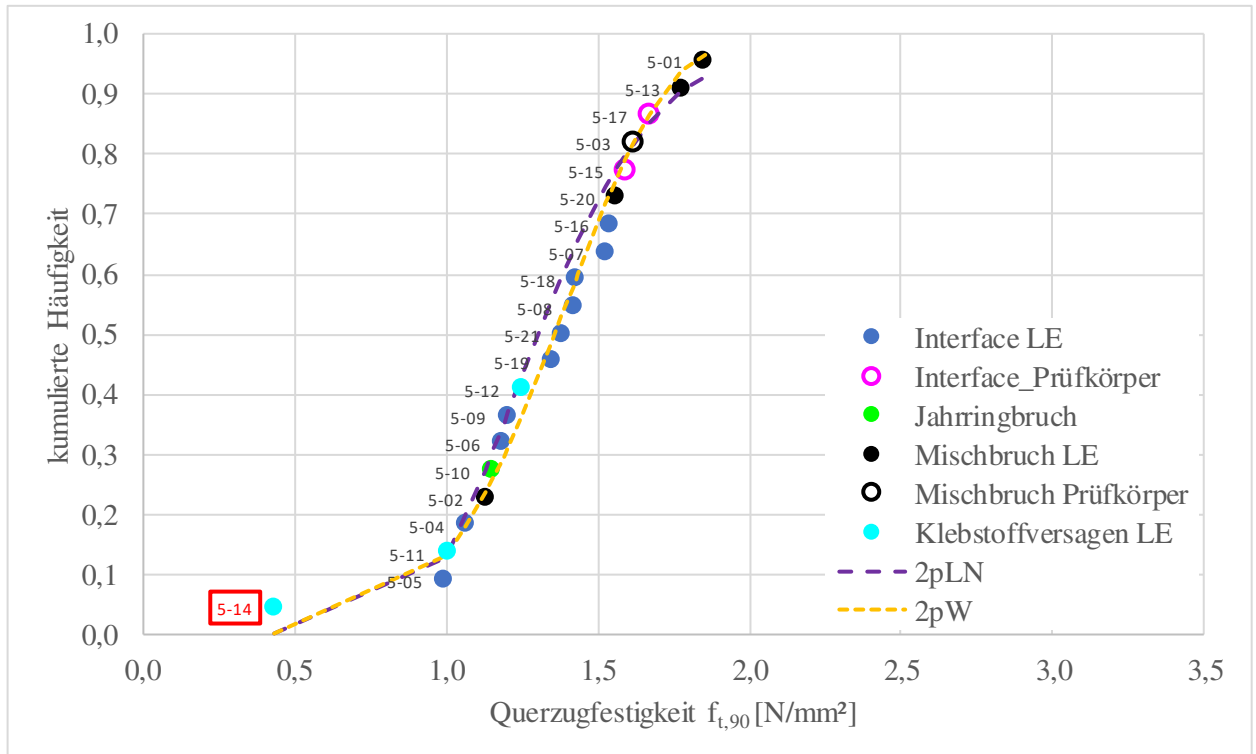


Abbildung 4-34 empirische Verteilung mit Ausreißer Serie 5 (7sCL)



Abbildung 4-35 Ausreißerelimination Prüfkörper 5-14

B-4.3 Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)

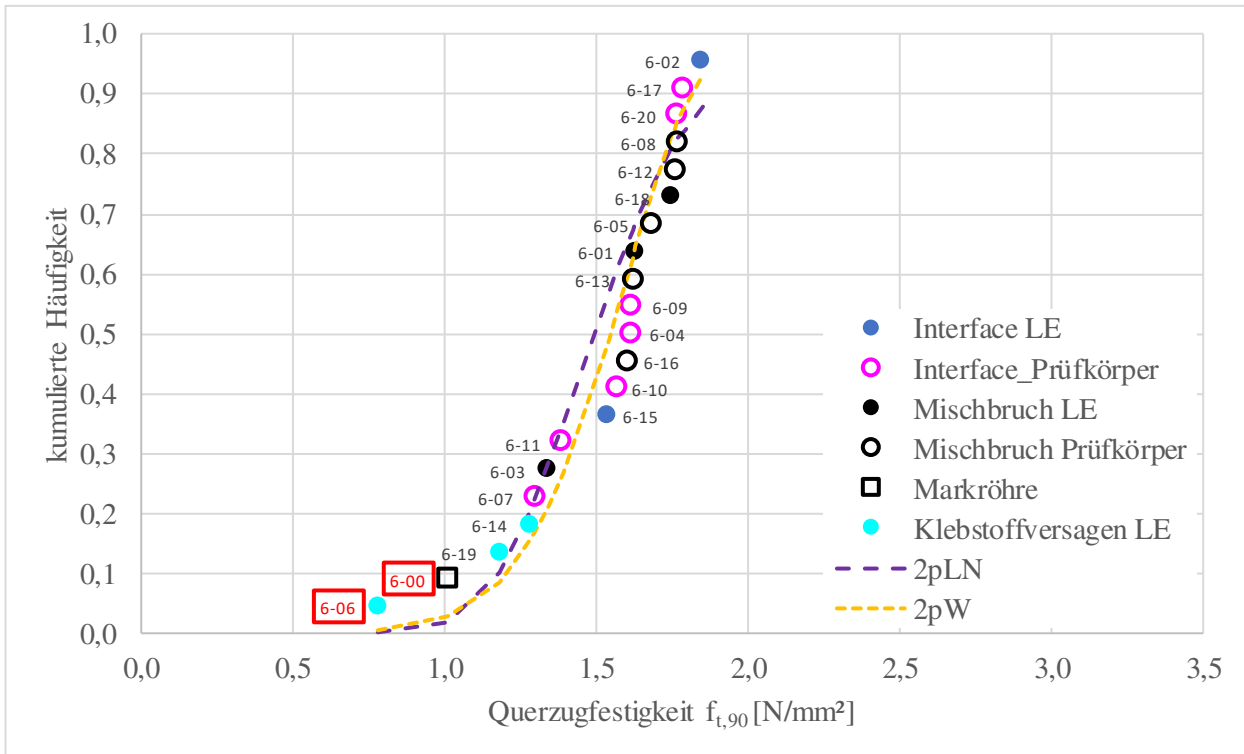


Abbildung 4-36 empirische Verteilung mit Ausreißer Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)

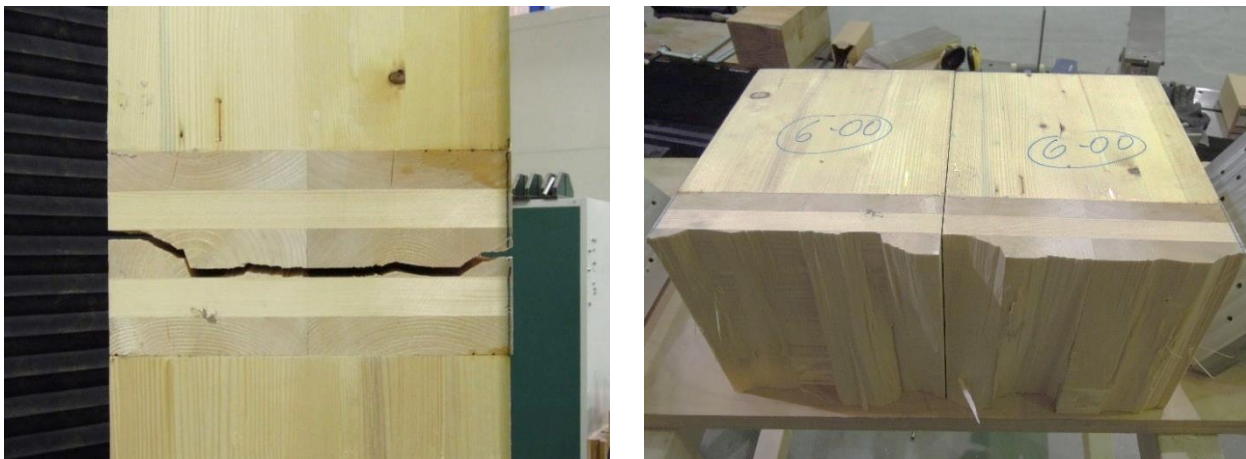


Abbildung 4-37 Ausreißerelimination Prüfkörper 6-00





Abbildung 4-38 Ausreißerelimination Prüfkörper 6-06

B-4.4 Serie 7 (5sVL)

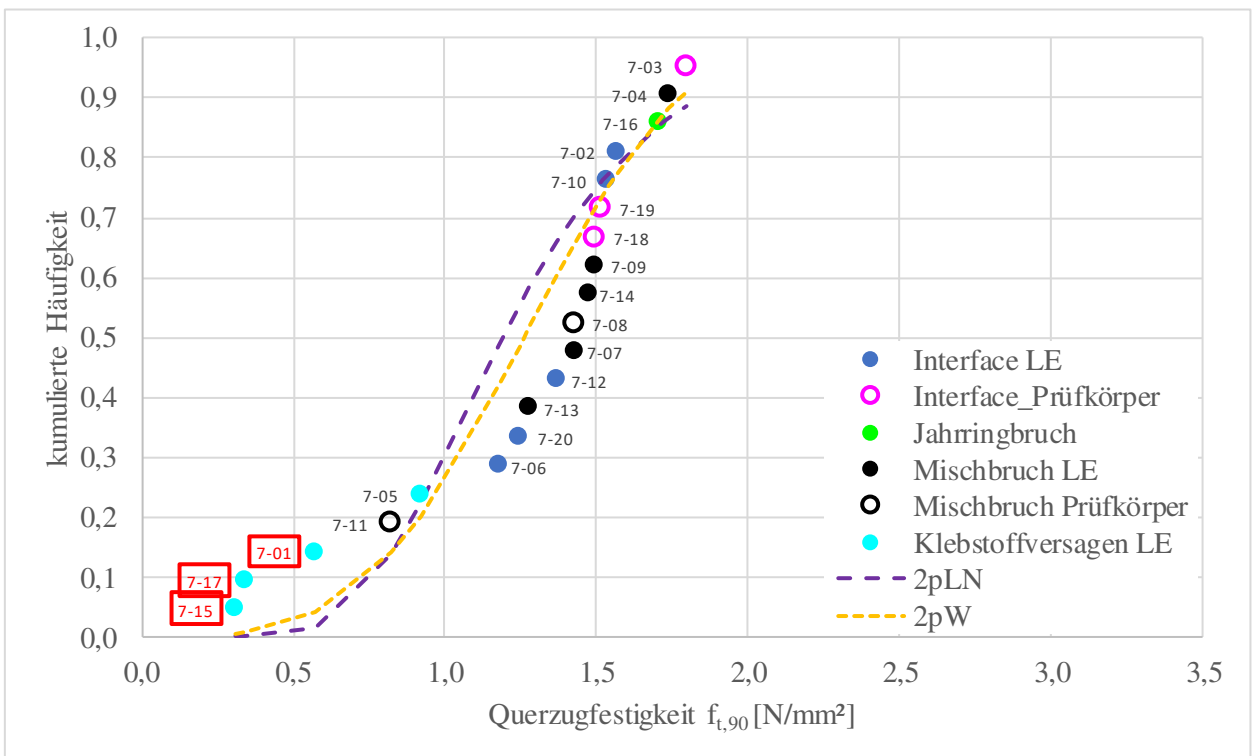


Abbildung 4-39 empirische Verteilung mit Ausreißer Serie 7 (5sCL)



Abbildung 4-40 Ausreißerelimination Prüfkörper 7-01



Abbildung 4-41 Ausreißerelimination Prüfkörper 7-15

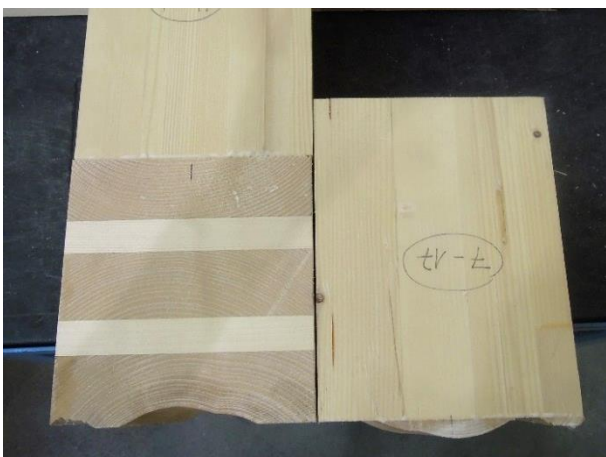


Abbildung 4-42 Ausreißerelimination Prüfkörper 7-17

## B-5 Subserienanalyse

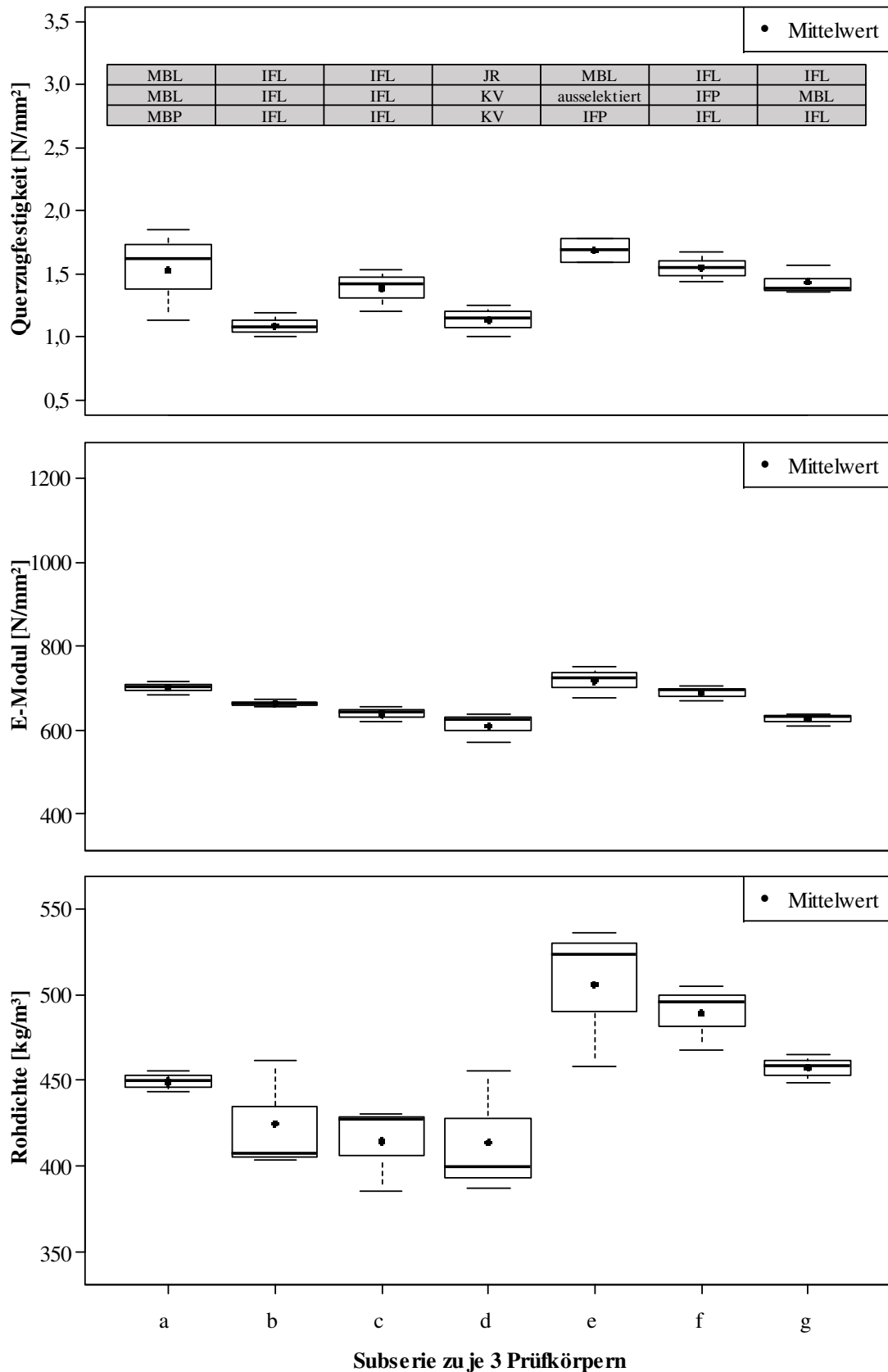
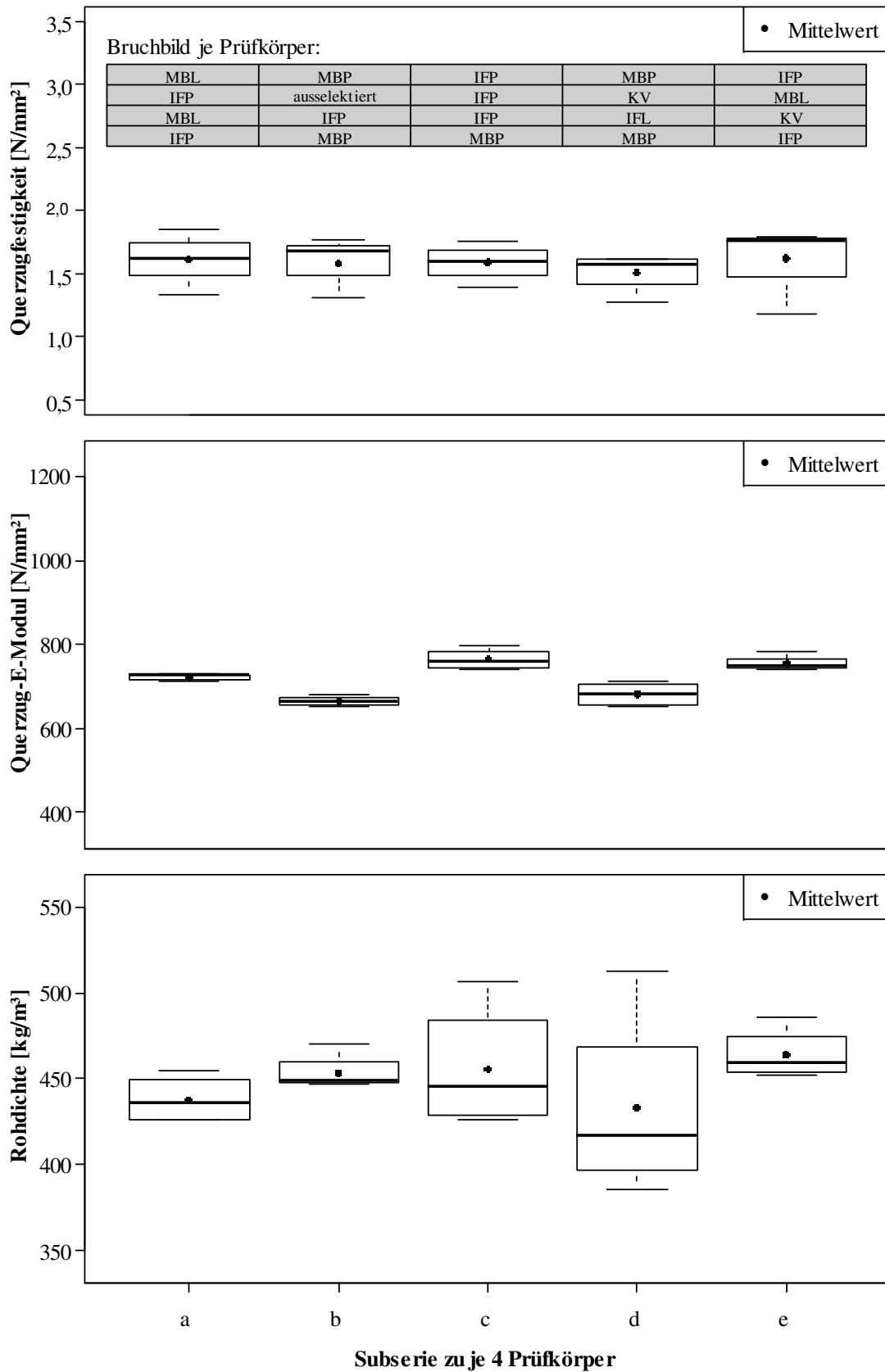


Abbildung 4-43 *Boxplots der Subserien Serie 5 (7sGL)*


 Abbildung 4-44 Boxplots der Subserien Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)

## B-6 Regressionsanalyse

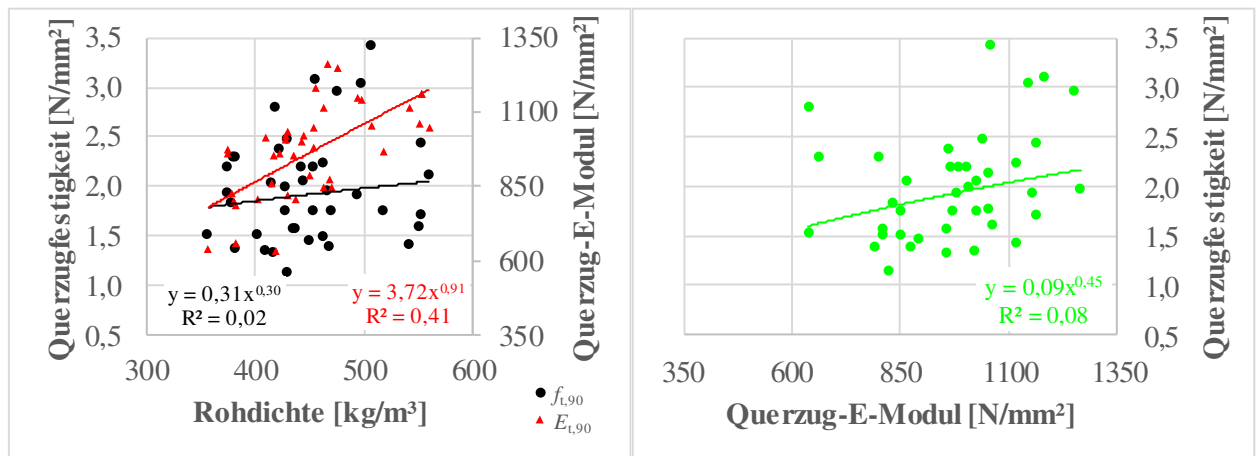


Abbildung 4-45 Regressionsplot Serie 1 (1s)  
(links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

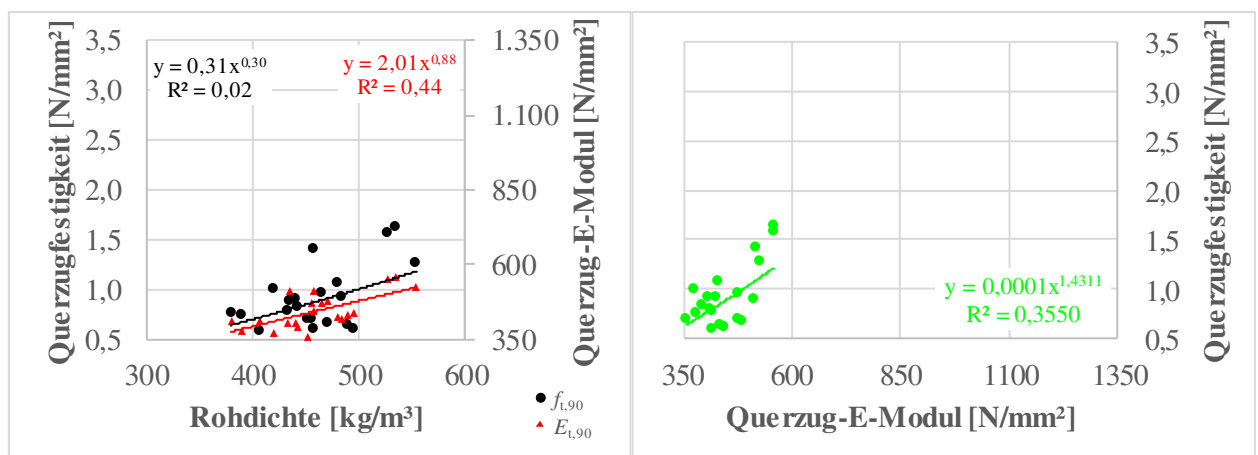


Abbildung 4-46 Regressionsplot Serie 2 (5sGL)  
(links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

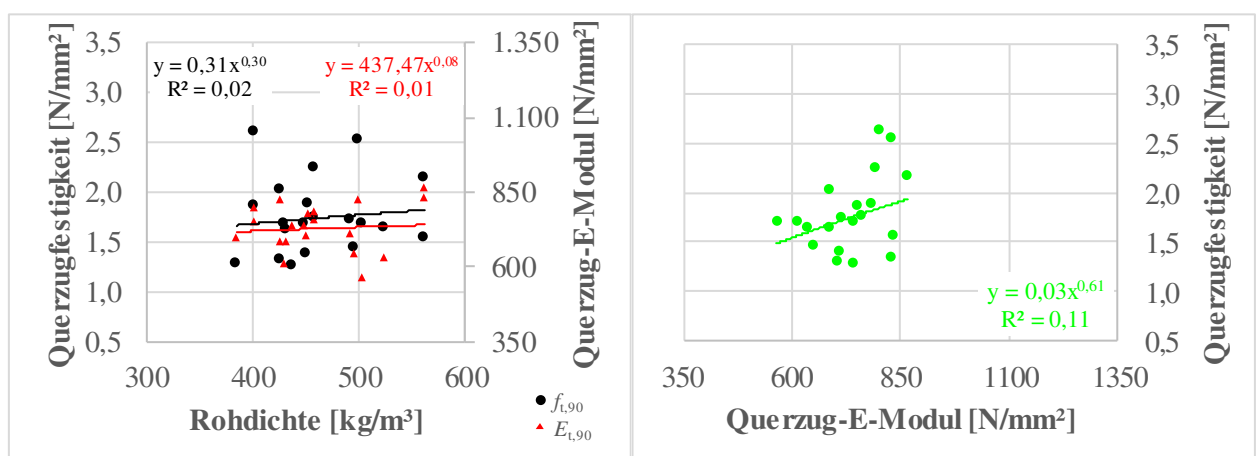


Abbildung 4-47 Regressionsplot Serie 3 (3sGL)  
(links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

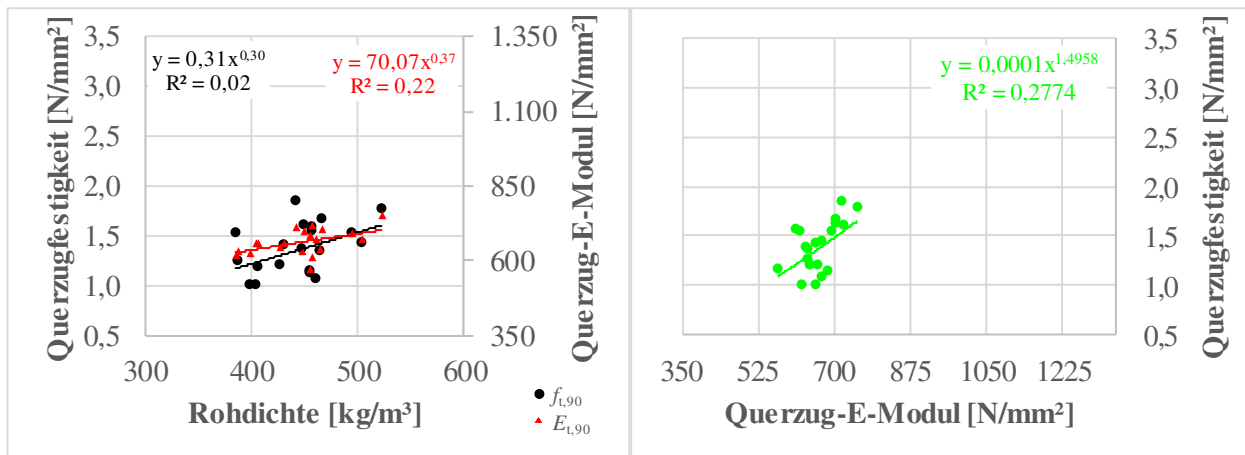


Abbildung 4-48 **Regressionsplot Serie 5 (7sGL)**  
 (links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

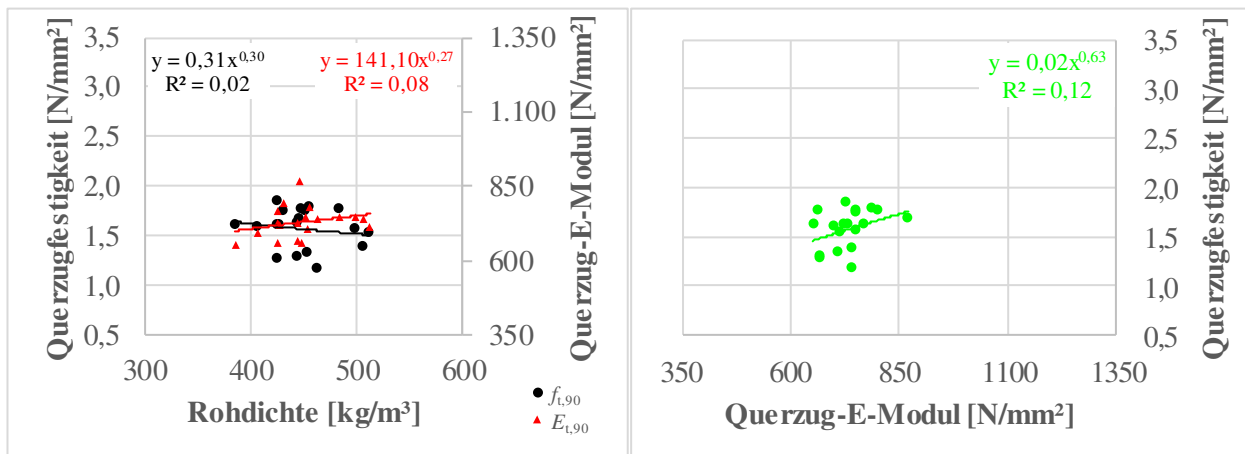


Abbildung 4-49 **Regressionsplot Serie 6 (5sGL300<sup>2</sup>)**  
 (links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )

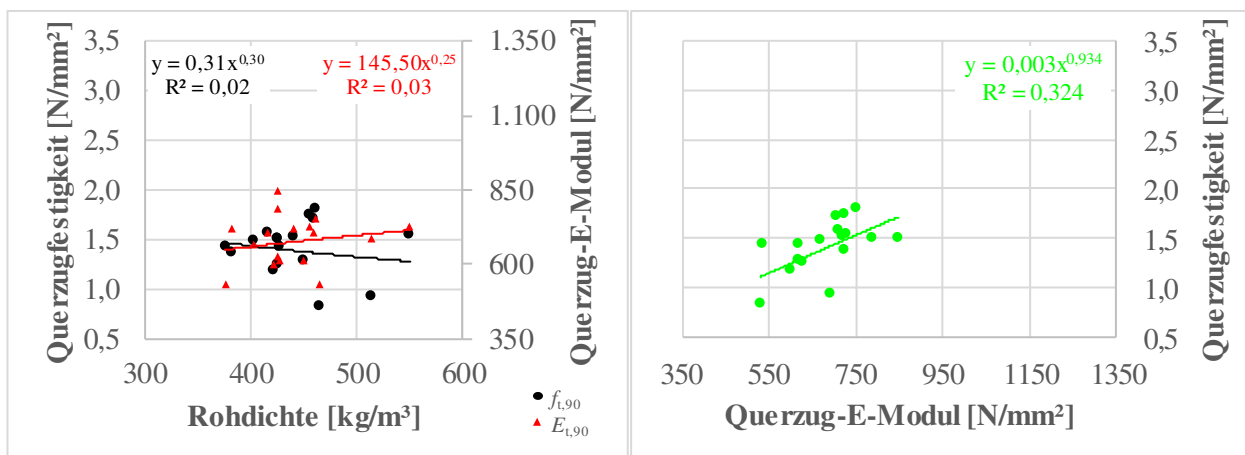


Abbildung 4-50 **Regressionsplot Serie 7 (5sVL)**  
 (links:  $f_{t,90}$  und  $E_{t,90}$  versus  $\rho$ ; rechts:  $f_{t,90}$  versus  $E_{t,90}$ )



## B-7 Einzelauswertungen

**Tabelle 30 Einzelauswertungen Serie 1 (1s)**

Anzahl	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
Min	25549,0	1,14	1,13	638	520	789	239	13,1%	356	
Max	77263,5	3,43	3,43	1264	1.117	1.708	562	15,1%	560	
Mittelwert	<b>44718,4</b>	<b>1,99</b>	<b>1,98</b>	<b>969</b>	<b>811</b>	<b>1.219</b>	<b>382</b>	<b>14,2%</b>	<b>450</b>	
Median	43427,9	1,93	1,92	980	807,9	1254,4	388,1	14,3%	444,0	
Stabw.	12143,6	0,540	0,540	156,764	147	210	72,9	0,55%	54	
COV [%]	27,2%	27,2%	27,2%	16,2%	18,13%	17,18%	19,11%	3,88%	12,09%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. kor. EG $f_{t,90,korr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirn $E_{t,90,l,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,l,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh kor. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
1-01	77.263,5	3,43	3,43	1.055	902	1.270	562	13,7%	507,04	IFL
1-02	68.441,9	3,04	3,04	1.143	1.029	1.284	513	13,5%	497,28	IFL
1-03	30.457,6	1,35	1,35	1.018	818	1.347	298	13,4%	410,26	WB
1-04	53.550,9	2,38	2,37	962	733	1.398	426	13,2%	422,20	IFL
1-05	39.528,4	1,76	1,75	850	657	1.203	400	14,3%	470,77	JB
1-06	31.505,6	1,40	1,39	875	736	1.079	304	14,5%	468,22	IFL
1-07	54.775,7	2,43	2,43	1.163	971	1.449	433	14,6%	552,52	IFL
1-08	69.561,3	3,09	3,09	1.181	999	1.445	523	13,9%	455,02	JB
1-09	55.995,8	2,49	2,48	1.036	851	1.323	440	13,7%	430,63	WB
1-10	35.445,8	1,58	1,57	811	646	1.087	332	13,9%	437,31	MBL
1-11	41.349,1	1,84	1,83	830	683	1.058	297	13,1%	377,98	MBL
1-12	49.341,3	2,19	2,19	1.002	815	1.299	464	14,7%	443,64	MBL
1-13	34.109,5	1,52	1,51	808	713	933	395	14,4%	403,12	IFL
1-14	45.950,9	2,04	2,04	866	702	1.128	387	14,7%	415,12	IFL
1-15	39.530,0	1,76	1,75	968	799	1.230	298	14,2%	517,64	MBL
1-16	51.822,5	2,30	2,30	661	567	792	346	14,7%	381,85	IFL
1-17	34.296,1	1,52	1,52	639	520	830	390	14,7%	356,47	MBL
1-18	47.853,5	2,13	2,12	1.051	918	1.228	396	14,0%	560,36	IFL
1-19	30.070,4	1,34	1,33	954	755	1.293	309	13,4%	416,74	IFL
1-20	39.496,3	1,76	1,75	1.022	860	1.259	275	13,1%	428,57	MBL
1-21	32.176,8	1,43	1,42	1.119	935	1.393	393	14,8%	541,87	IFL
1-22	46.174,6	2,05	2,05	1.023	838	1.312	389	14,7%	444,43	WB
1-23	44.214,5	1,97	1,96	1.264	1.117	1.455	373	14,8%	466,71	IFL
1-24	36.221,2	1,61	1,60	1.063	987	1.152	340	14,7%	551,63	IFL
1-25	49.370,0	2,19	2,19	984	691	1.708	397	15,1%	454,02	MBL
1-26	49.318,4	2,19	2,19	964	784	1.249	411	13,7%	375,24	IFL
1-27	66.761,8	2,97	2,96	1.251	1.081	1.486	540	13,6%	475,23	IFL
1-28	33.833,6	1,50	1,50	849	714	1.047	325	14,2%	463,19	MBL
1-29	43.637,0	1,94	1,93	976	736	1.449	433	13,6%	373,96	IFL
1-30	39.671,6	1,76	1,76	1.051	877	1.310	349	14,4%	453,29	WB
1-31	50.584,9	2,25	2,24	1.116	968	1.317	366	14,5%	463,18	MBL
1-32	43.218,8	1,92	1,92	1.153	938	1.495	371	14,0%	493,82	WB
1-33	31.170,4	1,39	1,38	791	687	931	239	14,3%	382,88	MBL
1-34	44.825,4	1,99	1,99	1.007	883	1.170	383	14,8%	427,73	IFL
1-35	35.533,2	1,58	1,57	957	800	1.191	393	13,7%	435,35	MBL
1-36	38.573,4	1,71	1,71	1.161	995	1.393	334	14,6%	552,36	IFL
1-37	25.549,0	1,14	1,13	822	689	1.016	281	14,2%	429,05	WB
1-38	32.974,8	1,47	1,46	891	859	927	326	14,8%	450,44	WB
1-39	62.805,9	2,79	2,79	638	536	789	406	13,8%	419,34	MBL
1-40	51.775,2	2,30	2,30	800	645	1.052	428	14,6%	380,47	MBL



**Tabelle 31 Einzelauswertungen Serie 2 (5sGL)**

Anzahl	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Min	13156,4	0,58	0,58	356	336	349	149	13,4%	379	
Max	36984,5	1,64	1,64	557	537	581	509	14,8%	535	
Mittelwert	<b>20819,7</b>	<b>0,93</b>	<b>0,92</b>	<b>448</b>	<b>432</b>	<b>465</b>	<b>316</b>	<b>14,3%</b>	<b>460</b>	
Median	18879,5	0,84	0,83	434	421,1	445,2	314,0	14,4%	463	
Stabw.	7056,3	0,314	0,314	58,751	54	66	87,7	0,40%	36	
COV [%]	33,9%	33,9%	34,1%	13,1%	12,61%	14,08%	27,70%	2,80%	7,91%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,korr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirn $E_{t,90,1,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,1,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
2-01	24.153,8	1,07	1,07	429	421	437	359	14,0%	479,31	MBL
2-02	15.308,1	0,68	0,67	481	473	490	262	14,5%	470,91	IFL
2-03	14.568,8	0,65	0,64	434	424	445	149	14,6%	489,97	IFL
2-04	20.240,7	0,90	0,89	510	488	535	294	13,6%	439,70	MBP
2-05	21.752,7	0,97	0,96	475	452	499	389	14,4%	465,59	MBL
2-06	15.919,5	0,71	0,70	474	456	492	176	14,6%	455,94	IFL
2-07	13.870,3	0,62	0,61	441	430	452	259	14,0%	495,01	MBL
2-08	20.547,3	0,91	0,91	407	384	432	332	14,6%	482,99	IFP
2-09	20.940,0	0,93	0,92	422	403	444	164	14,3%	484,23	MBL
2-10	18.879,5	0,84	0,83	390	385	396	301	13,4%	463,09	MBP
2-11	15.902,2	0,71	0,70	356	336	379	345	14,0%	450,93	IFL
2-12	16.961,3	0,75	0,75	377	365	390	311	14,6%	390,07	IFL
2-13	28.706,1	1,28	1,27	526	503	552	379	14,4%	499,95	IFP
2-14	36.984,5	1,64	1,64	557	535	581	509	14,5%	534,52	IFL
2-15	35.757,4	1,59	1,58	554	537	572	426	14,6%	485,62	IFP
2-16	31.857,8	1,42	1,41	514	476	558	403	14,5%	457,79	MBL
2-17	13.868,9	0,62	0,61	443	421	468	314	13,9%	457,70	MBL
2-18	17.402,0	0,77	0,77	414	406	422	353	14,8%	379,32	KV
2-19	13.156,4	0,58	0,58	416	394	440	259	13,5%	419,82	MBP
2-20	22.553,6	1,00	1,00	374	403	349	365	14,2%	432,74	MBL
2-21	17.882,7	0,79	0,79	407	382	436	296	14,3%	433,61	IFL

**Tabelle 32 Einzelauswertungen Serie 3 (3sCL)**

Anzahl	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Min	28801,8	1,28	1,27	563	525	607	206	13,3%	384	
Max	59123,8	2,63	2,62	864	808	928	330	15,2%	561	
Mittelwert	<b>40144,2</b>	<b>1,78</b>	<b>1,78</b>	<b>733</b>	<b>688</b>	<b>786</b>	<b>254</b>	<b>14,3%</b>	<b>461</b>	
Median	38460,8	1,71	1,70	740	686,4	807,2	248,3	14,4%	451,5	
Stabw.	8659,6	0,385	0,385	80,370	76	90	33,2	0,52%	50	
COV [%]	21,6%	21,6%	21,6%	11,0%	11,06%	11,46%	13,06%	3,67%	10,84%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,korr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirn $E_{t,90,1,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,1,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
3-01	30.131,6	1,34	1,33	826	768	894	208	13,5%	426	MBL
3-02	39.288,7	1,75	1,74	712	663	769	246	14,5%	491	IFL
3-03	38.475,7	1,71	1,70	742	687	805	244	13,3%	448	MBL
3-04	45.867,3	2,04	2,03	685	622	763	276	13,8%	425	MBP
3-05	32.649,4	1,45	1,45	650	626	675	236	14,3%	495	IFL
3-06	38.320,5	1,70	1,70	563	525	607	253	13,8%	503	IFL
3-07	42.643,0	1,90	1,89	781	753	812	258	13,7%	452	JB
3-08	48.806,7	2,17	2,16	864	808	928	279	14,4%	561	MBL
3-09	57.365,8	2,55	2,54	827	772	891	323	14,1%	498	MBP
3-10	50.865,8	2,26	2,25	789	735	852	295	14,1%	457	IFP
3-11	29.119,9	1,29	1,29	703	688	718	206	14,5%	384	IFL
3-12	42.282,9	1,88	1,87	751	685	830	255	13,9%	400	MBL
3-13	36.939,6	1,64	1,64	685	630	751	240	14,6%	430	MBL
3-14	59.123,8	2,63	2,62	801	738	877	330	15,2%	402	WB
3-15	37.273,4	1,66	1,65	633	618	649	245	14,7%	523	IFL
3-16	39.817,2	1,77	1,76	758	712	809	250	14,9%	458	IFL
3-17	31.506,1	1,40	1,39	710	682	739	213	14,4%	451	MBL
3-18	35.159,6	1,56	1,56	832	808	859	229	14,0%	560	IFL
3-19	28.969,7	1,29	1,28	576	559	595	213	13,1%	365	MR
3-20	28.801,8	1,28	1,27	739	665	832	248	15,1%	436	IFL
3-00	38.445,9	1,71	1,70	611	569	660	249	14,7%	429	IFL

**Tabelle 33 Einzelauswertungen Serie 4 (5sGL)**

Anzahl	21	21	21	21	21	21	21	21	21	
Min	21772,3	0,97	0,96	582	570	598	175	13,7%	379	
Max	47088,2	2,09	2,09	814	791	839	473	14,8%	550	
Mittelwert	<b>34207,8</b>	<b>1,52</b>	<b>1,51</b>	<b>681</b>	<b>669</b>	<b>697</b>	<b>265</b>	<b>14,3%</b>	<b>472</b>	
Median	32706,9	1,45	1,45	680	671,4	681,7	250,1	14,4%	473,9	
Stabw.	7703,1	0,342	0,342	65,599	63	68	60,1	0,3%	43,1	
COV [%]	22,5%	22,5%	22,6%	9,6%	9,46%	9,76%	22,66%	2,26%	9,13%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,corr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirn $E_{t,90,l,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,l,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
4-01	32.706,9	1,45	1,45	657	656	663	248	14,7%	478,83	IFL
4-02	24.586,9	1,09	1,09	700	685	720	217	14,4%	479,18	MBL
4-03	32.678,6	1,45	1,45	656	647	671	250	14,6%	496,19	IFL
4-04	37.259,7	1,66	1,65	716	700	738	265	13,9%	460,73	IFP
4-05	22.838,7	1,02	1,01	725	714	742	175	14,5%	476,55	IFL
4-06	39.086,2	1,74	1,73	715	699	735	279	14,5%	468,79	MBL
4-07	30.001,1	1,33	1,33	592	584	604	238	14,3%	495,90	IFL
4-08	31.743,5	1,41	1,40	634	618	654	250	14,1%	485,39	IFL
4-09	24.512,2	1,09	1,08	639	626	659	221	14,4%	500,31	IFL
4-10	37.199,6	1,65	1,65	582	570	598	302	13,8%	473,95	MBL
4-11	35.522,5	1,58	1,57	600	590	616	269	13,7%	453,37	IFP
4-12	21.772,3	0,97	0,96	680	671	682	199	14,5%	430,45	KV
4-13	47.088,2	2,09	2,09	814	791	839	473	14,5%	550,17	WB
4-14	46.816,0	2,08	2,07	781	756	812	316	14,8%	533,08	IFL
4-15	45.061,1	2,00	2,00	782	770	798	300	14,7%	544,31	MBL
4-16	42.667,3	1,90	1,89	701	687	719	289	13,8%	379,30	IFL
4-17	40.186,2	1,79	1,78	752	745	761	306	14,4%	460,09	IFP
4-18	38.500,5	1,71	1,71	685	680	692	277	14,2%	387,76	MBL
4-19	31.338,9	1,39	1,39	646	628	669	242	14,1%	440,85	MBL
4-20	28.278,6	1,26	1,25	640	632	653	226	14,2%	465,78	MBL
4-21	28.518,5	1,27	1,26	606	594	623	234	14,1%	445,41	IFL

**Tabelle 34 Einzelauswertungen Serie 5 (7sCL)**

Anzahl	20	20	20	21	21	21	21	21	21	
Min	22547,2	1,00	1,00	571	567	576	184	13,7%	385	
Max	41801,6	1,86	1,85	753	735	772	461	14,8%	536	
Mittelwert	<b>31329,4</b>	<b>1,39</b>	<b>1,39</b>	<b>664</b>	<b>658</b>	<b>673</b>	<b>381</b>	<b>14,4%</b>	<b>451</b>	
Median	31701,0	1,41	1,40	662	661,3	672,0	394,5	14,5%	455	
Stabw.	5751,4	0,256	0,256	42,651	41	47	63,0	0,28%	41	
COV [%]	18,4%	18,4%	18,4%	6,4%	6,16%	6,91%	16,53%	1,94%	9,19%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,corr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirn $E_{t,90,l,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,l,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
5-01	41.801,6	1,86	1,85	716	708	724	461	14,7%	442,80	MBL
5-02	25.579,8	1,14	1,13	684	675	697	334	14,4%	455,49	MBL
5-03	36.520,4	1,62	1,62	701	697	706	426	14,7%	449,66	MBP
5-04	24.158,2	1,07	1,07	673	658	691	329	14,0%	461,58	IFL
5-05	22.547,2	1,00	1,00	657	662	655	318	14,5%	403,97	IFL
5-06	26.841,1	1,19	1,19	662	661	664	353	14,7%	407,47	IFL
5-07	34.508,5	1,53	1,53	621	605	640	427	14,0%	384,98	IFL
5-08	32.174,9	1,43	1,42	658	647	672	411	14,2%	430,43	IFL
5-09	27.226,5	1,21	1,20	643	637	652	366	13,7%	427,16	IFL
5-10	26.080,6	1,16	1,15	571	567	576	354	14,4%	455,85	JR
5-11	22.713,9	1,01	1,00	625	631	621	321	14,8%	398,84	KV
5-12	28.259,7	1,26	1,25	637	647	627	374	14,7%	387,63	KV
5-13	40.171,6	1,79	1,78	753	735	772	441	14,5%	522,74	MBL
5-14	9.930,5	0,44	0,44	680	674	689	184	14,6%	536,35	KV
5-15	35.961,7	1,60	1,59	723	715	733	431	14,5%	458,11	IFP
5-16	34.898,7	1,55	1,54	693	668	720	416	14,4%	494,68	IFL
5-17	37.733,5	1,68	1,67	705	699	712	441	14,5%	467,64	IFP
5-18	32.383,7	1,44	1,43	671	665	678	399	14,6%	505,12	IFL
5-19	30.468,2	1,35	1,35	638	623	656	390	14,6%	465,33	IFL
5-20	35.330,7	1,57	1,56	611	603	622	442	14,6%	458,16	MBL
5-21	31.227,2	1,39	1,38	632	641	625	395	14,5%	448,74	IFL

**Tabelle 35 Einzelauswertungen Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)**

Anzahl	19	19	19	20	20	20	20	20	20	
Min	106632,1	1,18	1,18	652	622	659	217	12,9%	386	
Max	167527,3	1,86	1,85	798	773	835	551	14,7%	512	
Mittelwert	<b>143044,8</b>	<b>1,59</b>	<b>1,58</b>	<b>718</b>	<b>694</b>	<b>749</b>	<b>369</b>	<b>14,1%</b>	<b>449</b>	
Median	146753,6	1,63	1,62	725	702,3	748,3	377,3	14,2%	448	
Stabw.	17663,1	0,196	0,196	44,026	43	52	66,3	0,45%	31	
COV [%]	12,3%	12,3%	12,4%	6,1%	6,16%	6,98%	17,95%	3,19%	6,83%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,korr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirm $E_{t,90,l,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,l,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
6-01	147.318,0	1,64	1,63	729	704	760	368	13,7%	444,09	MBL
6-02	167.527,3	1,86	1,85	727	709	751	420	13,4%	425,77	MBL
6-03	121.615,5	1,35	1,34	710	712	711	321	14,1%	454,33	MBP
6-04	146.753,6	1,63	1,62	722	728	720	390	13,7%	426,44	IFL
6-05	152.052,4	1,69	1,68	652	633	701 *	390	13,8%	446,49	IFL
6-06	70.625,3	0,78	0,78	680	688	675	217	12,9%	470,20	IFL
6-07	117.747,9	1,31	1,30	666	637	703	304	14,1%	448,90	IFL
6-08	159.856,4	1,78	1,77	662	639	692	413	14,2%	448,05	IFL
6-09	146.837,5	1,63	1,62	768	734	809	376	14,0%	425,70	IFL
6-10	141.605,8	1,57	1,57	751	720	788	357	14,3%	459,82	JR
6-11	126.012,3	1,40	1,39	740	727	760	345	14,5%	506,98	KV
6-12	158.697,7	1,76	1,76	798	773	828	405	14,3%	430,31	KV
6-13	146.662,0	1,63	1,62	652	647	659	378	14,3%	385,70	MBL
6-14	115.498,7	1,28	1,28	664	622	718	307	14,3%	425,54	KV
6-15	139.134,6	1,55	1,54	713	684	749	382	14,6%	512,38	IFP
6-16	144.291,3	1,60	1,60	698	662	740	376	14,3%	407,15	IFL
6-17	161.711,3	1,80	1,79	784	751	821	551	14,7%	454,73	IFP
6-18	158.263,4	1,76	1,75	750	685	835	402	13,6%	452,15	IFL
6-19	106.632,1	1,18	1,18	739	732	748	284	14,2%	463,38	IFL
6-20	159.633,3	1,77	1,77	747	700	805	397	14,6%	485,58	MBL
6-00	91.750,4	1,02	1,01	606	580	640	262	13,0%	453,60	IFL

\*Wegaufnehmer 2 war fehlerhaft und wurde demnach nicht in die E-Modulbestimmung  $E_{t,90,l,s}$  miteinbezogen.

**Tabelle 36 Einzelauswertungen Serie 7 (5sVL)**

Anzahl	17	17	17	18	18	18	18	18	18	
Min	18690,4	0,83	0,82	529	506	549	128	12,3%	381	
Max	40573,5	1,80	1,80	847	849	848	497	14,9%	550	
Mittelwert	<b>31949,7</b>	<b>1,42</b>	<b>1,41</b>	<b>678</b>	<b>667</b>	<b>695</b>	<b>278</b>	<b>13,7%</b>	<b>450</b>	
Median	33453,5	1,49	1,48	696	698,1	708,3	260,5	13,8%	445	
Stabw.	5899,8	0,262	0,262	82,7	84	87	87,2	0,79%	44	
COV [%]	18,5%	18,5%	18,5%	12,2%	12,67%	12,55%	31,40%	5,76%	9,71%	
Bezeichnung	Kraft max $F_{max}$ [kN]	Festigkeit $f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Fest. corr. EG $f_{t,90,korr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok. $E_{t,90,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,hirm $E_{t,90,l,h}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul lok.,seite $E_{t,90,l,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zeit $t$ [s]	HF im Bruch $u$ [%]	Roh corr. EN384 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchbild
7-01	12.912,7	0,57	0,57	787	1.032	635	137	14,5%	479,24	KV
7-02	35.448,9	1,58	1,57	708	696	723	264	12,6%	416,80	IFL
7-03	40.573,5	1,80	1,80	750	707	802	284	13,7%	465,97	IFP
7-04	39.325,3	1,75	1,74	723	710	742	316	13,9%	456,23	MBL
7-05	20.932,3	0,93	0,92	688	700	677	191	13,9%	512,96	KV
7-06	26.631,4	1,18	1,18	600	587	616	224	14,6%	421,05	IFL
7-07	32.276,4	1,43	1,43	615	595	639	387	13,0%	426,50	MBL
7-08	32.356,2	1,44	1,43	533	506	569	304	14,7%	412,19	MBP
7-09	33.803,2	1,50	1,50	787	739	846	245	14,9%	426,18	MBL
7-10	34.704,7	1,54	1,54	727	716	741	250	14,7%	550,44	IFL
7-11	18.690,4	0,83	0,82	529	513	549	164	12,3%	464,68	MBP
7-12	30.986,6	1,38	1,37	722	721	727	239	13,2%	381,37	IFL
7-13	28.891,1	1,28	1,28	614	604	630	264	13,1%	450,22	MBL
7-14	33.453,5	1,49	1,48	669	649	693	257	12,9%	403,09	MBL
7-15	7.052,4	0,31	0,31	650	713	607	128	14,8%	524,18	KV
7-16	38.548,5	1,71	1,71	704	682	730	497	13,9%	459,14	JB
7-17	7.780,7	0,35	0,34	431	425	451	197	13,9%	448,48	KV
7-18	33.935,2	1,51	1,50	847	849	848	384	13,2%	462,49	IFP
7-19	34.314,2	1,53	1,52	719	703	741	251	13,7%	439,72	IFP
7-20	28.273,3	1,26	1,25	624	612	637	351	14,1%	425,30	IFL

## ANHANG C DIVERSE ANDERE ANHÄNGE

### C-1.1 Schraubenbemessung

Folgend werden die Schrauben (ASSY® VG 8 × 180) für die Prüfkongfiguration der Serie 5s300CL<sup>2</sup> bemessen. Konservativ werden alle Schrauben mit einem Winkel von 0° zur Faser berechnet.

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \\ f_{tens,k} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Dabei sind:

$$k_{ax} \quad 0,7 \text{ [-]}$$

$$f_{ax,k} \quad 11 \cdot \left( \frac{385}{350} \right)^{0,8} = 11,87 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$l_{ef} \quad 130 \text{ [mm]}$$

$$f_{tens,k} \quad 20.000 \text{ [N]}$$

$$n = \frac{250.000 \text{ N}}{8641,36 \text{ N/Stk}} = 28 \text{ Stk.} \quad (4.3)$$

Für die sichere Prüfungsdurchführung werden 28 Schrauben benötigt, die unter Beachtung der Achs- und Randabstände auf 4 Schraubenblöcke á 7 Schrauben (vgl. Fertigungspläne im Anhang D-1.2) aufgeteilt werden.

## C-1.2 Sortierpläne

*Tabelle 37 Sortierplan Serie 1 (1s)*

Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett
1-01	01-02
1-02	02-02
1-03	03-02
1-04	04-02
1-05	05-02
1-06	06-02
1-07	07-02
1-08	08-02
1-09	09-02
1-10	10-02
1-11	11-02
1-12	12-02
1-13	13-02
1-14	14-02
1-15	15-02
1-16	16-02
1-17	17-02
1-18	18-02
1-19	19-02
1-20	20-02
1-21	21-02
1-22	22-02
1-23	23-02
1-24	24-02
1-25	25-02
1-26	26-02
1-27	27-02
1-28	28-02
1-29	29-02
1-30	30-02
1-31	31-02
1-32	32-02
1-33	33-02
1-34	34-02
1-35	35-02
1-36	36-02
1-37	37-02
1-38	38-02
1-39	39-02
1-40	40-02

*Tabelle 38 Sortierplan Serie 2 (5sGL)*

Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett				
2-01	01-03	02-03	03-03	04-03	05-03
2-02	01-09	02-09	03-09	04-09	05-09
2-03	01-15	02-15	03-15	04-15	05-15
2-04	06-03	07-03	08-03	09-03	10-03
2-05	06-09	07-09	08-09	09-09	10-09
2-06	06-15	07-15	08-15	09-15	10-15
2-07	11-03	12-03	13-03	14-03	15-03
2-08	11-09	12-09	13-09	14-09	15-09
2-09	11-15	12-15	13-15	14-15	15-15
2-10	16-03	17-03	18-03	19-03	20-03
2-11	16-09	17-09	18-09	19-09	20-09
2-12	16-15	17-15	18-15	19-15	20-15
2-13	21-03	22-03	23-03	24-03	25-03
2-14	21-09	22-09	23-09	24-09	25-09
2-15	21-15	22-15	23-15	24-15	25-15
2-16	26-03	27-03	28-03	29-03	30-03
2-17	26-09	27-09	28-09	29-09	30-09
2-18	26-15	27-15	28-15	29-15	30-15
2-19	31-03	32-03	33-03	34-03	35-03
2-20	31-09	32-09	33-09	34-09	35-09
2-21	31-15	32-15	33-15	34-15	35-15

**Tabelle 39 Sortierplan Serie 4 (5sCL)**

Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett		
3-01	01 04	02 04	03 04
3-02	04 04	05 04	06 04
3-03	07 04	08 04	09 04
3-04	10 04	11 04	12 04
3-05	13 04	14 04	15 04
3-06	16 04	17 04	18 04
3-07	19 04	20 04	21 04
3-08	22 04	23 04	24 04
3-09	25 04	26 04	27 04
3-10	28 04	29 04	30 04
3-11	31 04	32 04	33 04
3-12	34 04	35 04	36 09
3-13	37 09	38 09	39 09
3-14	40 09	41 06	42 06
3-15	43 06	44 06	45 06
3-16	46 06	47 06	48 06
3-17	49 06	50 06	51 03
3-18	52 03	53 03	54 03
3-19	55 03	56 03	57 03
3-20	58 03	59 03	60 03
3-21	56 04	57 04	58 04

**Tabelle 40 Sortierplan Serie 4 (5sCL)**

Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett				
4-01	01 05	02 05	03 05	04 05	05 05
4-02	01 11	02 11	03 11	04 11	05 11
4-03	01 17	02 17	03 17	04 17	05 17
4-04	06 05	07 05	08 05	09 05	10 05
4-05	06 11	07 11	08 11	09 11	10 11
4-06	06 17	07 17	08 17	09 17	10 17
4-07	11 05	12 05	13 05	14 05	15 05
4-08	11 11	12 11	13 11	14 11	15 11
4-09	11 17	12 17	13 17	14 17	15 17
4-10	16 05	17 05	18 05	19 05	20 05
4-11	16 11	17 11	18 11	19 11	20 11
4-12	16 17	17 17	18 17	19 17	20 17
4-13	21 05	22 05	23 05	24 05	25 05
4-14	21 11	22 11	23 11	24 11	25 11
4-15	21 17	22 17	23 17	24 17	25 17
4-16	26 05	27 05	28 05	29 05	30 05
4-17	26 11	27 11	28 11	29 11	30 11
4-18	26 17	27 17	28 17	29 17	30 17
4-19	31 05	32 05	33 05	34 05	35 05
4-20	31 11	32 11	33 11	34 11	35 11
4-21	31 17	32 17	33 17	34 17	35 17

Tabelle 41      *Sortierplan Serie 5 (7sCL)*

Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett						
5-01	01 06	02 06	03 06	04 06	05 06	50 10	57 05
5-02	01 12	02 12	03 12	04 12	05 12	50 11	57 06
5-03	01 18	02 18	03 18	04 18	05 18	50 12	57 07
5-04	06 06	07 06	08 06	09 06	10 06	58 05	59 04
5-05	06 12	07 12	08 12	09 12	10 12	58 06	59 05
5-06	06 18	07 18	08 18	09 18	10 18	58 07	59 06
5-07	11 06	12 06	13 06	14 06	15 06	60 04	51 04
5-08	11 12	12 12	13 12	14 12	15 12	60 05	51 05
5-09	11 18	12 18	13 18	14 18	15 18	60 06	51 06
5-10	16 06	17 06	18 06	19 06	20 06	42 11	43 10
5-11	16 12	17 12	18 12	19 12	20 12	42 11	43 11
5-12	16 18	17 18	18 18	19 18	20 18	42 12	43 12
5-13	21 06	22 06	23 06	24 06	25 06	44 10	45 10
5-14	21 12	22 12	23 12	24 12	25 12	44 11	45 11
5-15	21 18	22 18	23 18	24 18	25 18	44 12	45 12
5-16	26 06	27 06	28 06	29 06	30 06	46 10	47 10
5-17	26 12	27 12	28 12	29 12	30 12	46 11	47 11
5-18	26 18	27 18	28 18	29 18	30 18	46 12	47 12
5-19	31 06	32 06	33 06	34 06	35 06	48 10	49 10
5-20	31 12	32 12	33 12	34 12	35 12	48 11	49 11
5-21	31 18	32 18	33 18	34 18	35 18	48 12	49 12



**Tabelle 42**                      *Sortierplan Serie 6 (5sCL300<sup>2</sup>)*

Serie-Prfkp	Brett-Lage im Brett									
6-01	01 07	02 07	03 07	04 07	05 07	06 07	07 07	08 07	09 07	10 07
6-02	01 08	02 08	03 08	04 08	05 08	06 08	07 08	08 08	09 08	10 08
6-03	01 13	02 13	03 13	04 13	05 13	06 13	07 13	08 13	09 13	10 13
6-04	01 14	02 14	03 14	04 14	05 14	06 14	07 14	08 14	09 14	10 14
6-05	11 07	12 07	13 07	14 07	15 07	16 07	17 07	18 07	19 07	20 07
6-06	11 08	12 08	13 08	14 08	15 08	16 08	17 08	18 08	19 08	20 08
6-07	11 13	12 13	13 13	14 13	15 13	16 13	17 13	18 13	19 13	20 13
6-08	11 14	12 14	13 14	14 14	15 14	16 14	17 14	18 14	19 14	20 14
6-09	21 07	22 07	23 07	24 07	25 07	26 07	27 07	28 07	29 07	30 07
6-10	21 08	22 08	23 08	24 08	25 08	26 08	27 08	28 08	29 08	30 08
6-11	21 13	22 13	23 13	24 13	25 13	26 13	27 13	28 13	29 13	30 13
6-12	21 14	22 14	23 14	24 14	25 14	26 14	27 14	28 14	29 14	30 14
6-13	31 07	32 07	33 07	34 07	35 07	36 03	37 03	38 03	39 03	40 03
6-14	31 08	32 08	33 08	34 08	35 08	36 04	37 04	38 04	39 04	40 04
6-15	31 13	32 13	33 13	34 13	35 13	36 05	37 05	38 05	39 05	40 05
6-16	31 14	32 14	33 14	34 14	35 14	36 06	37 06	38 06	39 06	40 06
6-17	41 02	42 02	43 02	44 02	45 02	46 02	47 02	48 02	49 02	50 02
6-18	41 03	42 03	43 03	44 03	45 03	46 03	47 03	48 03	49 03	50 03
6-19	41 08	42 08	43 08	44 08	45 08	46 08	47 08	48 08	49 08	50 08
6-20	41 09	42 09	43 09	44 09	45 09	46 09	47 09	48 09	49 09	50 09
6-00	51 02	52 02	53 02	54 02	55 02	56 02	57 02	58 02	59 02	60 02

**Tabelle 43**      *Sortierplan Serie 7 (5sVL)*

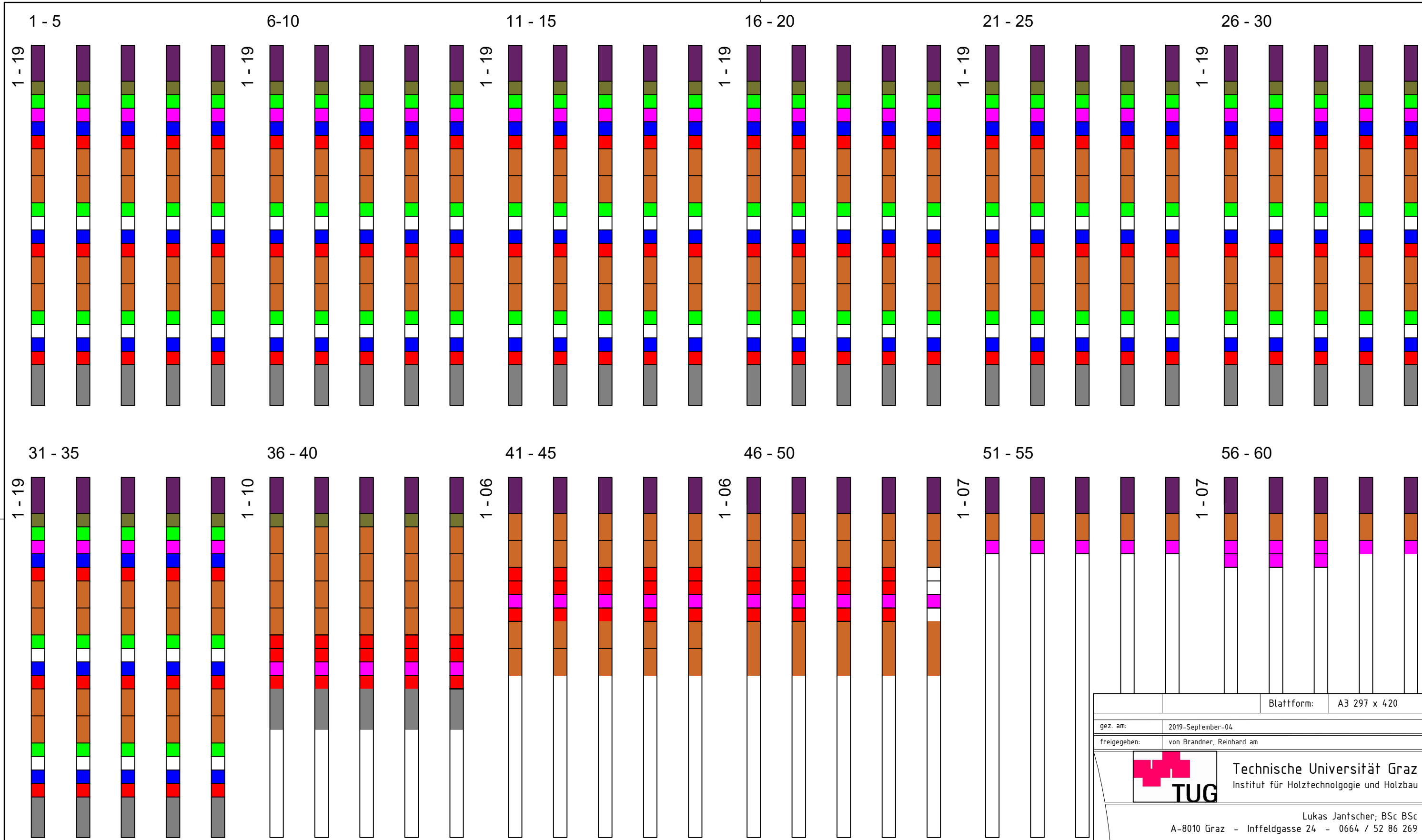
Serie-Prfkp.	Brett-Lage im Brett				
	01 01	02 19	03 01	04 19	05 01
7-01	01 01	02 19	03 01	04 19	05 01
7-02	36 01	01 19	02 01	03 19	04 01
7-03	06 01	07 19	08 01	09 19	10 01
7-04	37 01	06 19	07 01	08 19	09 01
7-05	11 01	12 19	13 01	14 19	15 01
7-06	38 01	11 19	12 01	13 19	14 01
7-07	16 01	17 19	18 01	19 19	20 01
7-08	39 01	16 19	17 01	18 19	19 01
7-09	21 01	22 19	23 01	24 19	25 01
7-10	40 01	21 19	22 01	23 19	24 01
7-11	26 01	27 19	28 01	29 19	30 01
7-12	41 01	26 19	27 01	28 19	29 01
7-13	31 01	32 19	33 01	34 19	35 01
7-14	42 01	31 19	32 01	33 19	34 01
7-15	43 01	36 11	44 01	37 11	45 01
7-16	46 01	05 19	47 01	10 19	48 01
7-17	49 01	15 19	50 01	20 19	51 01
7-18	52 01	25 19	53 01	30 19	54 01
7-19	55 01	35 19	56 01	38 11	57 01
7-20	58 01	39 11	59 01	40 11	60 01




## **ANHANG D PLÄNE**




### **D-1.1 Zuschnittplan**



Der Zuschnittplan ist gemeinsam mit den Sortierplänen in Anhang C-1.2 zu lesen.



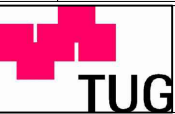


Serie 1 =   
 Serie 2 =   
 Serie 3 = 

Serie 4 =   
 Serie 5 =   
 Serie 6 = 

Serie 7 =  

Anmerkung: weiße Felder sind auch nummeriert

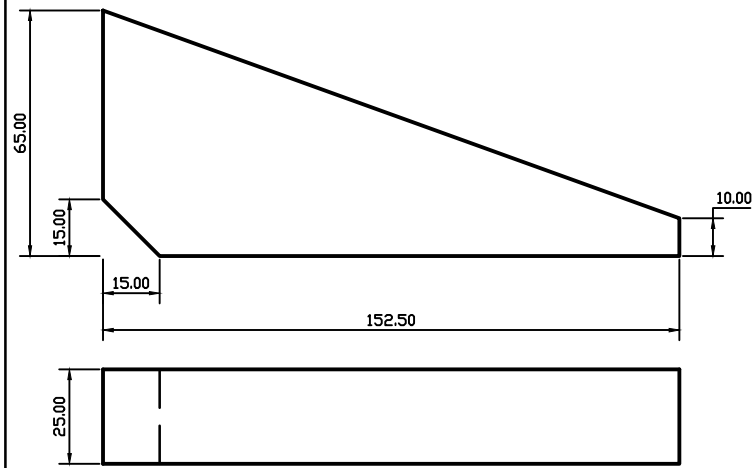
Blattform: A3 297 x 420	
gez. am:	2019-September-04
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am
 <b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269	
Planstand vom: - 2019-September-04	Masterarbeit: Konstruktiver Ingenieurbau  Projektbetreuung: Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngrößen von BSP</b>	
<b>Rohlamellen</b>	ZeichnungsNr.: <b>6</b>
Gez.: Lukas Jantscher	Maßstab: 1 : 40

## D-1.2 Werkplanung Lasteinleitungsplatte 300<sup>2</sup> mm<sup>2</sup>

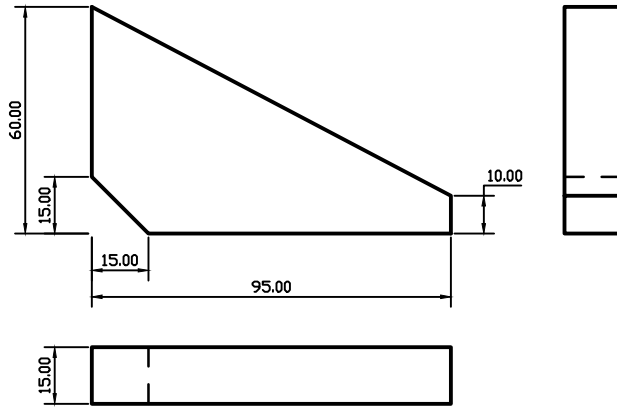




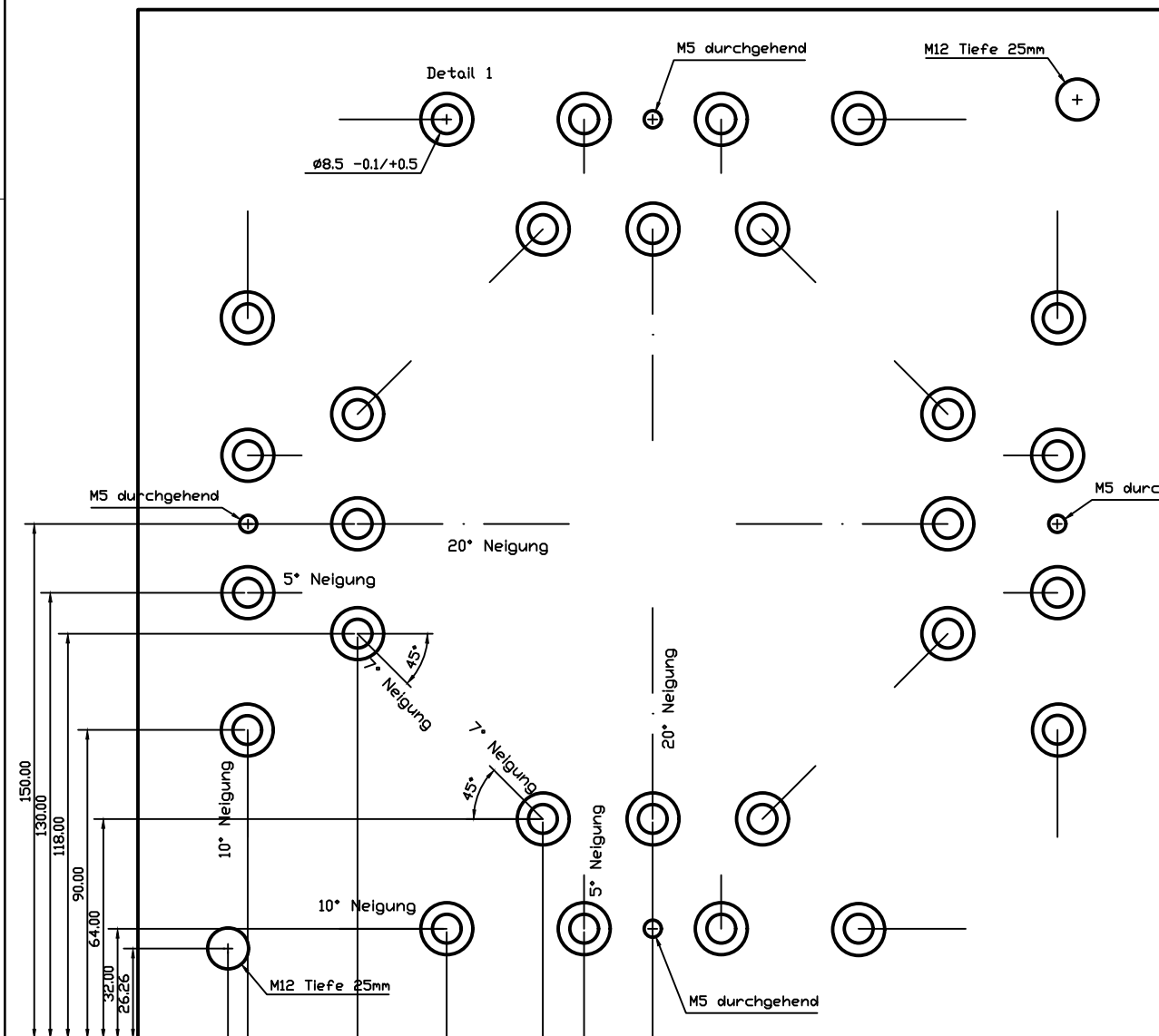
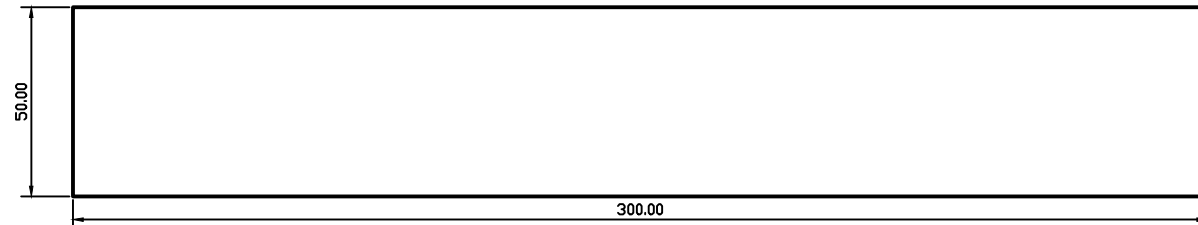
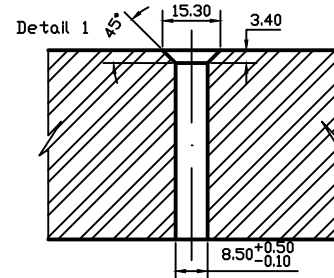
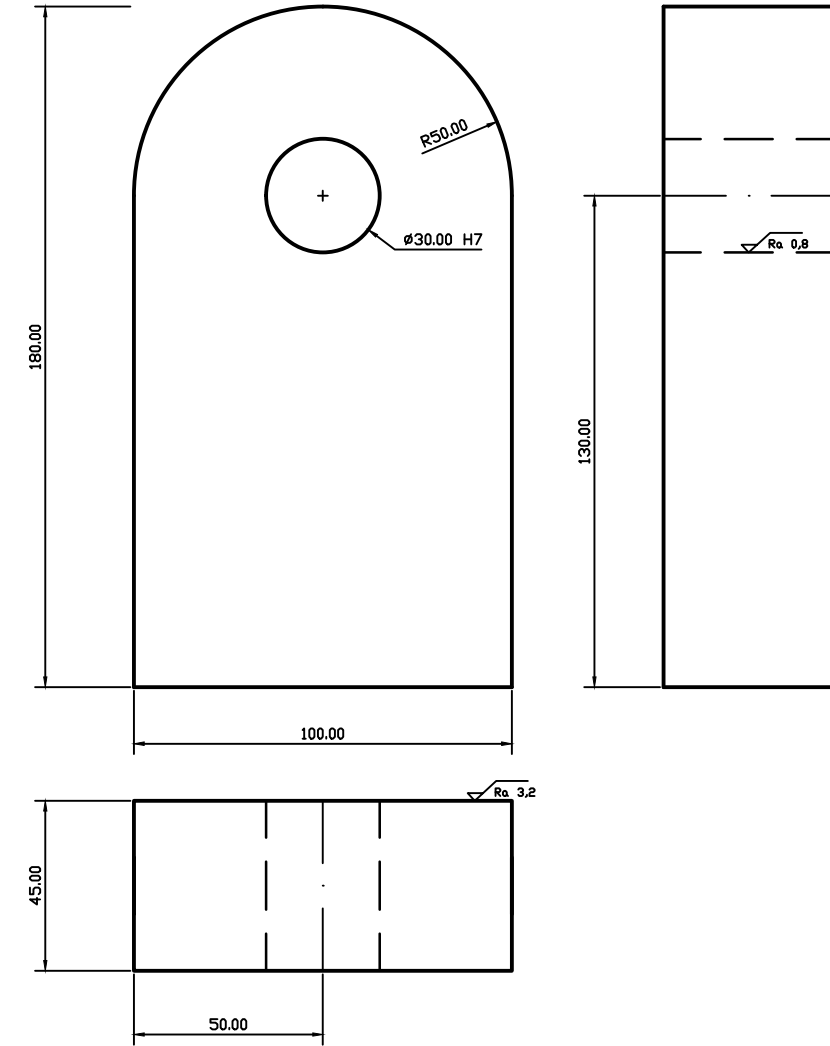
Pos: 1a-2



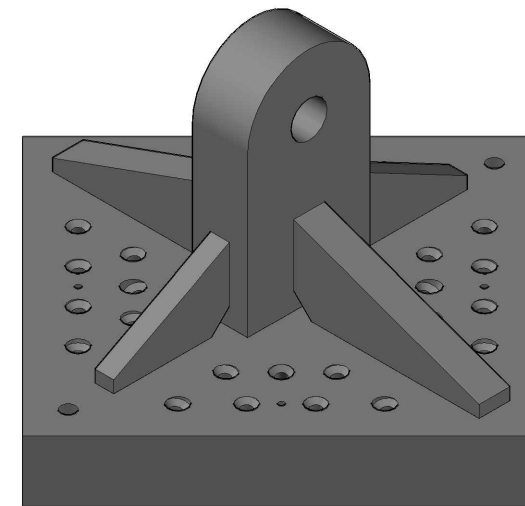
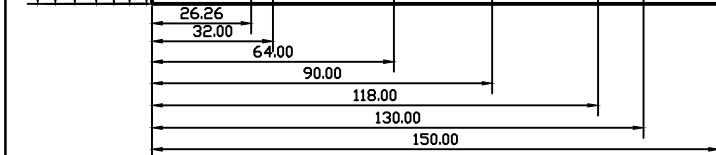
Pos: 1a-1



Pos: 1a-3



Pos: 1a-4

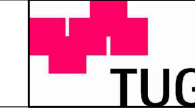


Allgemeintoleranzen mK gemäß ÖN EN 22768  
alle Kanten entgratet

▽ Ra 6,3 (▽ Ra 3,2 (▽ Ra 0,8))

Stahlgüte: S235

Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am



Technische Universität Graz  
Institut für Holztechnologie und Holzbau

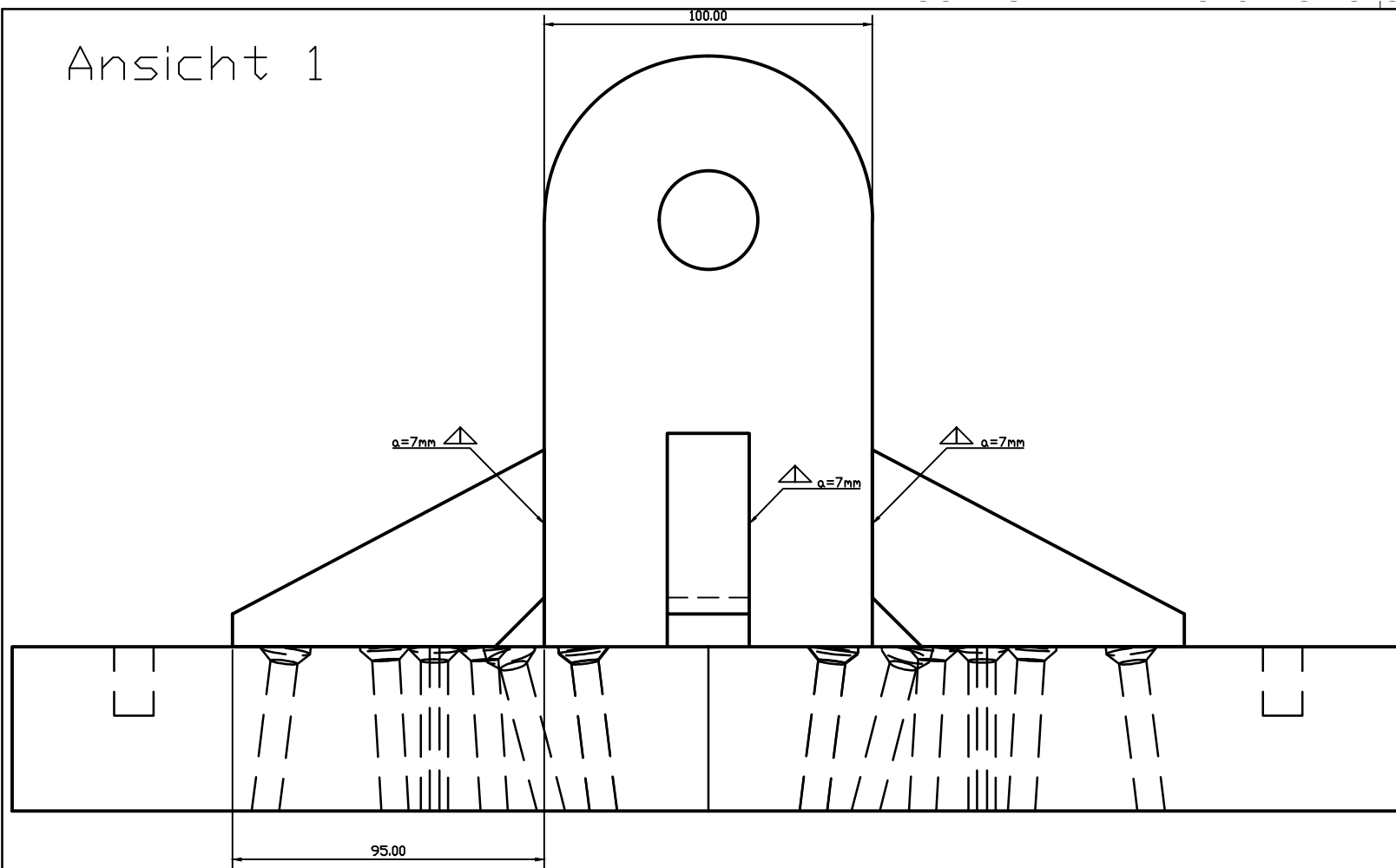
Lukas Jantscher; BSc BSc  
A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269

Planstand vom:	- 2019-Juli-02	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner

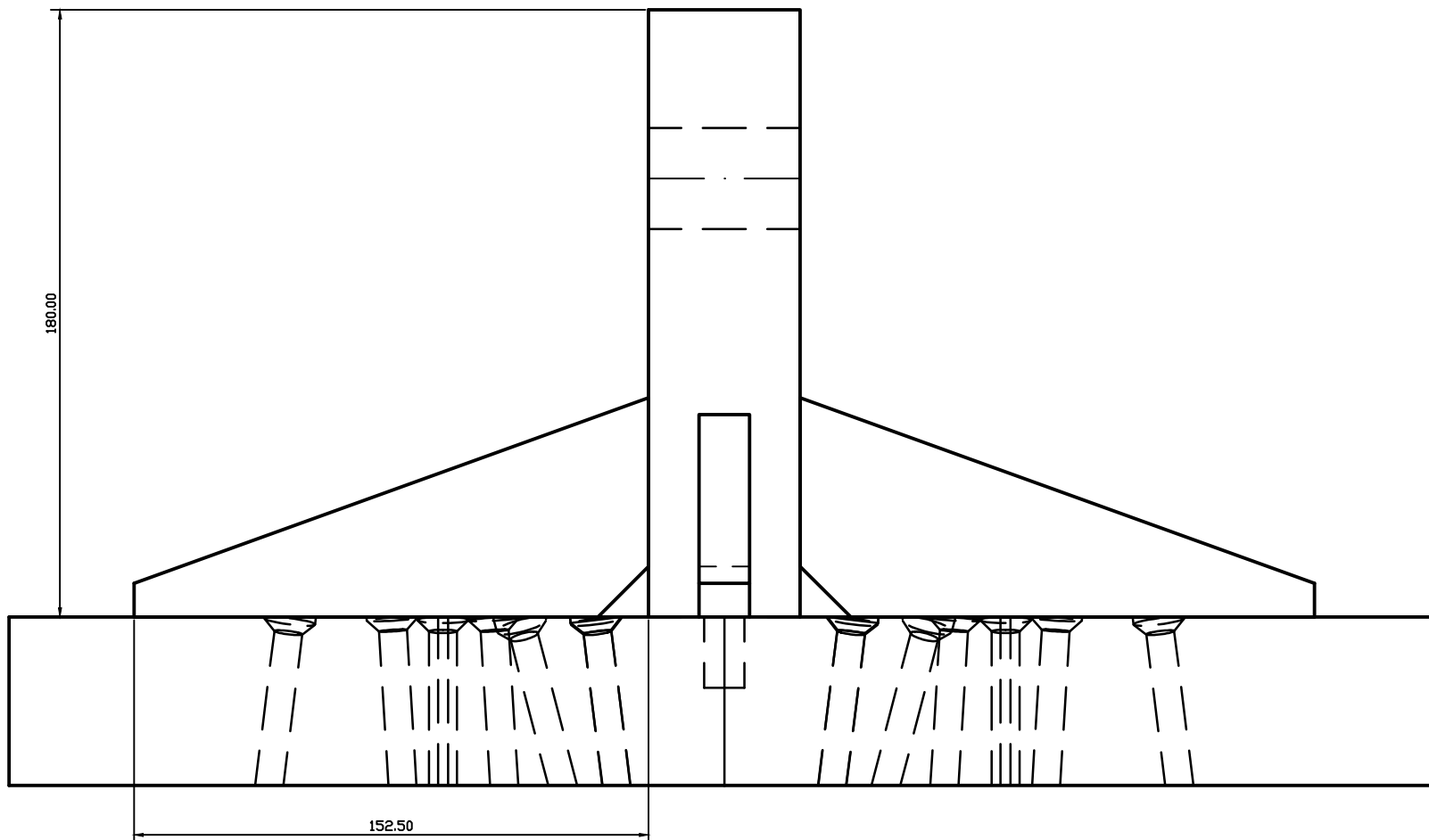
Querzugkenngrößen von BSP

Einzelteilfertigungszeichnungen Lasteinleitungsplatte 300x300 unten	ZeichnungsNr.: <b>1a</b>
Gez.: Lukas Jantscher	Maßstab: 1 : 2

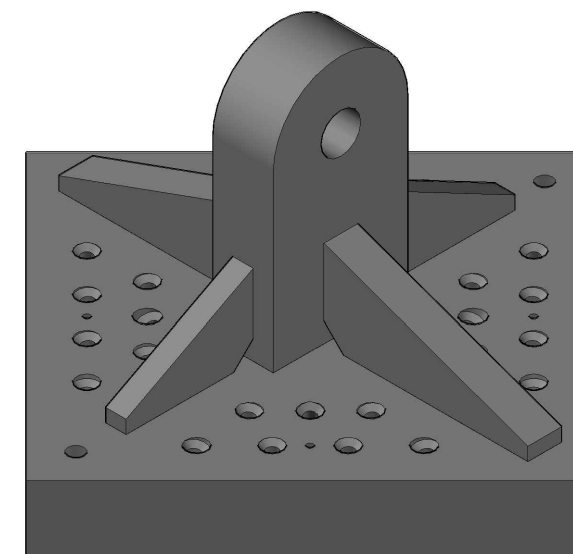
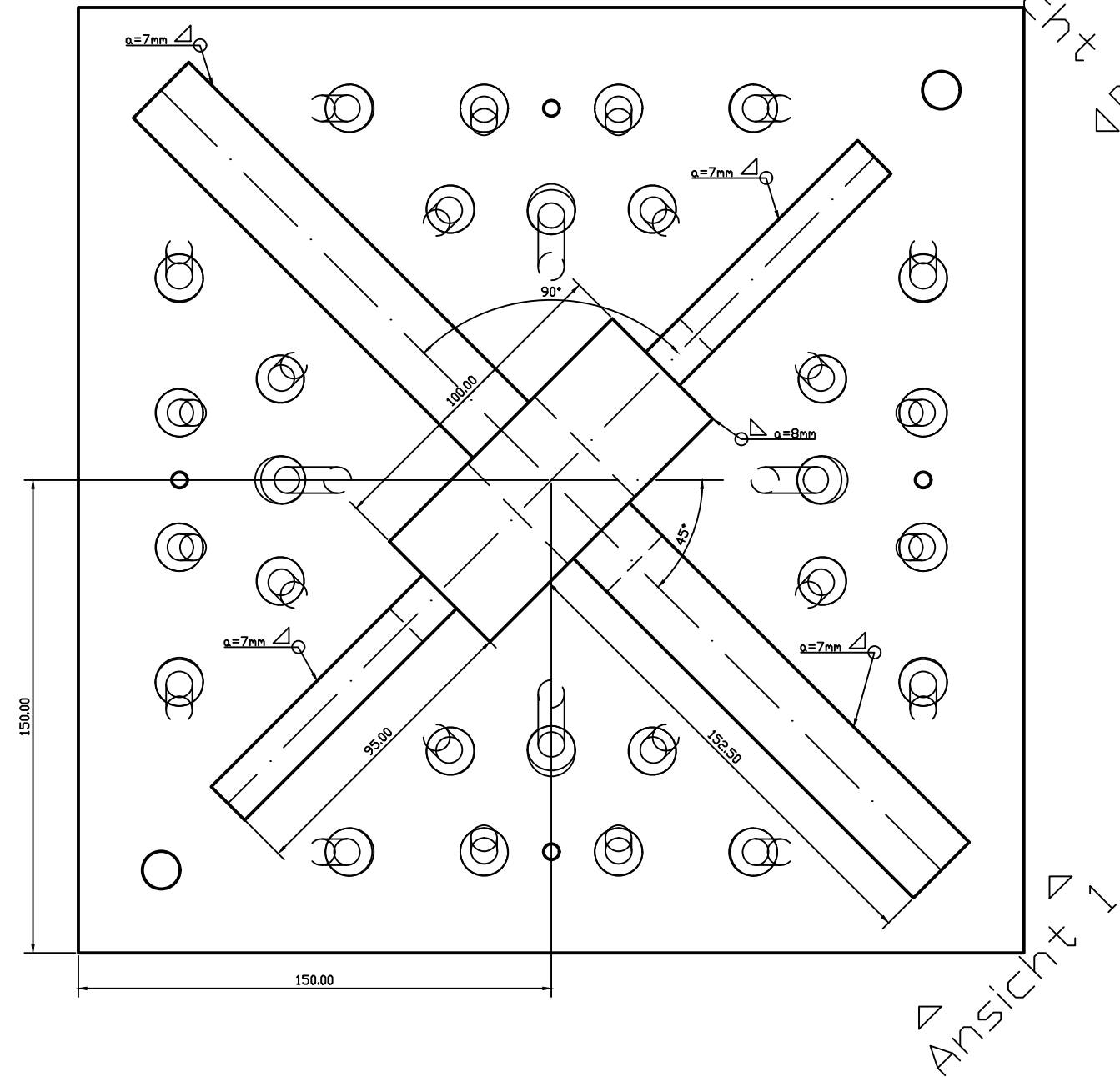
Ansicht 1




Ansicht 2

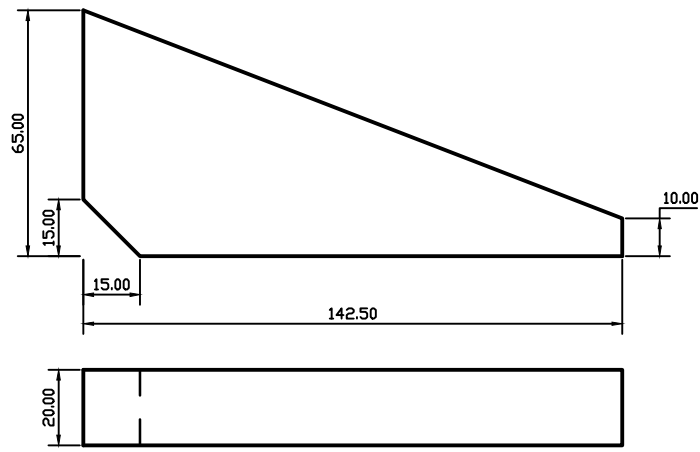


Grundriss

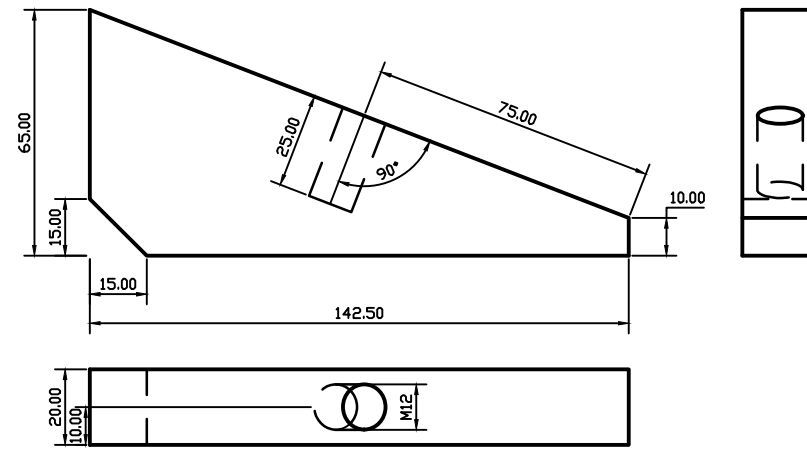


Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am
 <b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269	
Planstand vom: - 2019-Juli-02	Masterarbeit: Konstruktiver Ingenieurbau  Projektbetreuung: Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngrößen von BSP</b>	
<b>Assemblingplan</b> Lasteinleitungsplatte 300x300 unten	
Gez.: Lukas Jantscher	ZeichnungNr.: <b>1b</b> Maßstab: 1 : 2

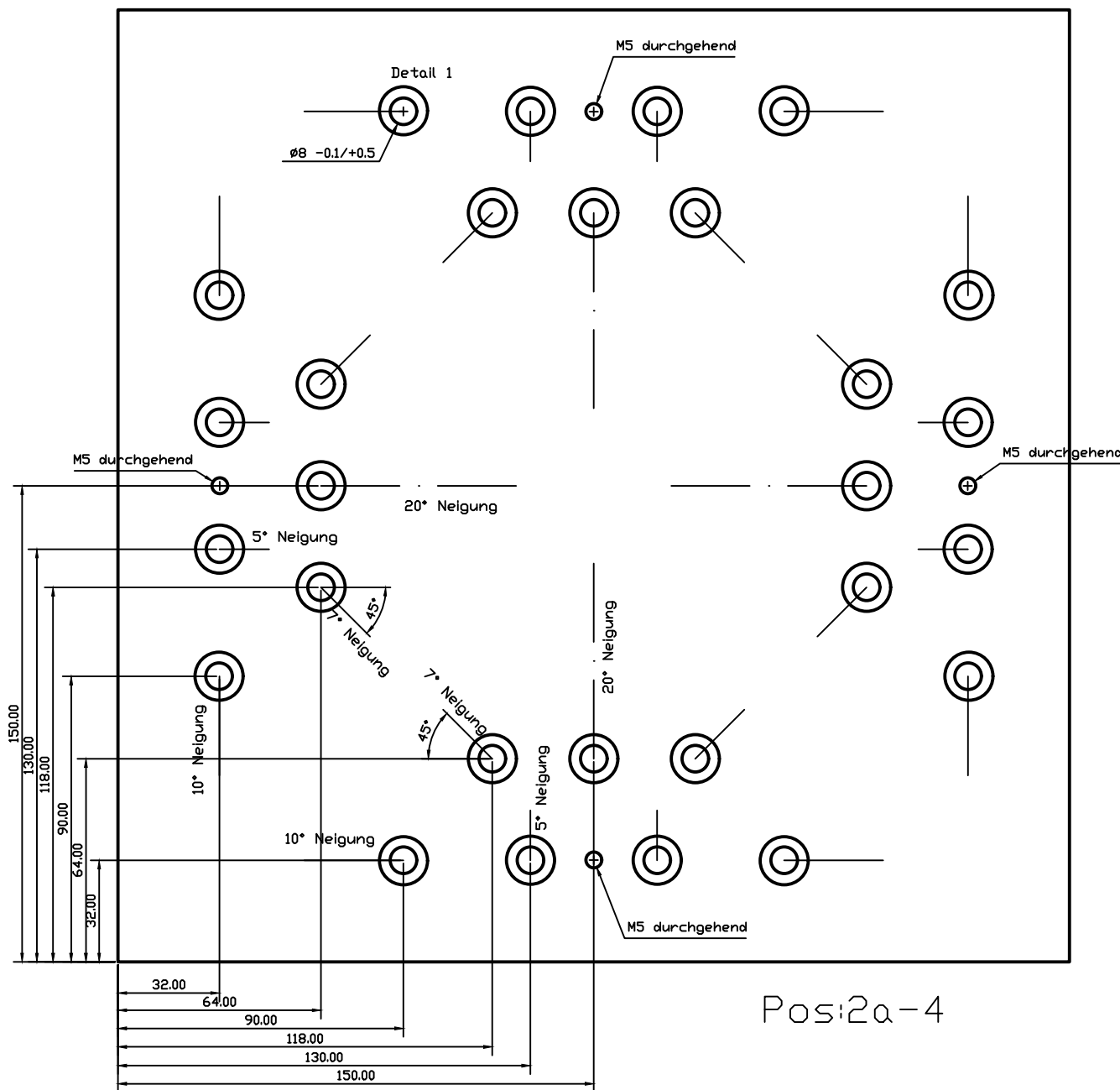
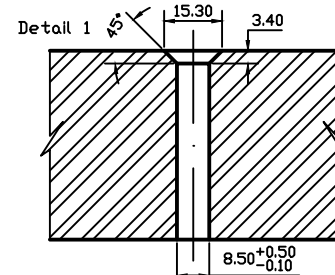
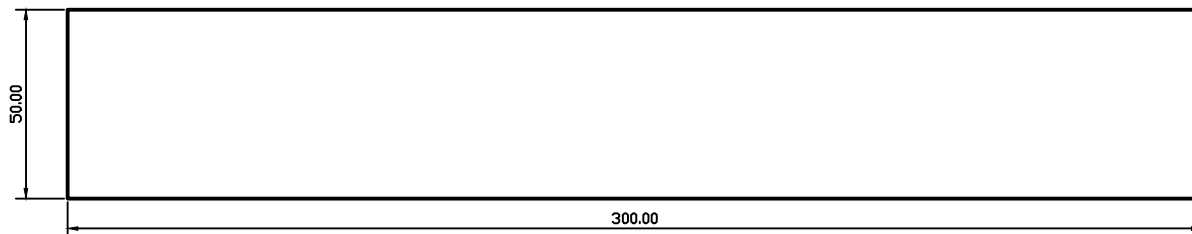
Pos:2a-2



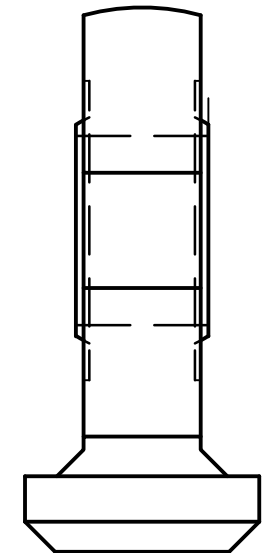
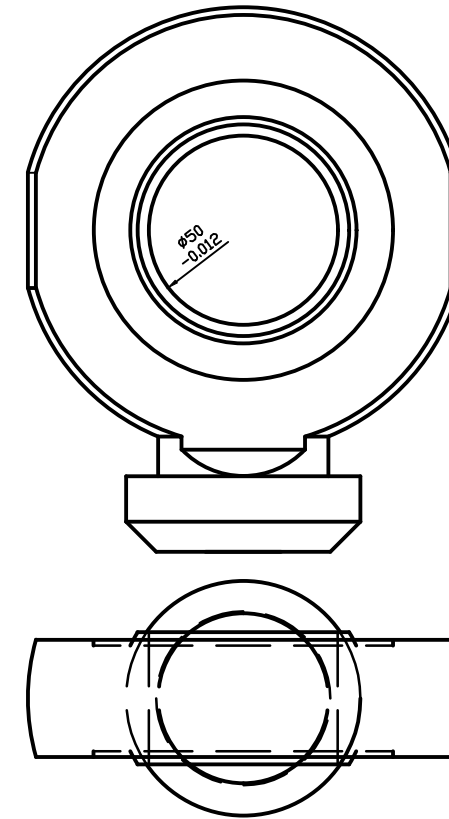
Pos:2a-1



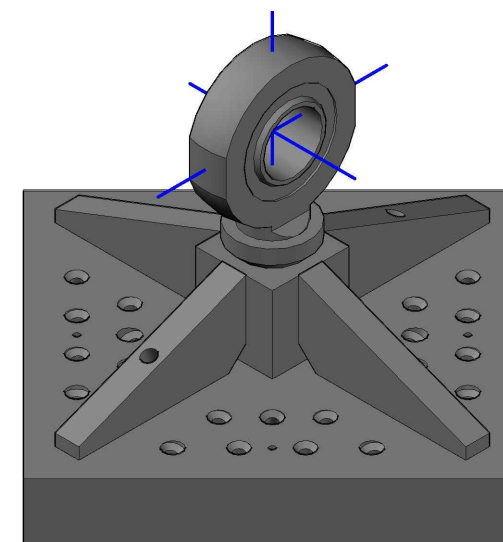
Gelenkkopf nach DIN ISO 12  
240-4-Maßreihe E, Form S  
Bezeichnung: GE 50 von Lo-Com  
(www.hydraulikverkauf.de)  
oder gleichwertig



Pos:2a-4



Pos:2a-3



Allgemeintoleranzen mK gemäß DIN EN 22768  
alle Kanten entgratet

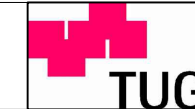
✓ Ra 6,3

Stahlgüte: S235

Blattform: A3 297 x 420

gez. am: 2019-Juli-02

freigegeben: von Brandner, Reinhard am



Technische Universität Graz  
Institut für Holztechnologie und Holzbau

Lukas Jantscher; BSc BSc  
A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269

Planstand vom: - 2019-Juli-02

Masterarbeit:  
Konstruktiver Ingenieurbau

Projektbetreuung:  
Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner

Querzugkenngrößen von BSP

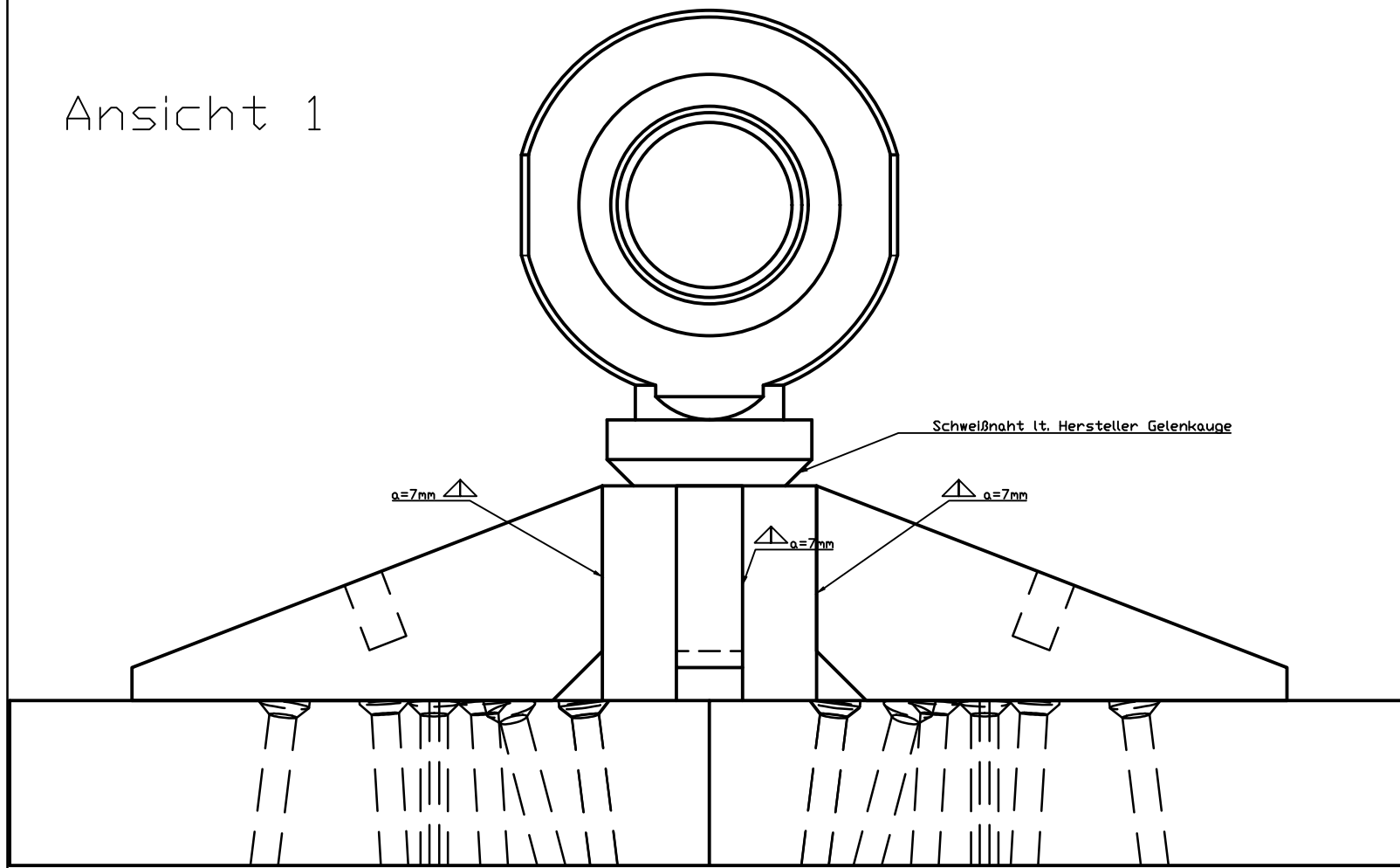
Einzelteilfertigungszeichnungen  
Lasteinleitungsplatte 300x300  
oben

ZeichnungsNr.:  
2a

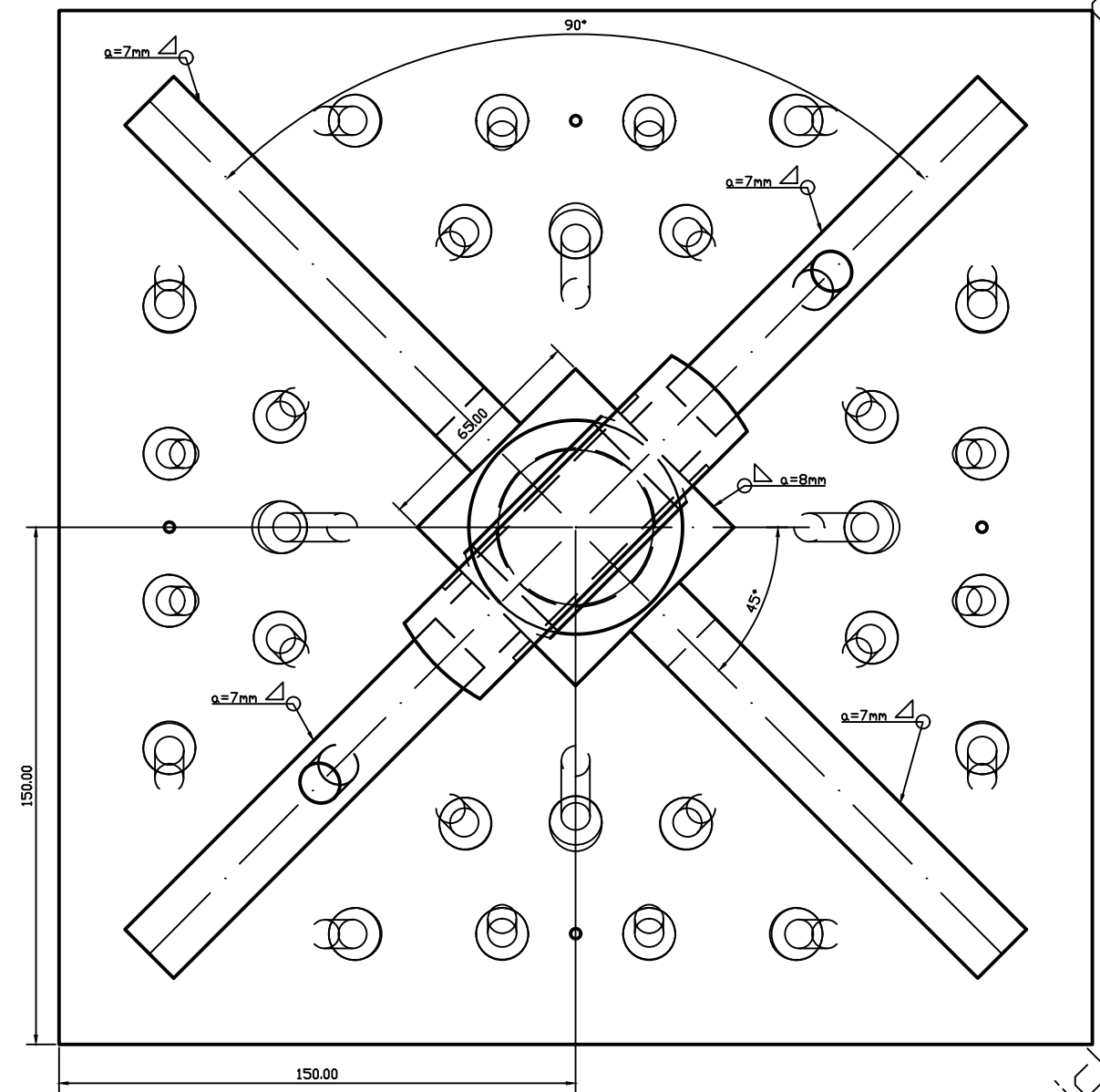
Gez.: Lukas Jantscher

Maßstab: 1 : 2

Ansicht 1

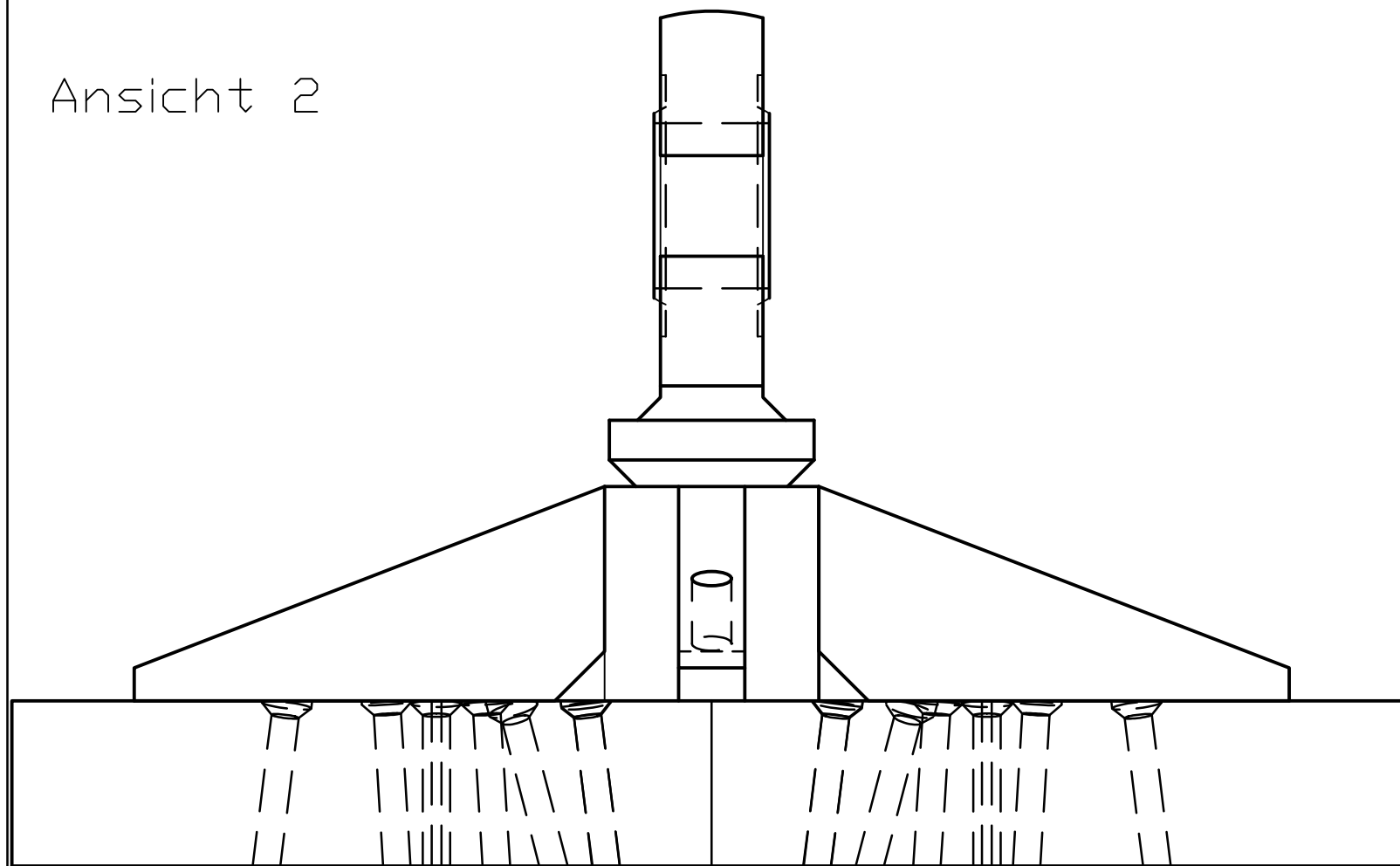


Grundriss

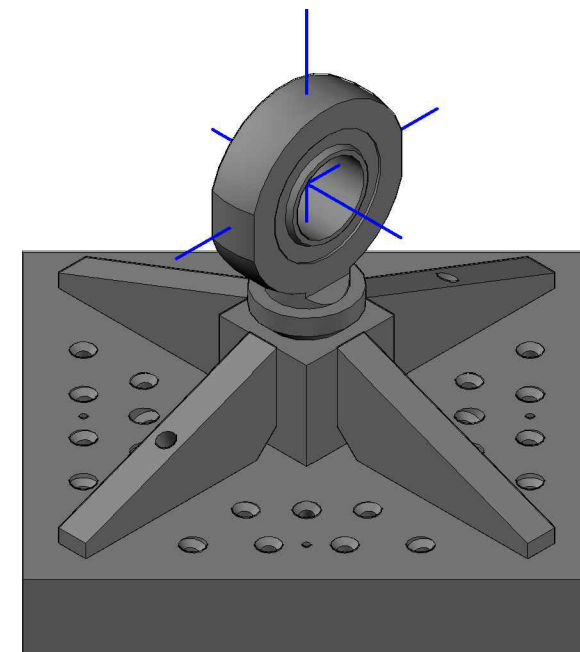


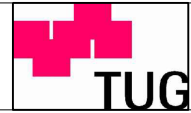
Ansicht 2

Ansicht 2

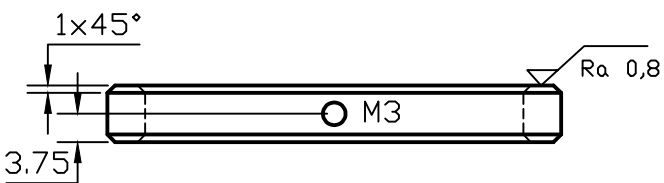
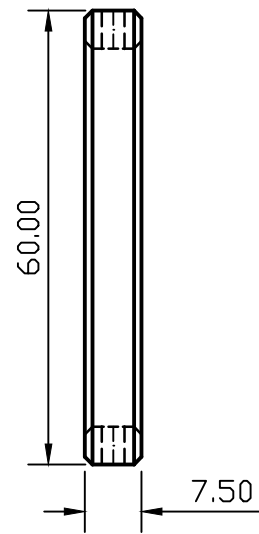
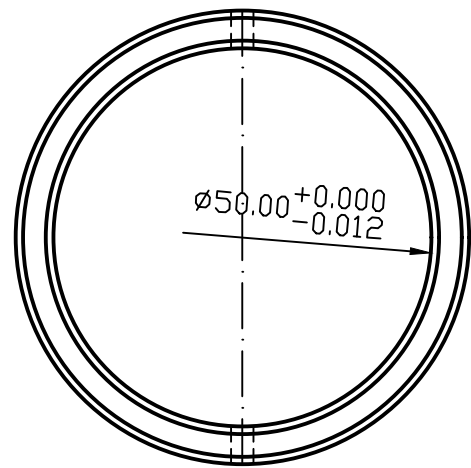


Ansicht 1



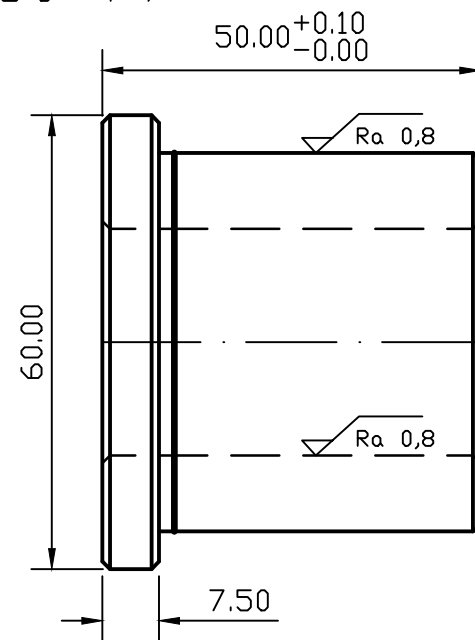
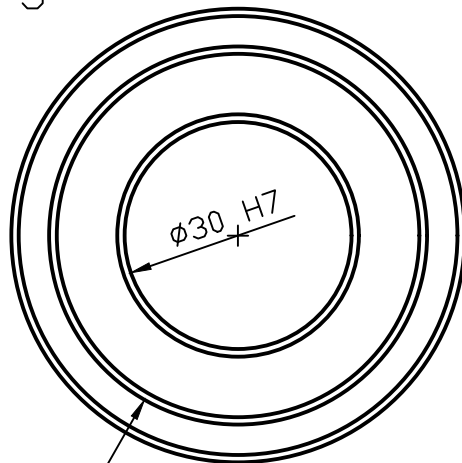
Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am
 <b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269	
Planstand vom: - 2019-Juli-02	Masterarbeit: Konstruktiver Ingenieurbau  Projektbetreuung: Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngrößen von BSP</b>	
<b>Assemblingplan</b> Lasteinleitungsplatte 300x300 oben	
Gez.: Lukas Jantscher	Maßstab: 1 : 2
ZeichnungNr.: <b>2b</b>	

Pos:3-1

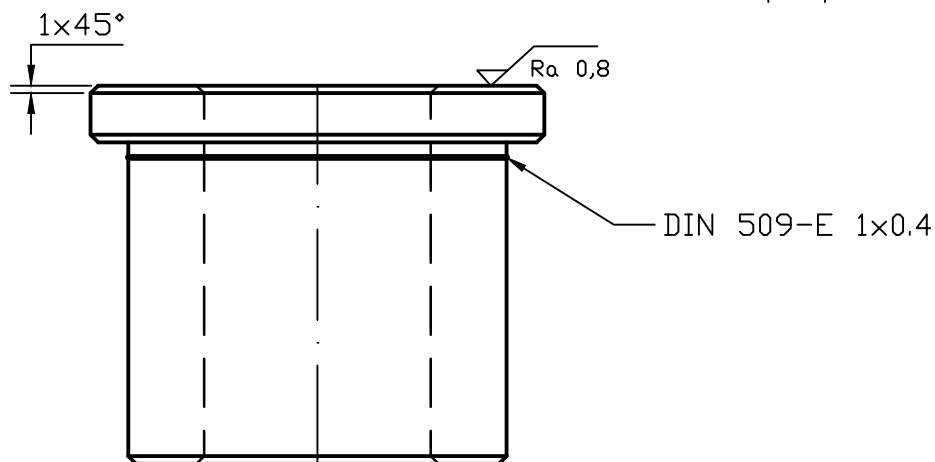


Toleranzen abgestimmt mit Gelenkkopf Lo-Com  $\varnothing 50-0.012$  und Zwick Bolzen  $\varnothing 30 f7$

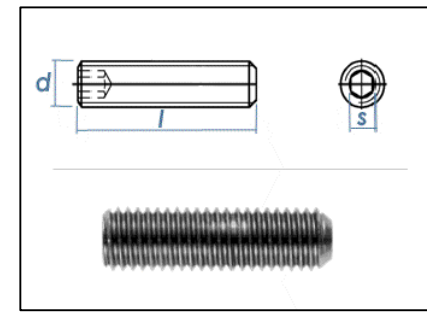
Pos:3-3



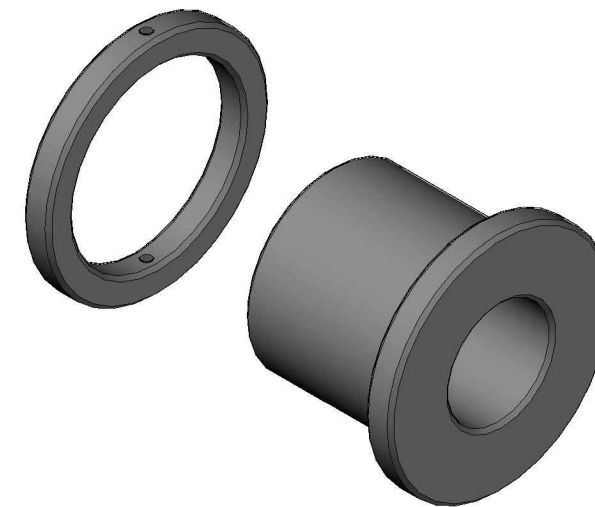
$\varnothing 50_{-0.012/-0.025}$



Pos:3-2

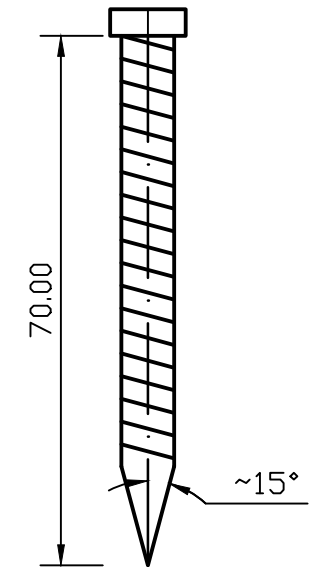


Madenschrauben M3 x 5mm



Pos:3-4

Schraube  
M5 x 70mm  
8.8 oder höher



Allgemeintoleranzen mK gemäß  $\ddot{U}N$  EN 22768  
alle Kanten entgratet

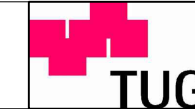
$\sqrt{\text{Ra 0,8}}$

Stahlgüte: S355 (ST52-3)

Blattform: A3 297 x 420

gez. am: 2019-Juli-02

freigegeben: von Brandner, Reinhard am



Technische Universität Graz  
Institut für Holztechnologie und Holzbau

Lukas Jantscher; BSc BSc  
A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269

Planstand vom: - 2019-Juli-02

Masterarbeit:  
Konstruktiver Ingenieurbau

Projektbetreuung:  
Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner

Querzugkenngrößen von BSP

Reduzierhülse

ZeichnungsNr.:

3

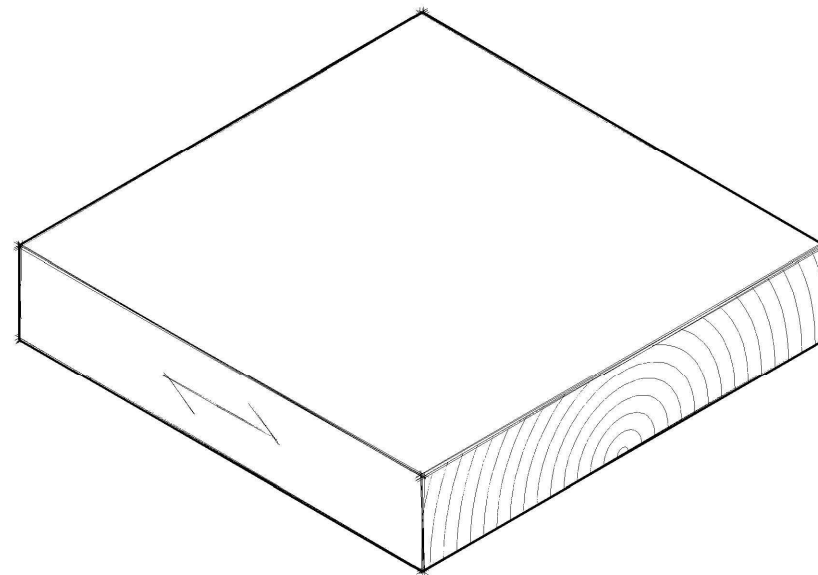
Gez.: Lukas Jantscher

Maßstab: 1 : 1

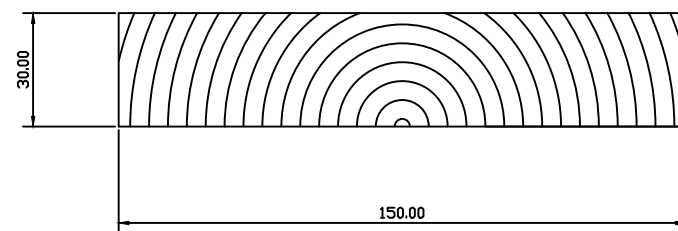
## D-1.3 Pläne Prüfserien



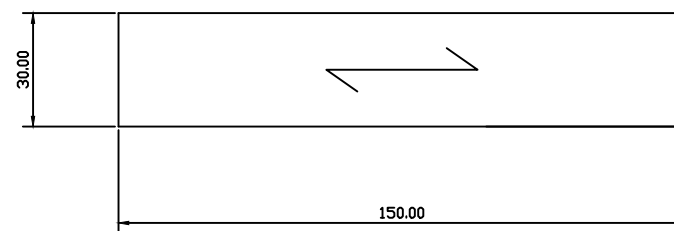




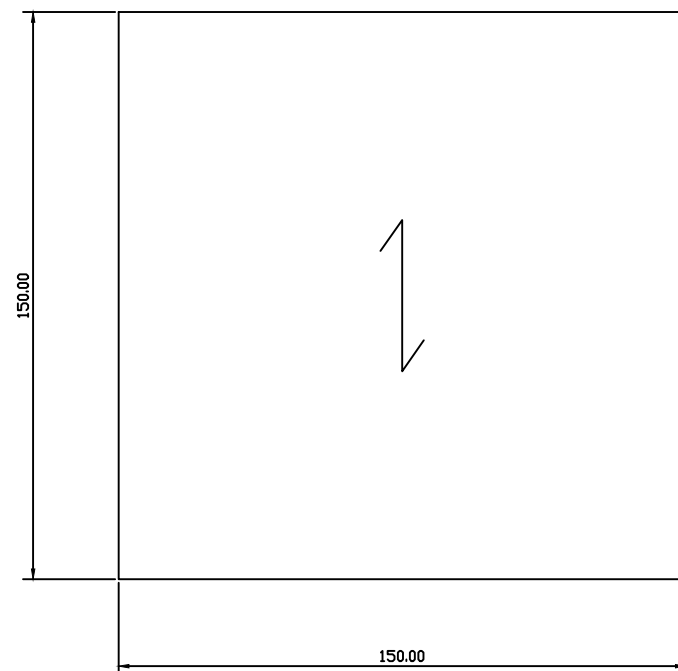
Ansicht Seite




Ansicht Hirn

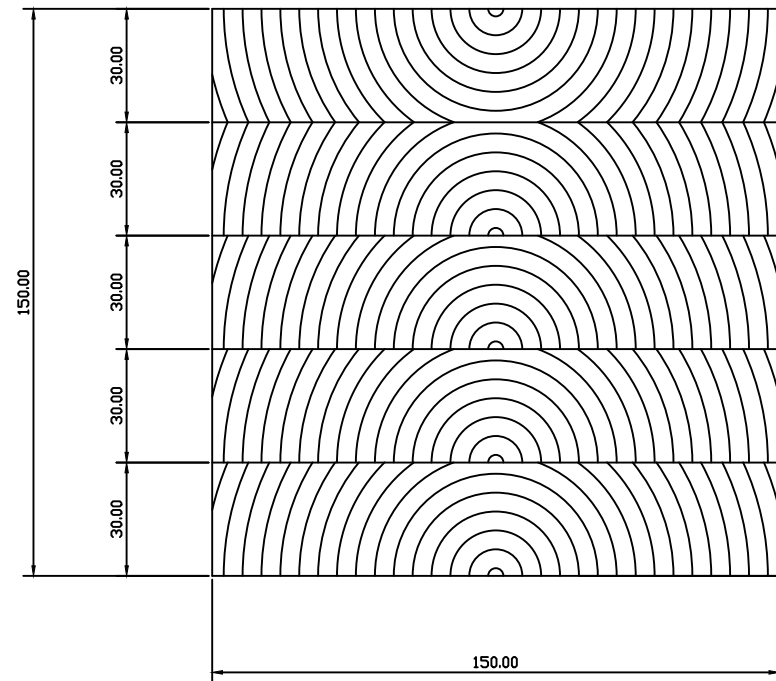


Grundriss

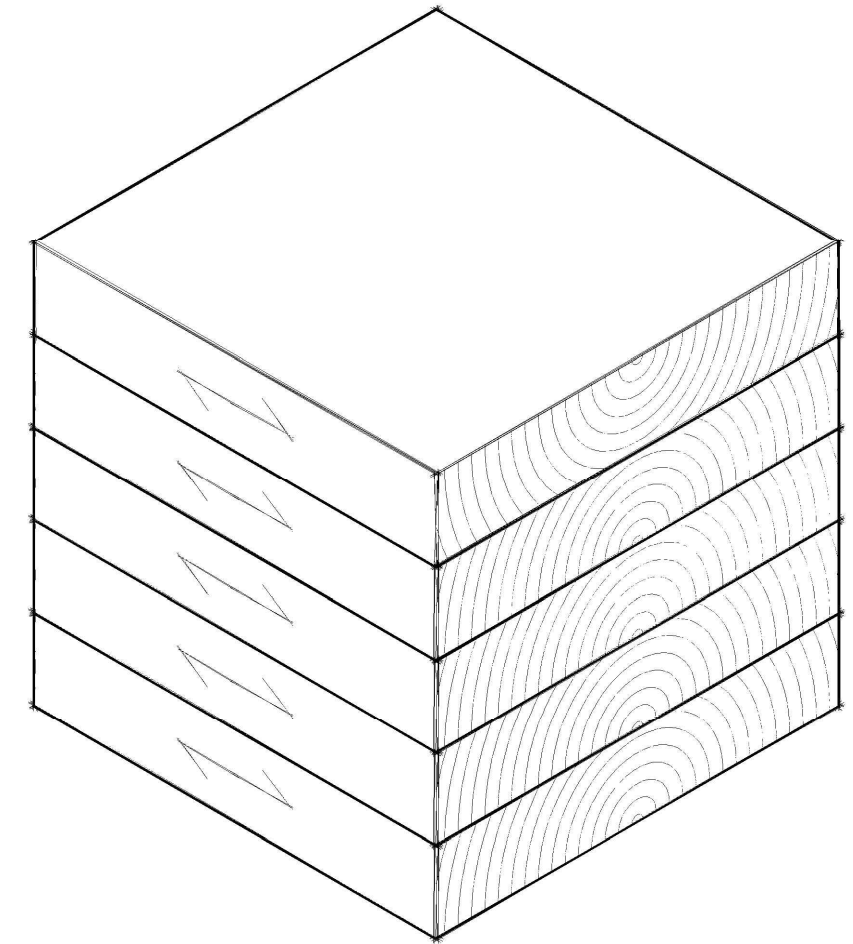
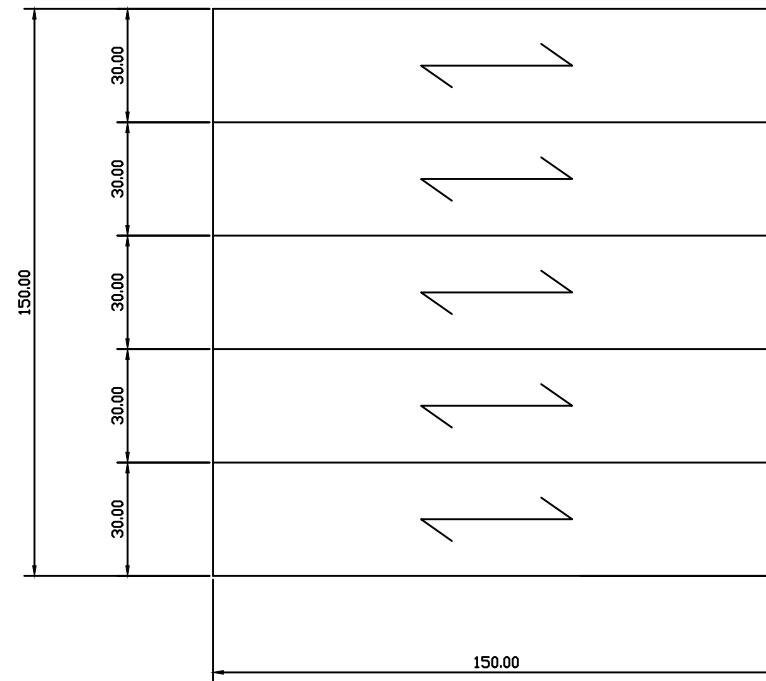


		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
	Technische Universität Graz Institut für Holztechnologie und Holzbau		
	Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269		
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngrößen von BSP</b>			
Assemblingpläne Serie 1			ZeichnungsNr.: <b>4a</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2

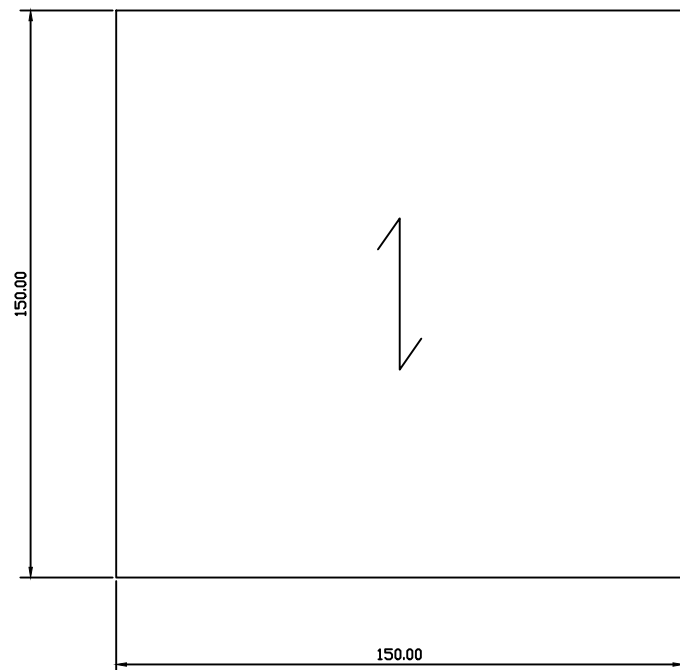
Ansicht Hirn




Ansicht Seite

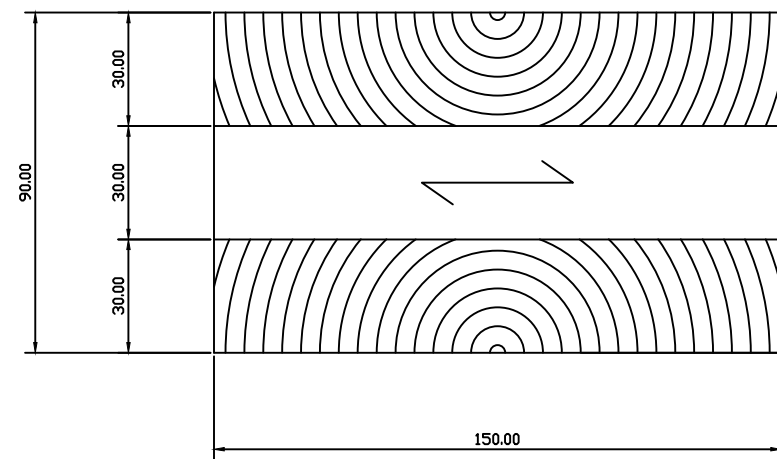


Grundriss

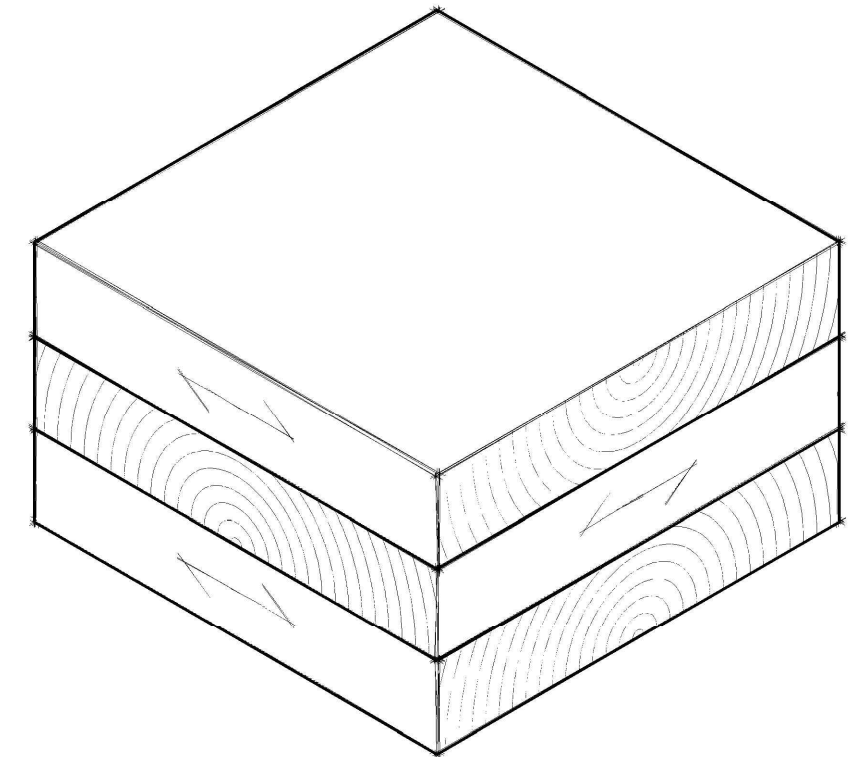
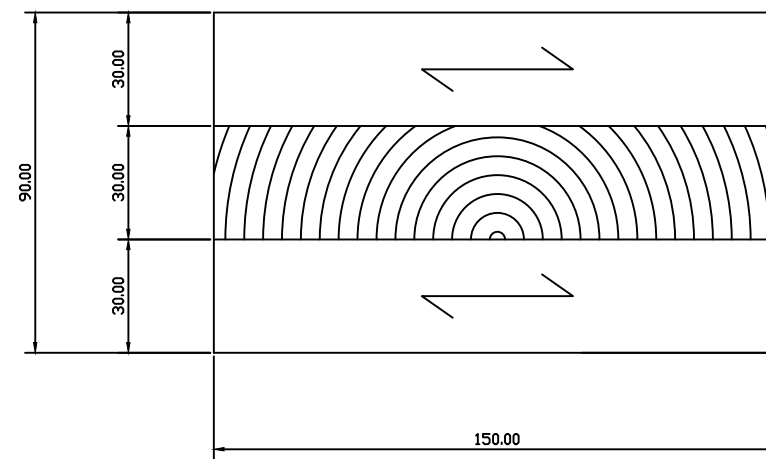


		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
		<b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269			
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
Querzugkenngößen von BSP			
Assemblingpläne Serie 2			ZeichnungsNr.: <b>4b</b>
Gez.: Lukas Jantscher		Maßstab: 1 : 2	

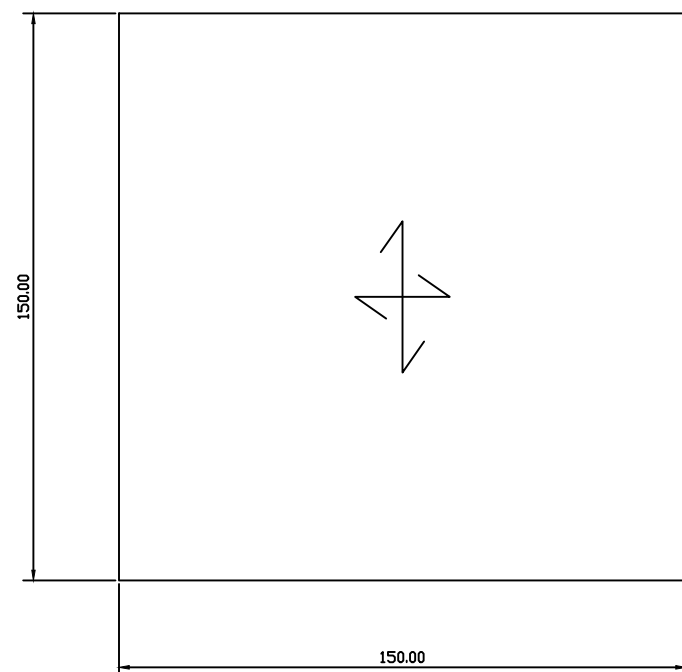
Ansicht Hirn




Ansicht Seite

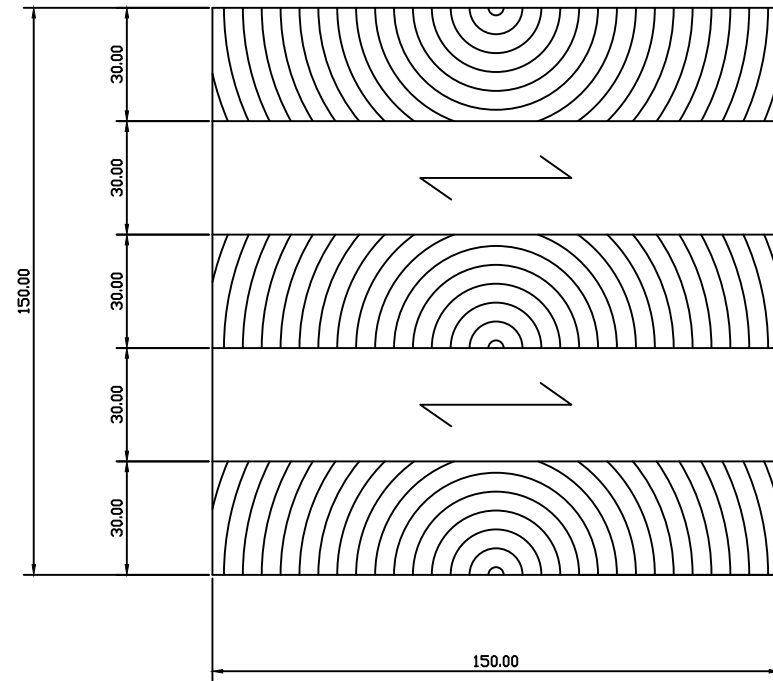


Grundriss

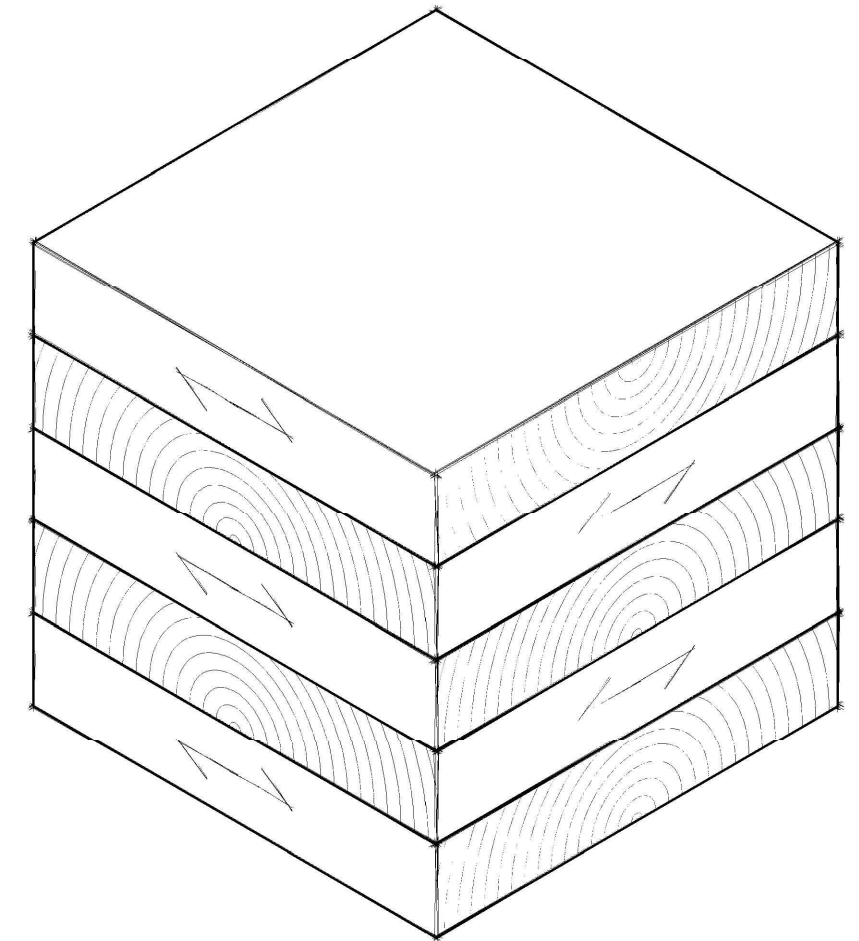
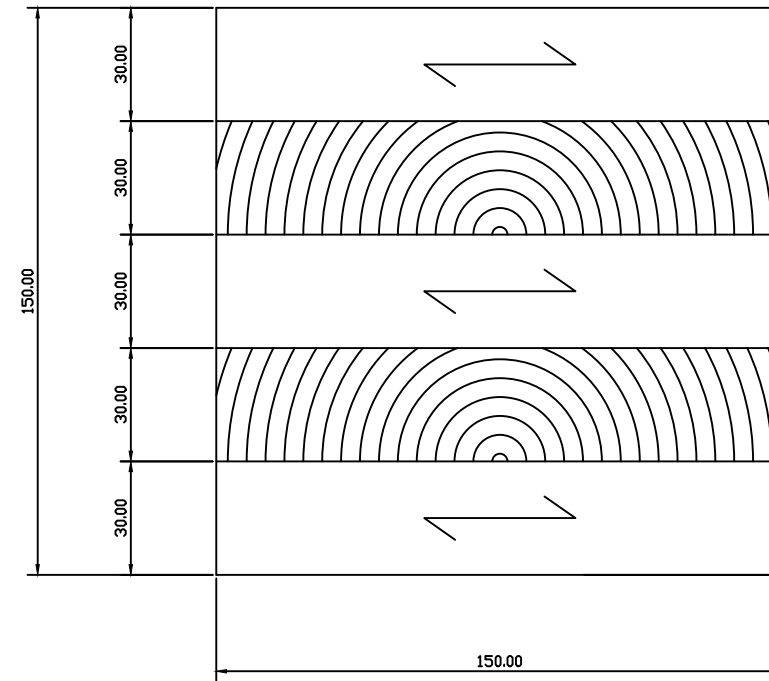


		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
		<b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269			
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
Querzugkenngrößen von BSP			
Assemblingpläne Serie 3			ZeichnungNr.: <b>4c</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2

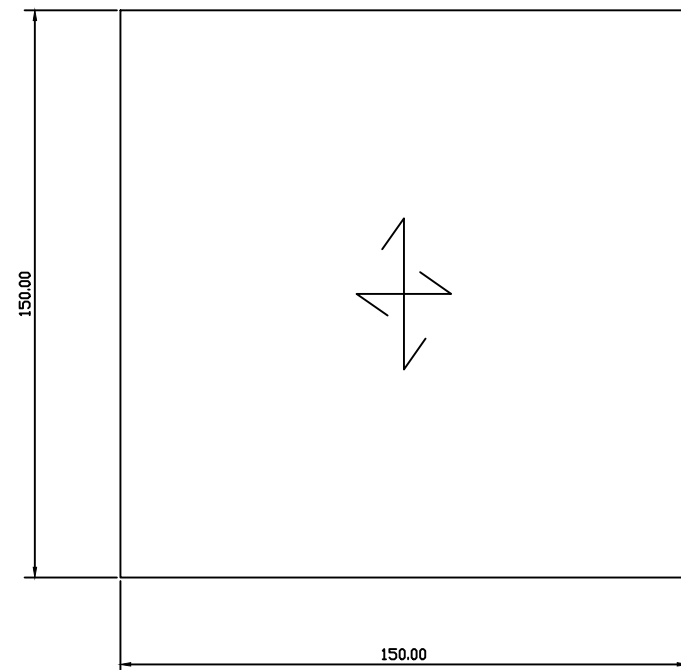
Ansicht Hirn




Ansicht Seite

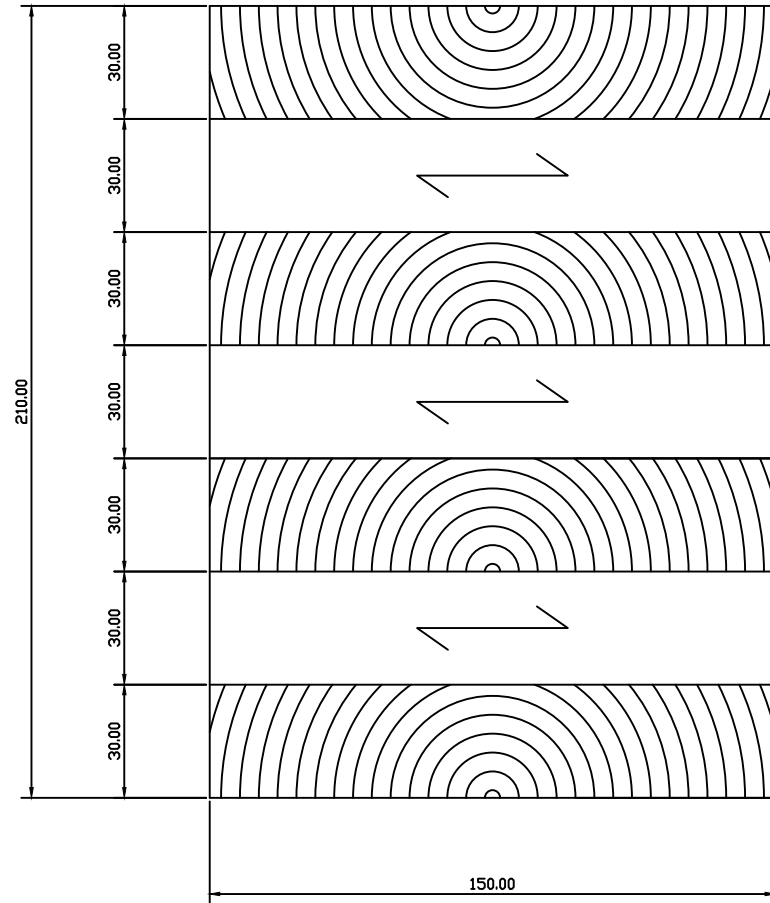


Grundriss

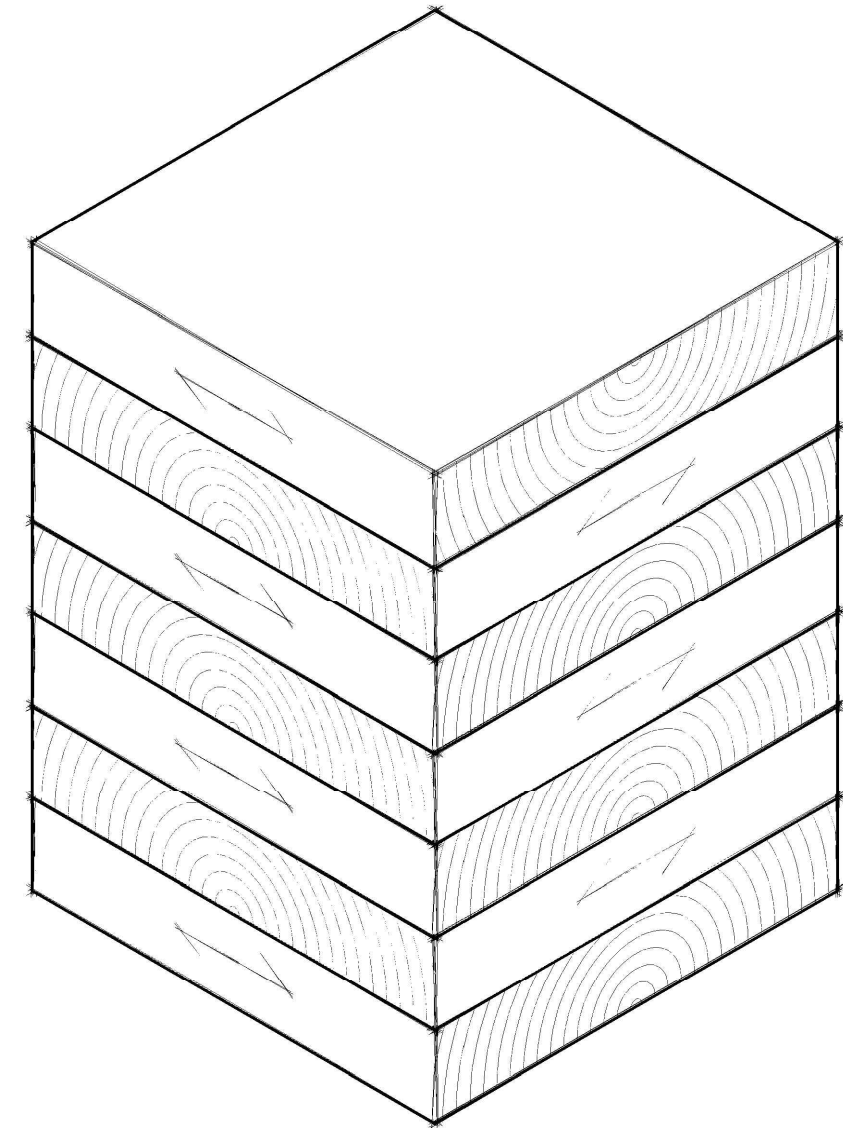
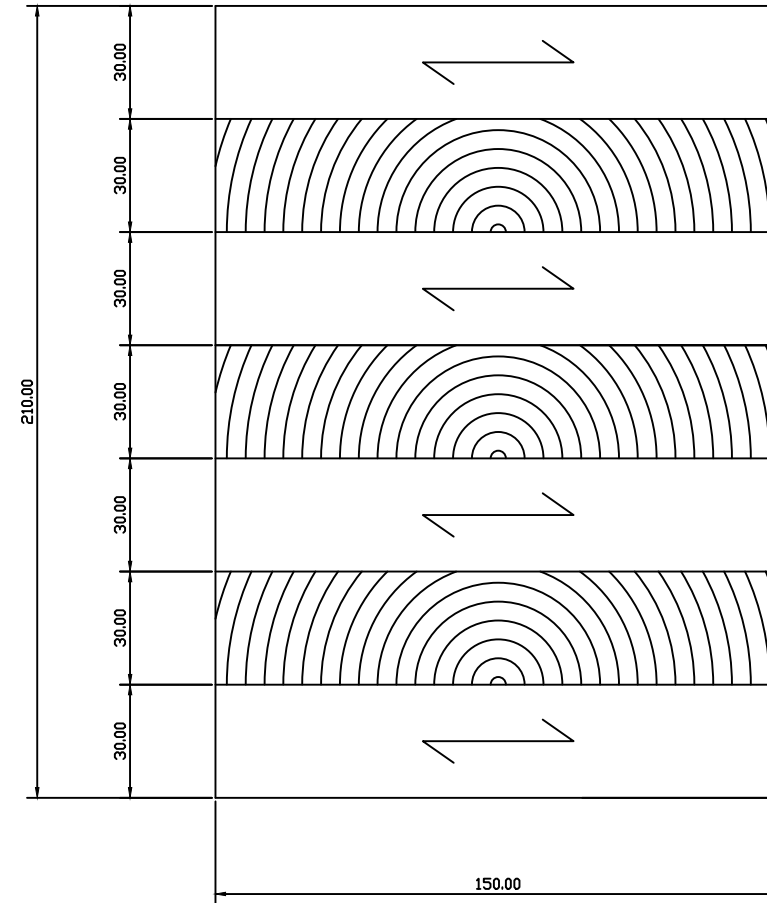


		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
		<b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
		Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269	
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
Querzugkenngößen von BSP			
Assemblingpläne Serie 4			ZeichnungNr.: <b>4d</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2

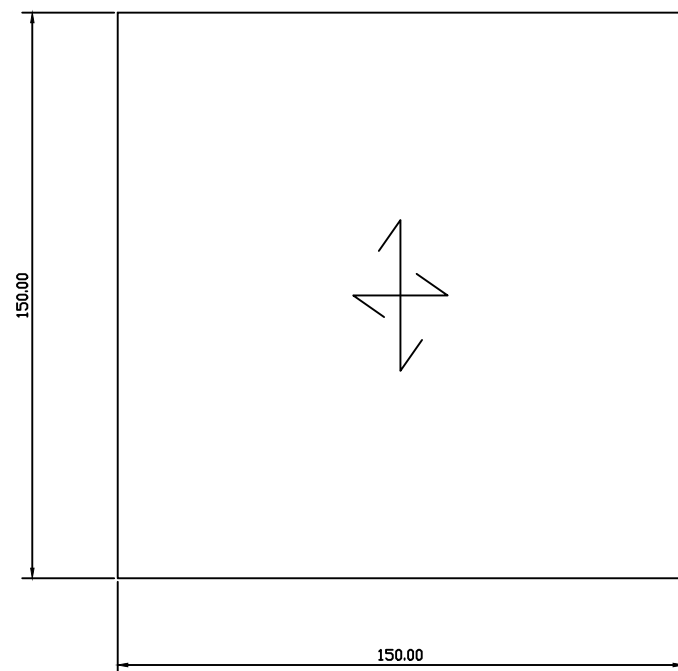
Ansicht Hirn




Ansicht Seite

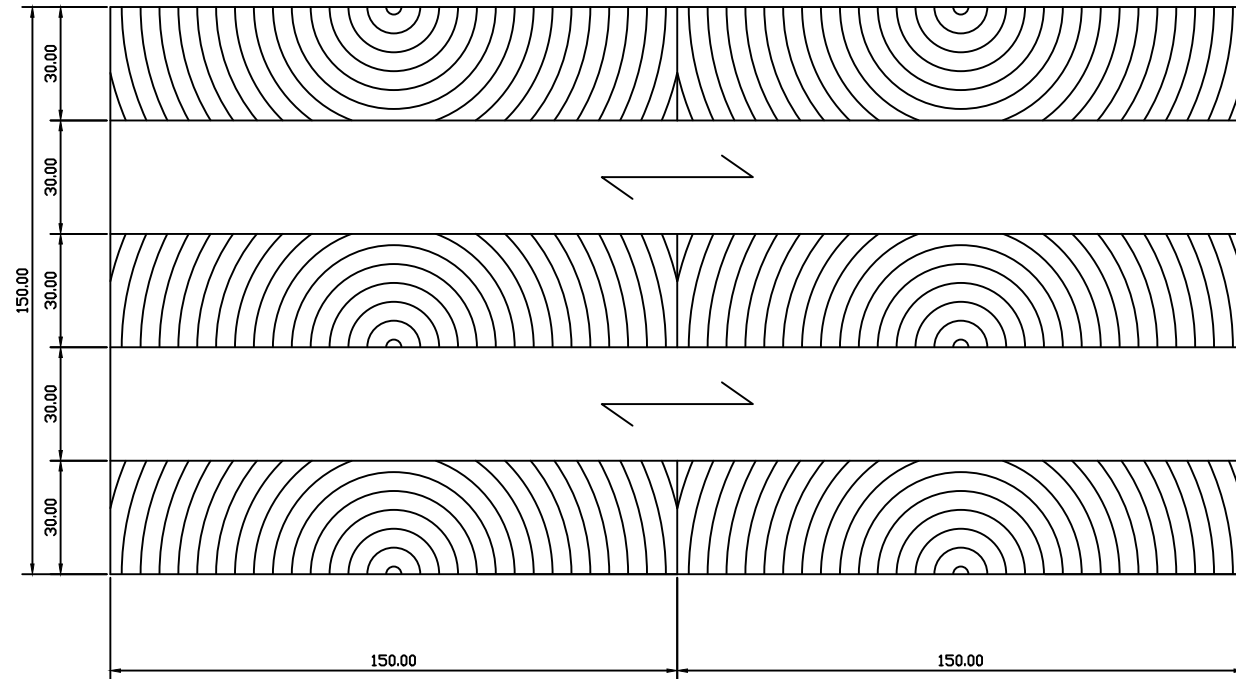


Grundriss

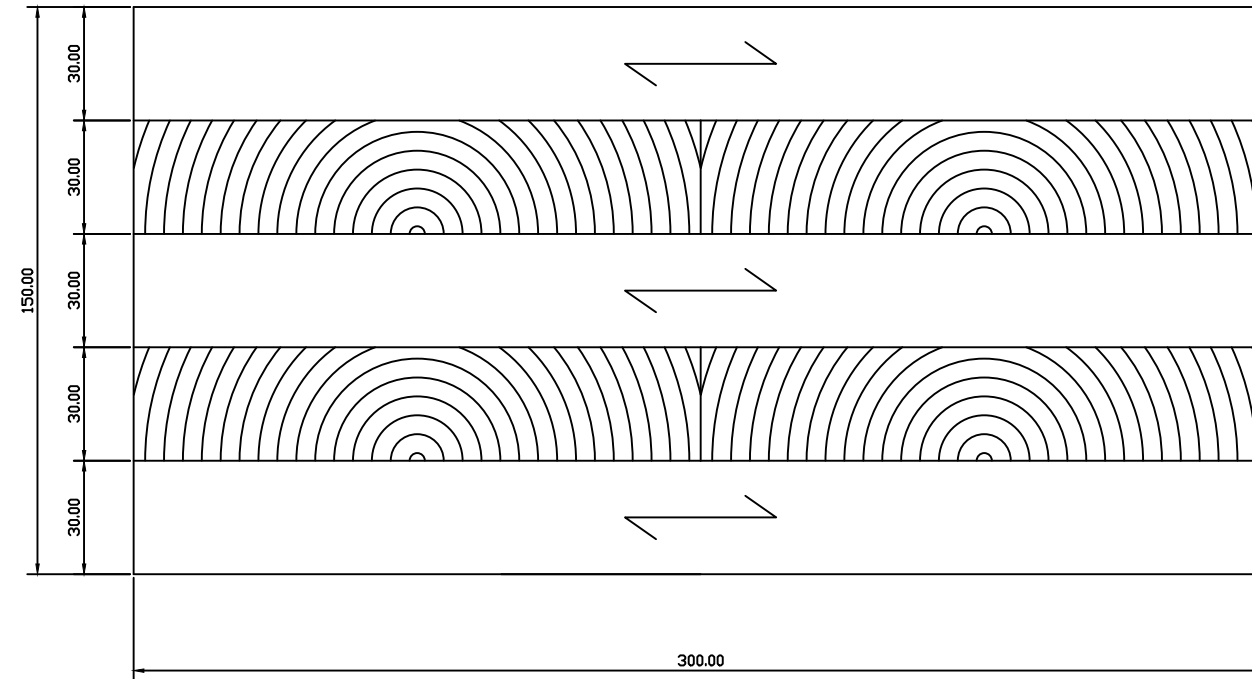


		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
		<b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau	
Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269			
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
Querzugkenngrößen von BSP			
Assemblingpläne Serie 5			ZeichnungsNr.: <b>4e</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2

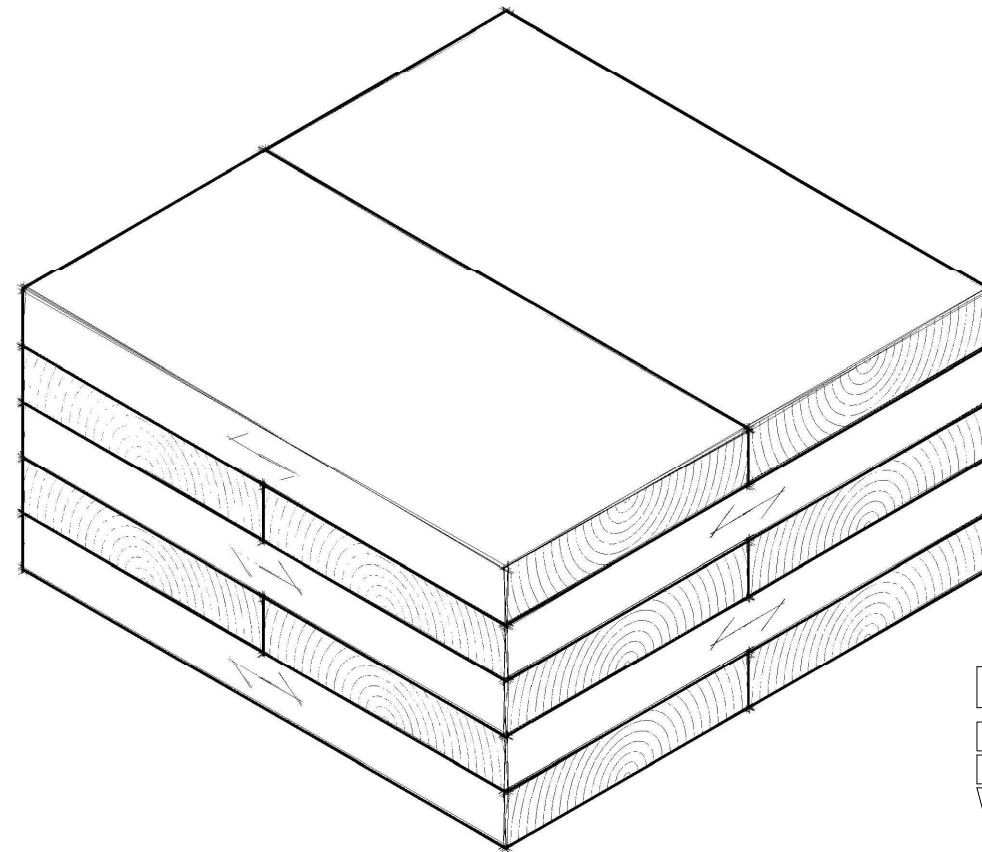
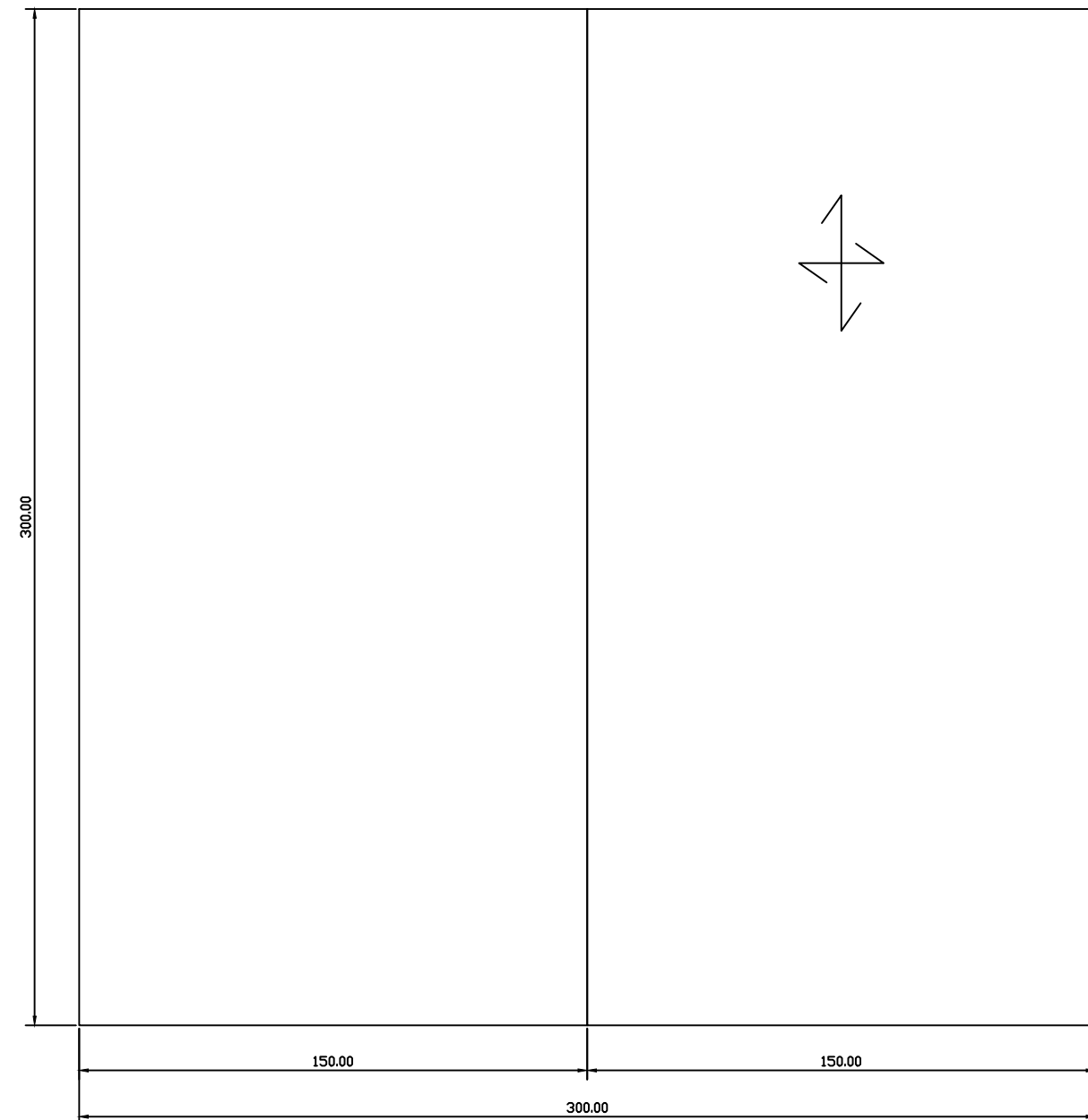
Ansicht Hirn




Ansicht Seite



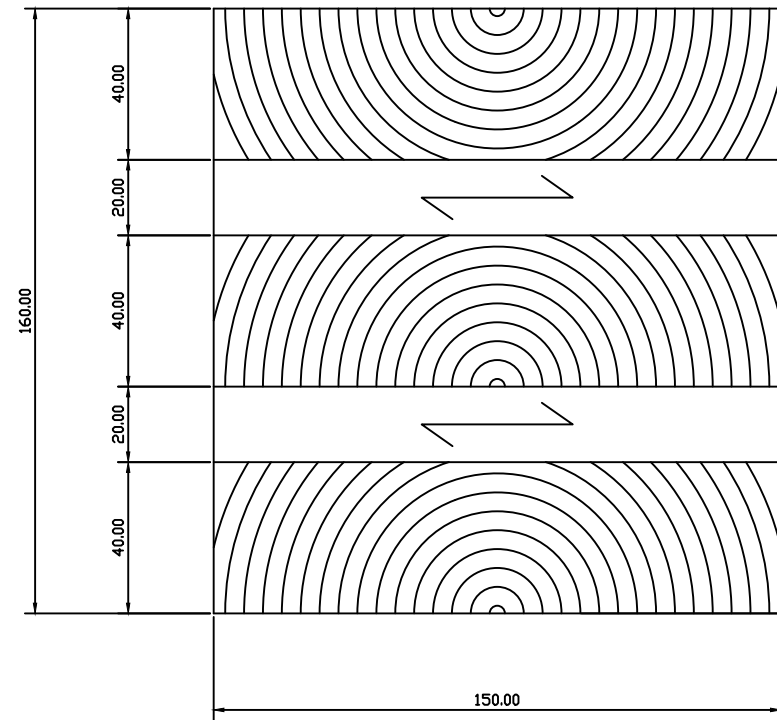
Grundriss



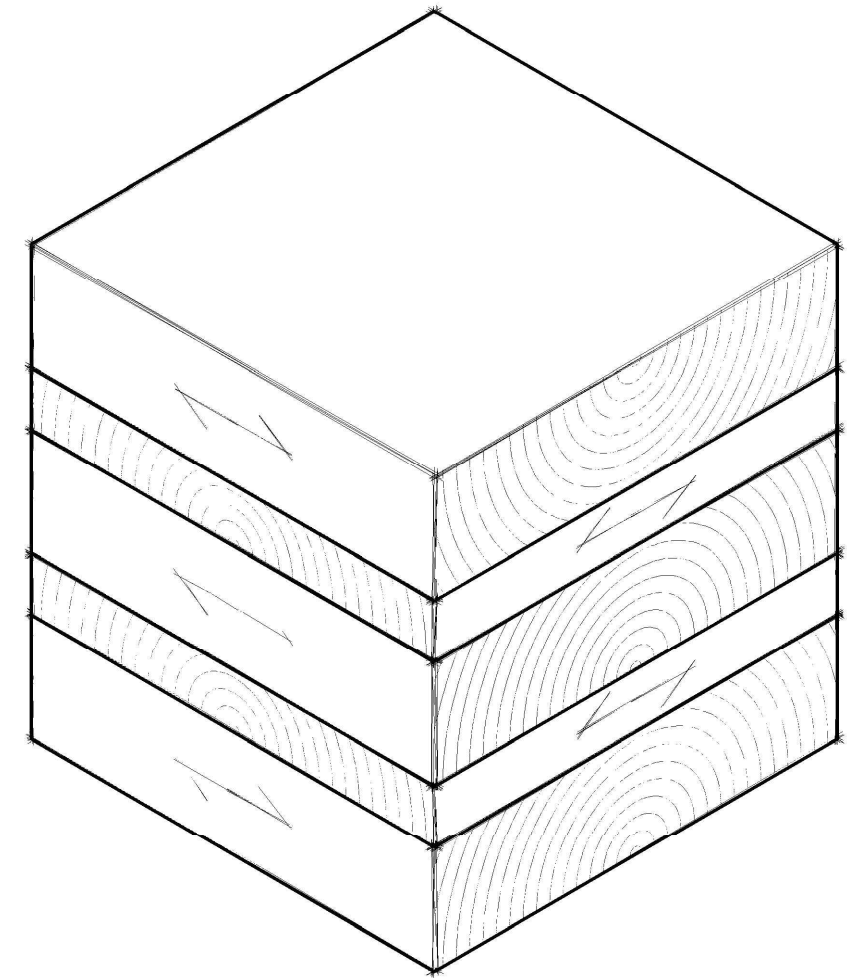
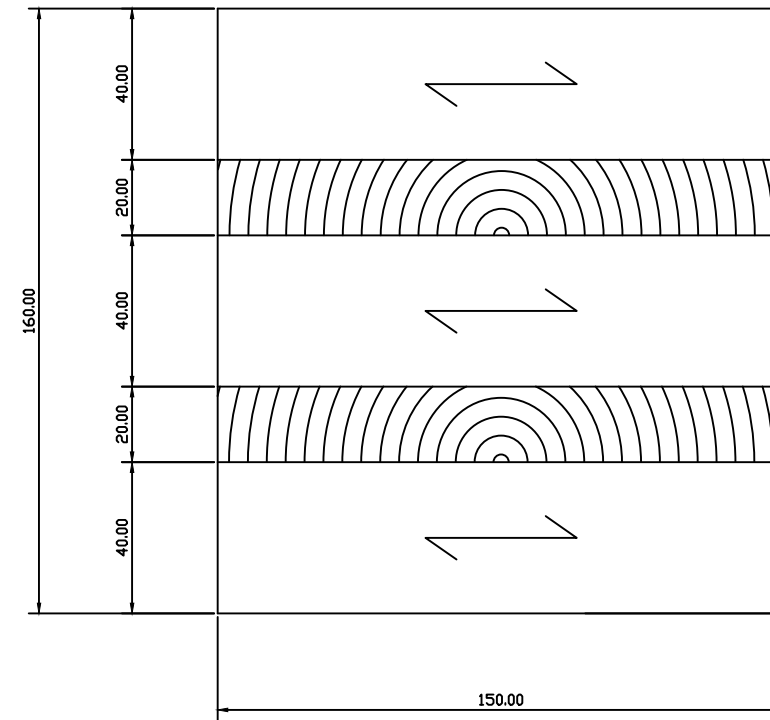
		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
 <b>Technische Universität Graz</b> Institut für Holztechnologie und Holzbau		Lukas Jantscher; BSc BSc	
		A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269	
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngößen von BSP</b>			
Assemblingpläne Serie 6			ZeichnungsNr.: <b>4f</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2



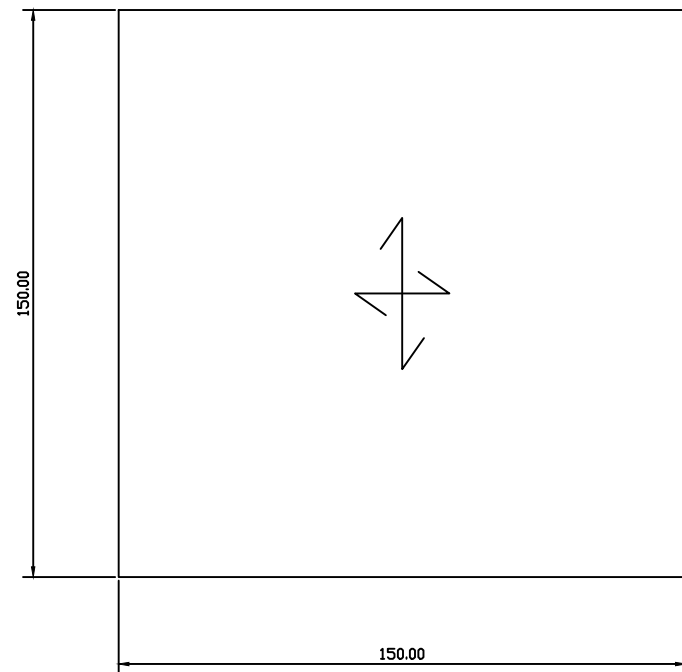
Ansicht Hirn




Ansicht Seite



Grundriss



		Blattform:	A3 297 x 420
gez. am:	2019-Juli-02		
freigegeben:	von Brandner, Reinhard am		
	Technische Universität Graz Institut für Holztechnologie und Holzbau		
	Lukas Jantscher; BSc BSc A-8010 Graz - Inffeldgasse 24 - 0664 / 52 86 269		
Planstand vom:	- 2019-Juli-23 2019-September-17	Masterarbeit:	Konstruktiver Ingenieurbau
		Projektbetreuung:	Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn Reinhard Brandner
<b>Querzugkenngrößen von BSP</b>			
Assemblingpläne Serie 7			ZeichnungNr.: <b>4g</b>
Gez.:	Lukas Jantscher	Maßstab:	1 : 2





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