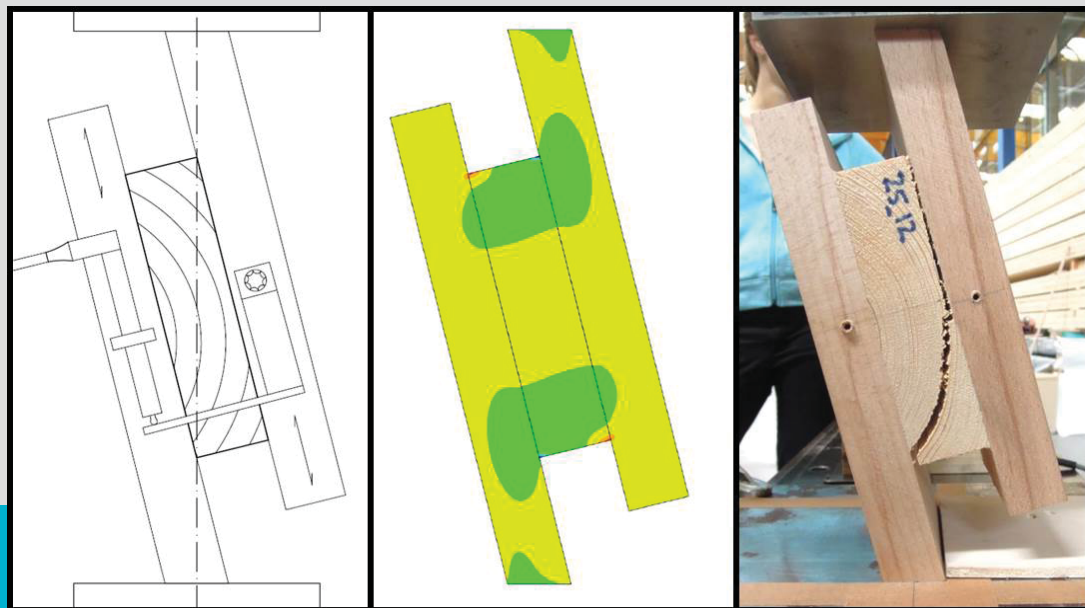


# Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettsperrholz

M-4-10/2014



**Thomas Ehrhart**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Thomas Ehrhart, BSc

**Materialbezogene Einflussparameter  
auf die Rollschubeigenschaften  
in Hinblick auf Brettsperrholz**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Institut für Holzbau und Holztechnologie

Ass. Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Reinhard Brandner



## **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

Bei Prof. Gerhard Schickhofer möchte ich mich für die interessante und ansprechende Gestaltung der Vorlesungen bedanken, die mein Interesse für den Holzbau geweckt und gefördert haben.

Für die fachlich ausgezeichnete und auch menschlich sehr angenehme Betreuung während der Erstellung meiner Masterarbeit, möchte ich Reinhard Brandner herzlich danken.

Während der Vorbereitung und Durchführung der Versuche habe ich von der tatkräftigen Unterstützung und den wertvollen Tipps von Bernd Heissenberger sehr stark profitieren können. Vielen Dank.

Für die Durchführung der numerischen Analyse möchte ich mich bei Gregor Silly bedanken. Sie stellt eine wichtige Ergänzung meiner Masterarbeit dar.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Maria und Martin, die mir – nicht nur während des Studiums – sehr viel Freiraum zur Entfaltung meiner Interessen gegeben und diese unterstützt haben. Danke.

Auch meinen Geschwistern Matthias, Christina und Ursula möchte ich für die lustige und entspannende Gesellschaft danken, die für mich sehr wichtig ist.

Danke Johanna, dafür dass du mir die Augen für Neues öffnest und hinter mir stehst, für die schöne Zeit und den Rückhalt. Danke.





## Kurzfassung

Aufgrund der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten, einem steigenden gesellschaftlichen Bewusstsein für Nachhaltiges Bauen, fortschreitendem technologischen Wissensstand sowie der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit gewinnt Brettsperrholz in der Baupraxis zunehmend an Attraktivität und Relevanz. Neben Kenntnis der Einwirkungen ist zur sicheren Bemessung von Tragkonstruktionen umfassendes Wissen über die Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe von Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit werden die materialbezogenen Einflussparameter auf die – insbesondere für Brettsperrholz relevanten – Rollschubeigenschaften nach eingehender Literaturrecherche identifiziert, geeignete Prüfkonfigurationen analysiert und anhand einer Prüfstudie die Rollschubfestigkeiten und -moduln der Holzarten Fichte, Kiefer, Buche, Birke, Pappel und Esche ermittelt. Darüber hinaus wird der Einfluss der Rohdichte, der Lage des Brettes im Stamm sowie des geometrischen Verhältnisses Brettbreite zu Brettstärke untersucht und das Verhalten von auf Rollschub beanspruchten Brettssystemen geprüft und beschrieben. Der Verlauf der Rollschubeigenschaften entlang von Brettern wird durch weitere Versuche beleuchtet. Die Ergebnisse aus insgesamt 380 Prüfungen können bisherige Untersuchungen teilweise bestätigen bzw. ergänzen und tragen so zu einem besseren Verständnis für das Verhalten von Holz unter Rollschubbelastung bei.

## Abstract

Due to numerous possible applications, an increasing social consciousness for sustainable constructions, advancing technological knowledge and economic competitiveness Cross Laminated Timber has gained popularity and relevance in the construction industry. Beside knowledge about appearing loads, comprehensive information regarding the mechanical properties of used materials is of the highest importance for a safe design. Material related influencing parameters on the rolling shear behaviour – especially relevant for Cross Laminated Timber – are identified and potential test configurations analysed in the present work. Rolling shear strength and modulus of spruce, pine, beech, birch, poplar and ash are ascertained as well as the influence of density, sawing pattern and the relation width vs. thickness of the board. The behaviour of systems containing more than one board and the variation of rolling shear properties along single boards are also part of this work. The results of in total 380 tests confirm and complement previous studies and thus contribute to a better understanding of the behaviour of wood under rolling shear stress.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>HOLZ UND BRETTSPERRHOLZ (BSP) .....</b>	<b>1</b>
1.1.1	Struktur und Materialeigenschaften des Holzes .....	1
1.1.2	Brettsperrholz .....	8
<b>1.2</b>	<b>ROLLSCHUB .....</b>	<b>15</b>
1.2.1	Definition und Versagensmechanismus .....	16
1.2.2	Auftreten und Berechnung .....	17
<b>1.3</b>	<b>EINFLUSSPARAMETER AUF DIE ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN .....</b>	<b>26</b>
1.3.1	Holzart .....	26
1.3.2	Rohdichte.....	27
1.3.3	Position des Brettes im Stamm.....	28
1.3.4	Geometrische Verhältnisse des Einzelbrettes .....	35
1.3.5	Holzfeuchte.....	37
<b>1.4</b>	<b>UNTERSUCHUNG GEEIGNETER PRÜFKONFIGURATIONEN .....</b>	<b>39</b>
1.4.1	Versuche mit Einzelproben .....	39
1.4.2	Systemversuche .....	51
1.4.3	Festlegung der Prüfkongfiguration und FE-Analyse.....	54
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>61</b>
<b>2.1</b>	<b>PRÜFPLANUNG.....</b>	<b>61</b>
2.1.1	Prüfplan .....	62
2.1.2	Definition untersuchter Parameter, Serieneinteilung und Prüfumfang .....	63
<b>2.2</b>	<b>PRODUKTION DER PRÜFKÖRPER .....</b>	<b>68</b>
2.2.1	Vorbereiten der Bretter .....	68
2.2.2	Herstellen der Holzlaschen .....	69
2.2.3	Zusammenbau der Prüfkörper.....	69
<b>2.3</b>	<b>ERMITTLUNG DER PRÜFDATEN .....</b>	<b>71</b>
2.3.1	Holzfeuchte .....	71
2.3.2	Rohdichte.....	71
2.3.3	Jahringlage.....	72
2.3.4	Rollschubfestigkeit.....	72
2.3.5	Rollschubmodul.....	73



2.4	DURCHFÜHRUNG DER PRÜFUNGEN .....	74
2.4.1	Ablauf der Prüfungen .....	74
2.4.2	Ermittlung des Rollschubmoduls .....	76
2.5	METHODIK DER AUSWERTUNG.....	79
2.5.1	Verwendete Abkürzungen .....	79
2.5.2	Detektion und Elimination von Ausreißern .....	79
2.5.3	Verteilungs- und Regressionsfunktionen.....	80
2.5.4	Signifikanztests .....	81
3	PRÜFUNGEN UND ERGEBNISSE .....	82
3.1	ÜBERBLICK DER ERMITTELTEN ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN .....	82
3.2	SERIENSPEZIFISCHE ERGEBNISSE .....	86
4	DISKUSSION.....	112
4.1	ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN UNTERSCHIEDLICHER HOLZARTEN.....	112
4.2	ZUSAMMENHANG VON ROHDICHTE UND ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN.....	116
4.3	EINFLUSS DER JAHRRINGLAGE AUF DIE ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN .....	119
4.4	EINFLUSS DES $B / D$ -VERHÄLTNISES AUF DIE ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN .....	124
4.5	ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN IN MEHRBRETT-SYSTEMEN.....	127
4.6	VERLAUF DER ROLLSCHUBEIGENSCHAFTEN ENTLANG DES BRETTES .....	130
4.7	ZUSAMMENHANG VON ROLLSCHUBFESTIGKEIT UND -MODUL.....	135
5	CONCLUSIO .....	137
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	138
7	ANHANG .....	142



# 1 EINLEITUNG

In diesem allgemeinen Kapitel werden jene Grundlagen erläutert und diskutiert, die in weiterer Folge zur Planung und Durchführung der Untersuchungen notwendig sind.

Zuerst wird die mikroskopische Struktur und die Anatomie des Roh- und Werkstoffes Holz beschrieben und daraus die anisotropen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften begründet. Neben der Definition von Brettsperrholz und des – für diese Arbeit zentralen – Begriffes Rollschub, seinem Zustandekommen in Holzbauteilen sowie der exemplarischen Berechnung einer Brettsperrholzplatte, soll auch kurz auf das Tragverhalten anderer, „künstlicher“ Faserverbundwerkstoffe eingegangen und eventuell vorhandene Parallelen zu Holz gezogen werden.

Des Weiteren werden jene Parameter identifiziert und besprochen, die maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften von Holz im Allgemeinen und auf die Rollschubeigenschaften im Besonderen besitzen bzw. von denen ein solcher erwartet wird.

Schließlich werden einige Prüfkonfigurationen, die bereits in früheren Arbeiten – sei es numerisch, sei es in tatsächlichen Prüfstudien – Anwendung fanden, vorgestellt und ihre Eignung für die durchzuführende Studie diskutiert.

## 1.1 Holz und Brettsperrholz (BSP)

---

### 1.1.1 Struktur und Materialeigenschaften des Holzes

Der Querschnitt durch einen Holzstamm lässt bereits mit freiem Auge makroskopisch den allgemeinen Aufbau des Holzkörpers erkennen (Abb. 1-1). Von außen nach innen können unterschieden werden:

- die aus Borke und Bast bestehende Rinde;
- das makroskopisch nicht wahrnehmbare Kambium;
- der Holzkörper, in Kern und Splint unterteilt;
- das innenliegende Mark.



Abb. 1-1: Querschnitt des Holzes und seine makroskopischen Merkmale nach [1]

[2], [3]

Gilt es die Mikrostruktur von Holz zu beschreiben, so muss grundsätzlich zwischen den entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelhölzern mit ihrem vergleichsweise einfachen, regelmäßigen Aufbau (Abb. 1-2) und den deutlich jüngeren, über spezialisierte Zelltypen verfügenden, Laubhölzern (Abb. 1-3) unterschieden werden.

Ahnen heutiger Koniferen (griech.: conifer = zapfentragend) traten erstmals gegen Ende des Paläophytikums vor 280 Millionen Jahren im Perm auf. Deren Bauprinzipien glichen jenen der heutigen Nadelhölzer bereits sehr. Ihre Samen sind und waren ungeschützt, weshalb sie als Gymnospermen bezeichnet werden (griech.: gymnós = nackt, spérma = Same).

Bei Nadelhölzern werden die drei wesentlichen Funktionen des Holzteiles der Bäume, nämlich Tragfunktion, Wasserleitung und Stoffspeicherung, von lediglich zwei Zellarten erfüllt. Den Tracheiden, die etwa 90 bis 95 % des Volumens bei sämtlichen Nadelhölzern ausmachen, obliegt sowohl die mechanische Festigung als auch die Wasserleitfunktion. Parenchymzellen dienen ergänzend dazu der Speicherung von Nährstoffen.

Die Anforderungen an Gestalt und Eigenschaften für Zellen der Tragfunktion und jener der Wasserleitung widersprechen sich allerdings: Während für die Wasserleitung weitlumige, dünnwandige Zellen aufgrund der größeren Durchflusskapazität vorteilhaft sind, erfüllen dickwandige und damit englumige Zellen die Tragfunktion wesentlich besser. Dies führt dazu, dass zu Beginn der Vegetationsperiode, d.h. beispielsweise alljährlich nach den winterlichen Ruhepausen in den gemäßigten Klimazonen, wenn ein erhöhter Wassertransport notwendig ist, entsprechend weitlumiges, dünnwandiges – als Frühholz bezeichnetes – Tracheidengewebe gebildet wird. Gegen Ende der Wachstumsperiode sinkt der Wasserbedarf und vornehmlich für die Festigungsfunktion verantwortliches Holz – das Spätholz – wird gebildet. Da an eine Spätholzschicht jeweils die Frühholzschicht des folgenden Jahres angrenzt, und diese sich aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus in Farbe und Härte unterscheiden, kommt es zur charakteristischen Jahrringbildung.



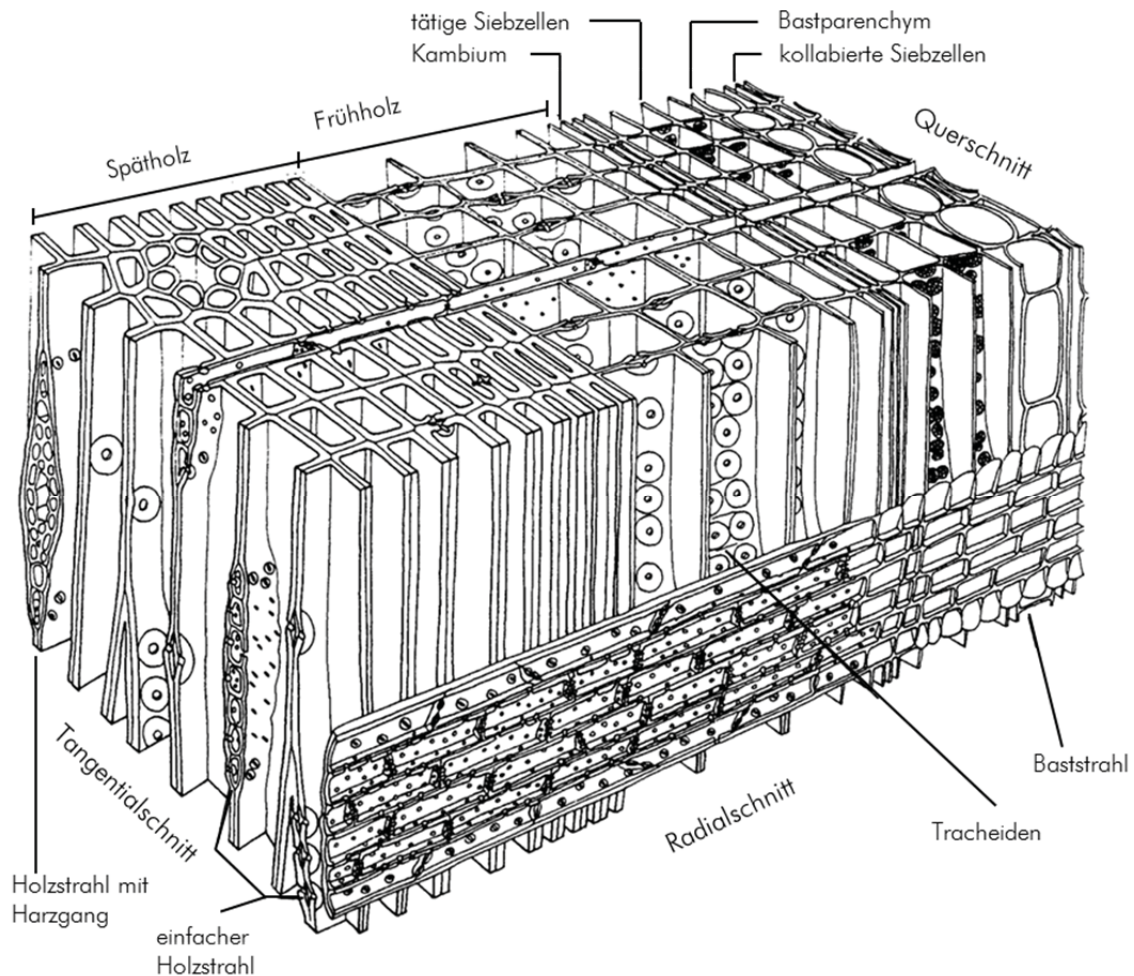


Abb. 1-2: Mikrostruktur von Nadelholz (hier Lärche) nach [4]

Laubbözer sind entwicklungsgeschichtlich deutlich jünger als Nadelhölzer. Vor rund 100 Millionen Jahren begann am Ende der oberen Kreide in tropischem Klima die Entwicklung der Angiospermen (griech.: angeíon = Gefäß), also von Pflanzen, die ihre Samen in eine Frucht einhüllen. Über einen Zeitraum von etwa 25 Millionen Jahren entwickelten sich daraus die Ahnen der heutigen Laubbäume.

Bei Laubbözern lässt sich die höhere Entwicklung aus der Spezialisierung der Zelltypen und einer damit einhergehenden Funktionstrennung erkennen. Wie bei Nadelhölzern sind weiterhin Parenchymzellen für die Nährstoffspeicherung und Leitung zuständig. Fasertracheiden werden zusammen mit den Libriformfasern als Holzfasern bezeichnet, welche für die mechanische Festigung verantwortlich sind. Spezialisierte Gefäßzellen und (bei bestimmten Holzarten) unvollständig dazu entwickelte Gefäßtracheiden sowie vasizentrische Tracheiden übernehmen die Wasserleitungsfunktion. Je nach Weite der Lumina der Gefäße wird in makropore ( $> 100 \mu$ ) und mikropore Gefäße ( $< 100 \mu$ ) unterschieden. Wenn die Gefäße, wie dies meist der Fall ist, gleichmäßig im Holz verteilt sind, spricht man von zerstreut-makro/mikroporem Holz bzw. Zerstreutporern. Einige Holzarten besitzen jedoch im Frühholz makropore und im Spätholz mikropore Gefäße. In diesem Fall liegt ein Ringporer vor.

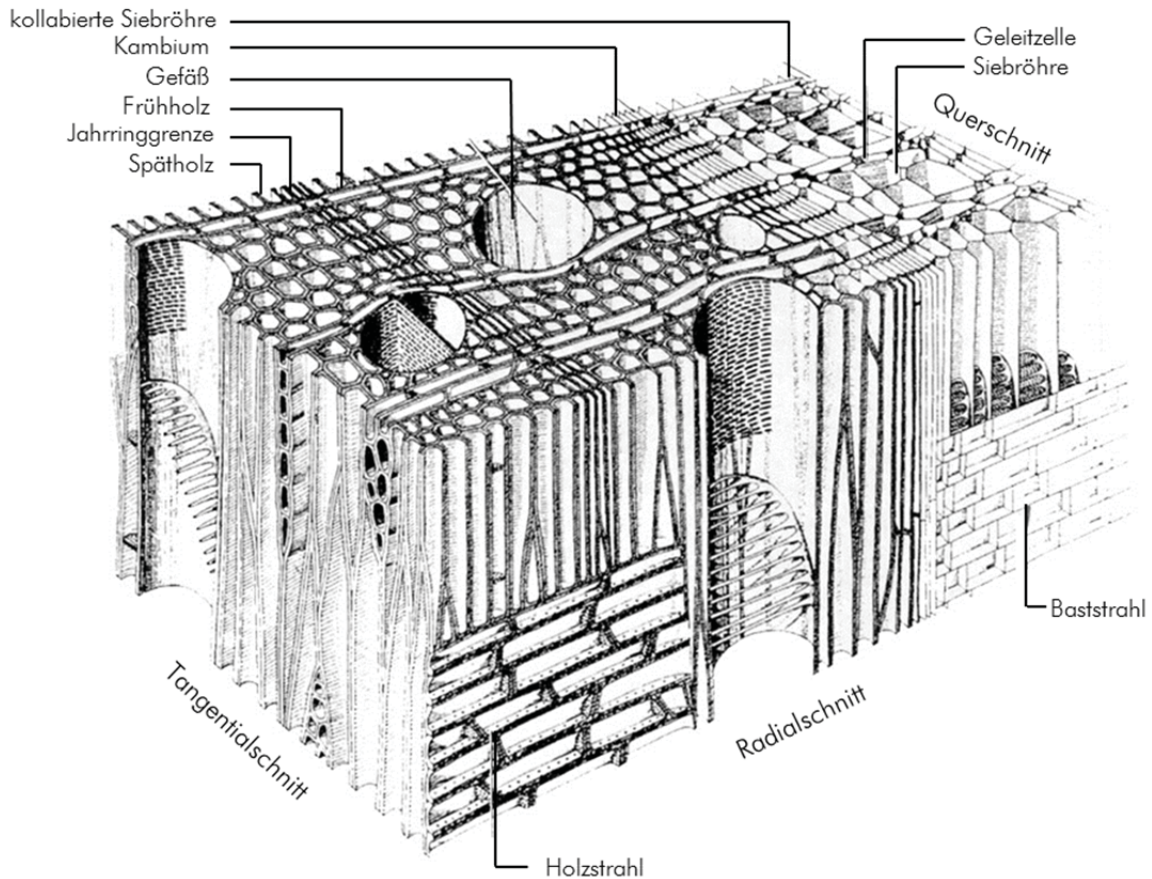


Abb. 1-3: Mikrostruktur von Laubholz (hier Birke) nach [4]

Um die beschriebenen Unterschiede in der Mikrostruktur zu verdeutlichen, sind in Abb. 1-4 das Nadelholz Fichte sowie die Laubhölzer Birke mit zerstreuter Anordnung der Makroporen und Esche als Vertreter der Ringporer in 15-facher Vergrößerung dargestellt.



Abb. 1-4: Mikroquerschnitt von Fichte (Nadelholz, links), Birke (Zerstreutporer, mitte) und Esche (Ringporer, rechts) aus [5]; M = 1:15

Aufbau und Struktur des Holzes resultieren aus dem sekundären Dickenwachstum durch im Kambium erzeugte Zellen. Wegen der Orientierung der Zellfasern in Richtung der Stammachse und dem im Vergleich zur Festigkeit der einzelnen Faser geringen Zusammenhalt der Fasern untereinander

durch die Lignin- bzw. Hemizellulose-Matrix hängt die Festigkeit von Holz sehr stark von der Belastungsrichtung ab.

[6] folgert aus seinen Berechnungen an realitätsnahen Strukturmodellen, dass die mechanischen Eigenschaften wesentlich davon abhängen, inwieweit die Mittellamelle, also die Schicht zwischen Früh- und Spätholzzellen, aktiviert werden kann. Er stellt fest, dass sich eine äußere Zugbelastung zu 95 % auf die Mittellamelle überträgt, wenn die Belastungsrichtung parallel zur Faser ist. Bei radialer bzw. tangentialer Richtung liegt der Anteil bei nur noch 46 bzw. 13 %, auch sind die Festigkeiten in diesen Fällen gegenüber der faserparallelen stark reduziert.

In Abb. 1-5 sind exemplarisch mögliche Belastungsrichtungen dargestellt. Die Bezeichnung erfolgt dabei durch zwei Indizes, wobei ersterer die Art der Belastung (Zug „t“, Druck „c“, Biegung „m“ oder Schub „v“), der zweite deren Richtung (in Faserrichtung „0“, normal zur Faser „90“) definiert.

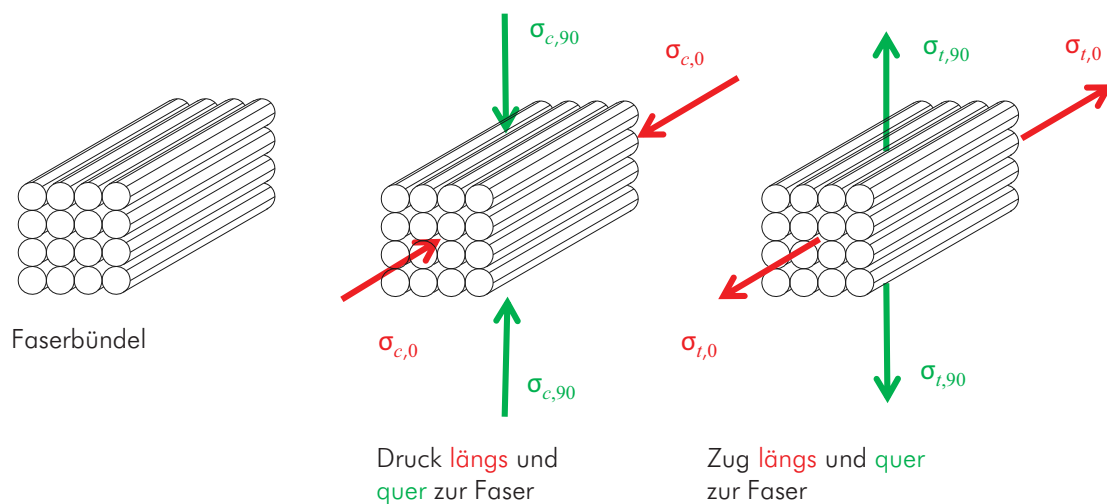


Abb. 1-5: Holzfaserbündel unter unterschiedlichen Belastungen

Aufgrund annähernd radial-anisotropen Materialverhaltens ist die Einführung eines zylindrischen Koordinatensystems mit den ausgezeichneten Richtungen „längs“, „radial“ und „tangential“ zur Beschreibung von Festigkeit und Steifigkeit zweckmäßig (Abb. 1-6).

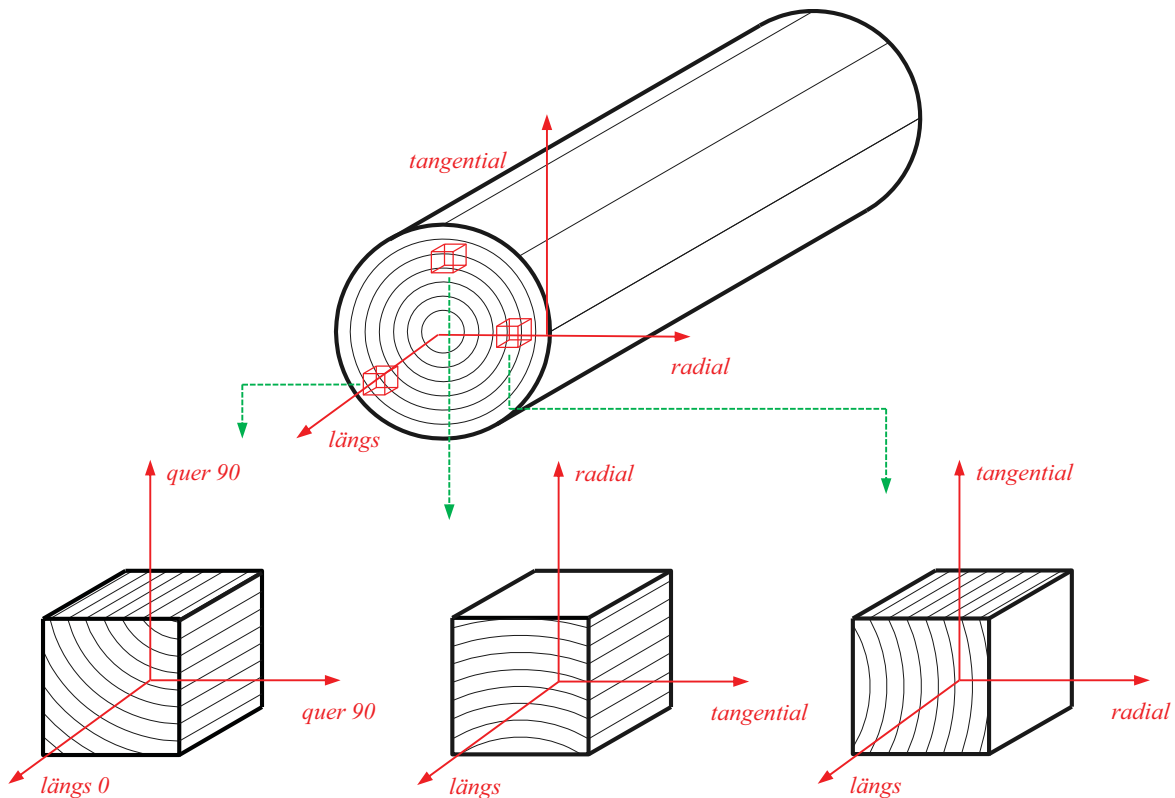


Abb. 1-6: Zylindrisches Koordinatensystem und zweckmäßige Bezeichnungen nach [7]

Für die statische Berechnung ist eine weitere Vereinfachung sinnvoll: Die beiden Richtungen „tangential“ und „radial“, die sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen, können zur Richtung „quer“ zusammengefasst werden.

In Tab. 1-1 sind mittlere Werte für Steifigkeiten und Festigkeiten von Fichte, Birke und Esche angegeben. Einerseits sind die unterschiedlichen Größen bei verschiedenen Holzarten, andererseits die Richtungsabhängigkeit der Materialkennwerte leicht erkennbar.

Tab. 1-1: Mittlere Festigkeiten und Elastizitätszahlen von Fichte, Birke und Esche aus [8]

		Fichte	Birke	Esche
$E_{0,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	11.000	16.500	13.400
$E_{90,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	550	800	1100
$f_{t,0,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	90,0	137,0	165,0
$f_{t,90,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	2,7	7,0	7,0
$f_{c,0,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	50,0	51,0	52,0
$f_{c,90,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	5,8	-	11,0
$f_{m,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	72,0	147,0	120,0
$f_{v,0,\text{mean}}$	N/mm <sup>2</sup>	6,7	12,0	12,8

Durch die Wachstumsbedingungen aber auch durch natürliche Merkmale wie beispielsweise Äste, Harzgänge oder Buchs werden die mechanischen Eigenschaften von Holz stark beeinflusst. Die allgemeinen Anforderungen an die Sortierung von Bauholz werden durch ÖNORM EN 14081-1 [9] geregelt. Für die Qualitätssortierung von Nadelholz gilt beispielsweise ÖNORM DIN 4074-1 [10], darin werden die Klassen S7, S10 und S13 definiert und die jeweiligen Anforderungen hin-

sichtlich Ästen, Faserneigung, Markröhre, Jahringbreite, Wuchs, Risse, Krümmung, Insektenbefall, Fäule, Verfärbung und Sonstigem definiert.

Durch ÖNORM EN 1912 [11] erfolgt die Zuweisung der Sortierklassen zu Festigkeitsklassen, die wiederum in ÖNORM EN 338 [12] geregelt sind und für die Bemessung von tragenden Konstruktionen herangezogen werden (Tab. 1-2).

Tab. 1-2: Charakteristische mechanische Eigenschaften von Schnittholz der Klassen C16, 24 und 30 nach [13]

			C16	C24	C30
Biegung	$f_{m,k}$	N/mm <sup>2</sup>	16,0	24,0	30,0
Zug	$f_{t,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	10,0	14,0	18,0
	$f_{t,90,k}$	N/mm <sup>2</sup>	0,4	0,4	0,4
Druck	$f_{c,0,k}$	N/mm <sup>2</sup>	17,0	21,0	23,0
	$f_{c,90,k}$	N/mm <sup>2</sup>	2,2	2,5	2,7
Schub und Torsion	$f_{v,k}$	N/mm <sup>2</sup>	2,7	2,7	2,7
Rollschub	$f_{r,k}$	N/mm <sup>2</sup>	1,0	1,0	1,0
Elastizitätsmodul	$E_{0,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	8.000	11.000	12.000
	$E_{90,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	270	370	400
	$E_{0,05}$	N/mm <sup>2</sup>	533	7333	8000
Schubmodul	$G_{0,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	500	690	750
	$G_{90,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	50	69	75
	$G_{0,05}$	N/mm <sup>2</sup>	333	460	500
Rohdichte	$\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	310	350	380

Stellt man die Werte aus Tab. 1-1 für Fichte jenen der Tab. 1-2, beispielsweise für die häufig verwendete Festigkeitsklasse C24, gegenüber, ist die Differenz aus mittleren Festigkeiten für merkmalfreies Holz und den charakteristischen Festigkeiten (5 %-Fraktilwert) von Bauholz ersichtlich (Tab. 1-3).

Tab. 1-3: Gegenüberstellung von mittleren Werten aus [8] und charakteristischen Werten von Bauholz [12]

		Clear Wood	C24	Faktor
$E_0$	N/mm <sup>2</sup>	11.000	11.000	1,0
$E_{90}$	N/mm <sup>2</sup>	550	370	1,5
$f_{t,0}$	N/mm <sup>2</sup>	90,0	14,0	6,4
$f_{t,90}$	N/mm <sup>2</sup>	2,7	0,4	6,8
$f_{c,0}$	N/mm <sup>2</sup>	50,0	21,0	2,4
$f_{c,90}$	N/mm <sup>2</sup>	5,8	2,5	2,3
$f_m$	N/mm <sup>2</sup>	72,0	24,0	3,0
$f_{v,0}$	N/mm <sup>2</sup>	6,7	2,7	2,5

### 1.1.2 Brettsperrholz

Als Brettsperrholz werden alle mehrschichtig verklebten, flächenhaften Holzprodukte verstanden, deren Faserrichtung benachbarter Schichten rechtwinklig zueinander orientiert ist [14].

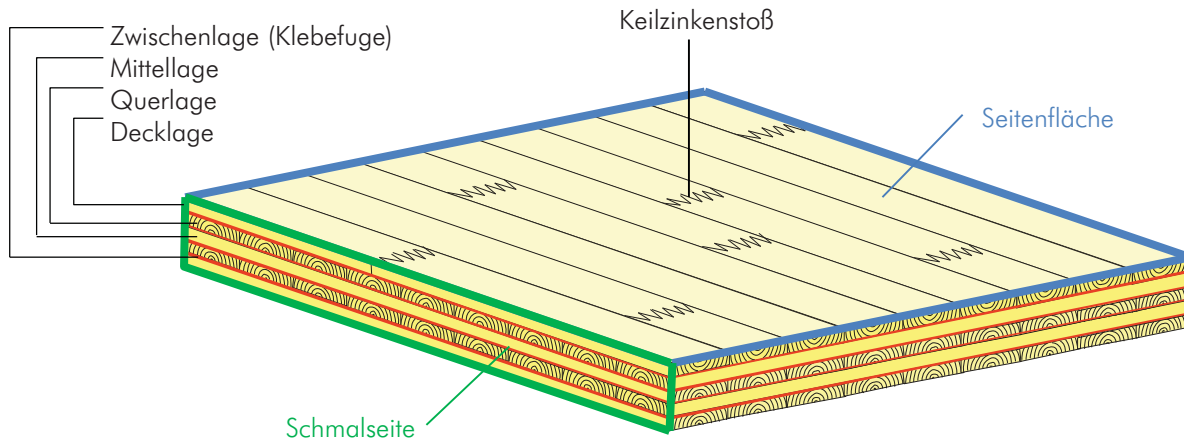


Abb. 1-7: Aufbau und Bezeichnungen von Brettsperrholz [15]

[16]

Der Aufbau aus symmetrisch im Querschnitt orthogonal ( $0^\circ - 90^\circ - \dots - 0^\circ$ ) geschichteten und starr verbundenen Brettlagen, bringt drei wesentliche Vorteile mit sich:

- Klimatisch bedingte Quell- und Schwinderscheinungen werden in Platten- bzw. Scheibenebene aufgrund der gegenseitigen Sperrwirkung stark reduziert;
- Es stellt sich ein Homogenisierungseffekt der Kenngrößen ein;
- Die Aktivierung der 2D-Tragwirkung bringt eine Reduktion der Spannungen in Haupttragrichtung mit sich.

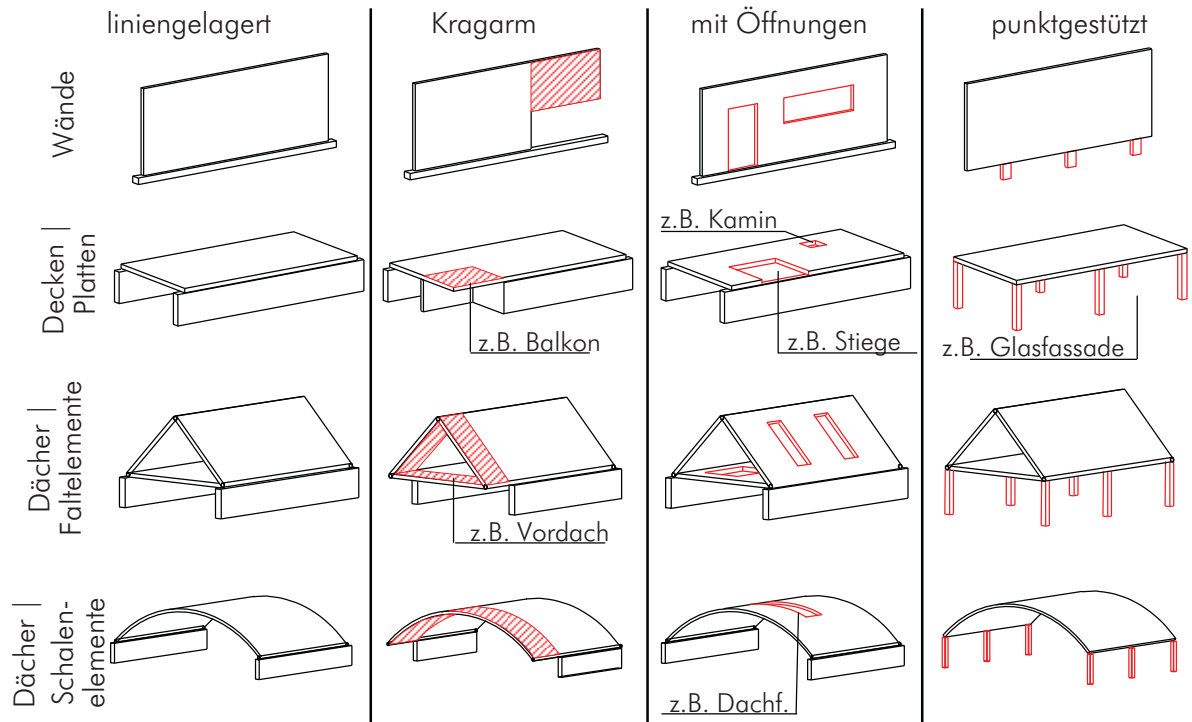


Abb. 1-8: Einsatzmöglichkeiten von BSP [16]

Durch vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, etwa als 1D-Träger, als Scheibentragwerk in Wänden, Plattentragwerk in Decken und Falt- oder Scheibentragwerk in Dächern (siehe Abb. 1-8), der wirtschaftlichen und raschen Bauweise dank hoher Vorfertigungsgrade sowie einer gesellschaftlichen Bewusstseinsbildung für nachhaltiges, ressourcen- und umweltschonendes Bauen kam es im vergangenen Jahrzehnt zu einem stark gestiegenen Interesse an Brettspertholzprodukten und einem damit verbundenen Ausbau der Produktionskapazitäten (Abb. 1-9).

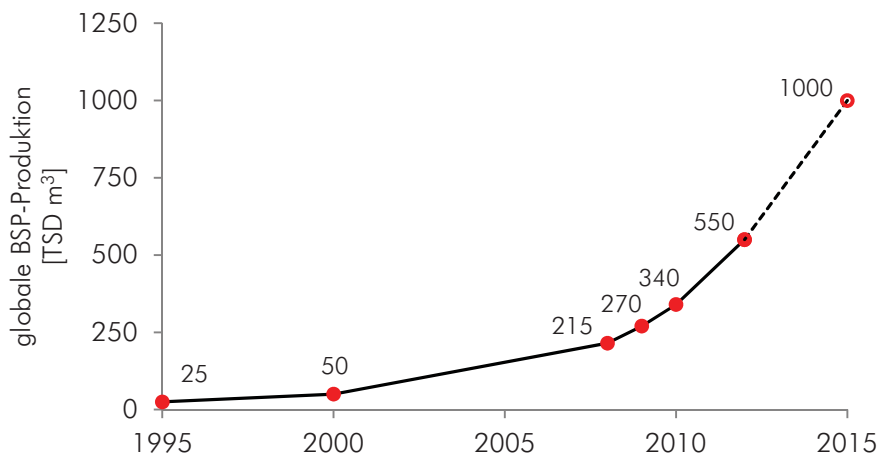


Abb. 1-9: Entwicklung der globalen Brettspertholzproduktion nach [17]

### 1.1.2.1 Ausgangsprodukte

Um wirtschaftlich konkurrenzfähige BSP-Elemente von hoher Tragfähigkeit herstellen zu können, sind geeignete Ausgangsmaterialien, namentlich Brettware und Klebstoff, essentiell. Die wesentlichen Eigenschaften und Anforderungen an diese Produkte werden im Folgenden kurz beschrieben.

#### Brett

Für die Produktion von Brettspertholz wird vorwiegend die Holzart Fichte verwendet. Je nach Rohstoffangebot wird aber auch Kiefernholz für die Herstellung einzelner Lagen aber auch ganzer Platten herangezogen. Werden höhere Ansprüche an Festigkeit und Steifigkeit gestellt, oder stehen ästhetische Aspekte im Vordergrund, werden weiters Lärche und Douglasie oder Laubholzarten wie Esche, Buche, Eiche, Pappel oder Robinie gewählt [7].

Erfahrungsgemäß von höherer Qualität, kamen anfänglich vorwiegend Bretter aus den Randlagen bei der Produktion von BSP zum Einsatz (Abb. 1-10). Dem stetig steigenden Absatz ist zu schulden, dass mittlerweile auch Hauptware als Ausgangsmaterial herangezogen werden muss [7].

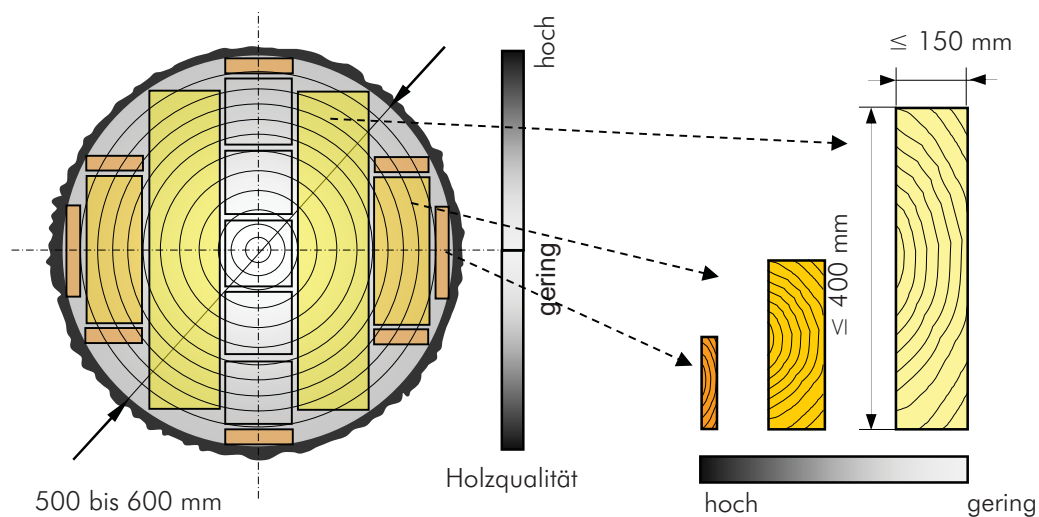


Abb. 1-10: Holzqualität in Abhängigkeit der Lage im Stamm [16]

Die Abmessungen eines Brettes sind durch [10] normativ mit einer Dicke ( $d$ ) von  $\leq 40$  mm und einer Breite ( $b$ ) von  $\geq 80$  mm begrenzt (Tab. 1-4). Die marktübliche Länge der Bretter beträgt 4 m; zwischen 3 und 6 m Länge kann bei den meisten Herstellern bei Bedarf noch geordert werden.



Tab. 1-4: Einteilung von Schnittholz [10]

Schnittholzart	Dicke d bzw. Höhe h	Breite b
Latte	$d \leq 40 \text{ mm}$	$b < 80 \text{ mm}$
Brett <sup>a</sup>	$d \leq 40 \text{ mm}^b$	$b \geq 80 \text{ mm}$
Bohle <sup>a</sup>	$d \leq 40 \text{ mm}$	$b > 3 d$
Kantholz	$b \leq h \leq 3 b$	$b > 40 \text{ mm}$

<sup>a</sup> Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren und entsprechend zu kennzeichnen (siehe Abschnitt 4).

<sup>b</sup> Dieser Grenzwert gilt nicht für Bretter für Brettschichtholz

## Klebstoff

Zur Fügung einzelner Bretter in Längsrichtung mittels Keilzinkenverbindung, der quasi starren Flächenverklebung der einzelnen Schichten miteinander sowie gegebenenfalls zur Verklebung der Schmalseiten wird ein hinsichtlich Festigkeit, Temperatur- und Brandbeständigkeit sowie Langzeitverhalten geeigneter Klebstoff benötigt.

Die derzeit verwendeten normativ geregelten Klebstoffe lassen sich in die Gruppe der Aminoplaste (Melamin Formaldehydklebstoff [MF] und Melamin Harnstoff Formaldehydklebstoff [MUF]), gemäß ÖNORM EN 301 [18] und der einkomponentigen Polyurethanklebstoffe (1K-PUR) gemäß ÖNORM EN 15425 [19] unterteilen [7].

### 1.1.2.2 Herstellung von BSP

[7]

Die Produktion von BSP lässt sich, vom Stamm als Ausgangsmaterial beginnend, in vier Stufen unterteilen (Abb. 1-11).

Das aus dem Einschnitt gewonnene sägeraue Brett wird meist technisch getrocknet und egalisiert. Die anschließende maschinelle oder visuelle Sortierung erfolgt gem. ÖNORM EN 14081-1 [9] und dient dazu, lokale Fehlstellen bzw. ungeeignete Bereiche zu identifizieren und aus dem Prozess auszuschneiden.

Durch die Keilzinkung der sortierten Ware werden Endloslamellen hergestellt, diese im Anschluss durch Hobeln auf die gewünschte Querschnittsabmessungen gebracht und abgelängt.

Als möglicher Zwischenschritt folgt die Verklebung der Schmalseiten: Aus bauphysikalischen, ästhetischen sowie verbindungstechnischen Gründen wird eine möglichst fugenfreie Ausbildung von BSP-Elementen angestrebt. Diese kann entweder durch die Aufbringung einer Schmalseitenpressung während der Verklebung der Schichten oder mittels Verklebung der Einzelbretter auf der Schmalseite erreicht werden.

Im Anschluss erfolgt der Klebstoffauftrag. Hier kann wiederum zwischen dem Lamellendurchlaufverfahren, bei dem die einzelnen Brettlamellen durch die stationäre Beleimungsanlage hindurchlaufen und Klebstoff aufgetragen wird, und dem Vollflächenauftragsverfahren unterschieden werden (Abb. 1-12).

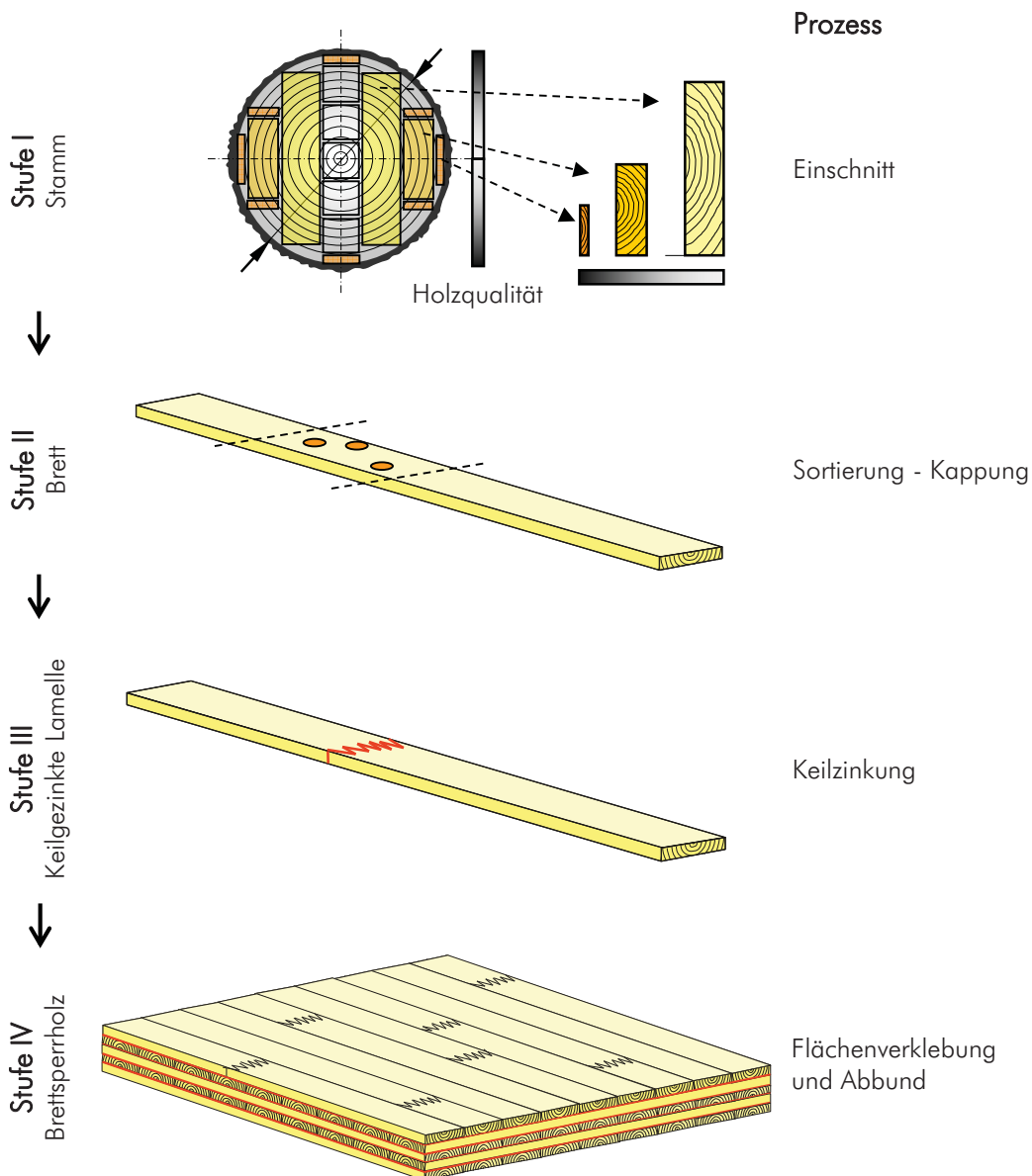


Abb. 1-11: Herstellung von BSP [7]

Unter einer Flächenpressung von 0,6 bis 0,8 N/mm<sup>2</sup> erfolgt anschließend gemäß [20] die Verklebung der Einzelschichten. Die Dauer des Verbleibes im Pressbett ist dabei vom Klebstoff abhängig.

Ein alternatives Verfahren stellt die Flächenverklebung mittels Vakuumtechnik dar, bei der mit Luftdruck gearbeitet wird. Da der erreichbare Pressdruck hier wesentlich geringer ist als gefordert (rd. 0,1 N/mm<sup>2</sup>), werden die Brett lamellen zur Reduktion der Torsions- und Querbiegesteifigkeit mit Entlastungsnuten versehen. Nur so können die zu verklebenden Flächen dicht genug aneinander gepresst werden.

Der CNC-gesteuerte Abbund stellt den letzten Arbeitsschritt zum fertigen BSP-Element dar.

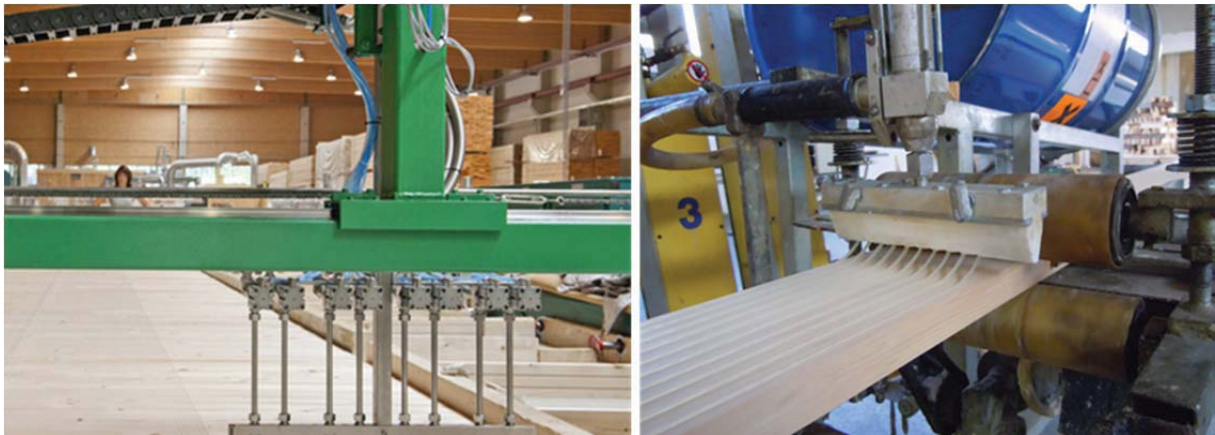


Abb. 1-12: Vollflächenauftragsverfahren (links) [21] und Lamellendurchlaufverfahren (rechts) [22]

### 1.1.2.3 Parallelen zu Faser- Kunststoff- Verbundwerkstoffen

Schickhofer [23] vergleicht die Struktur von Nadelholz mit jener von faserbewehrten Kunststoffen und stellt eine sehr ähnliche Wirkungsweise der beiden Materialien fest, bestehen doch beide aus einem volumenfüllenden Matrixwerkstoff und darin eingebetteten Fasern (Abb. 1-13).

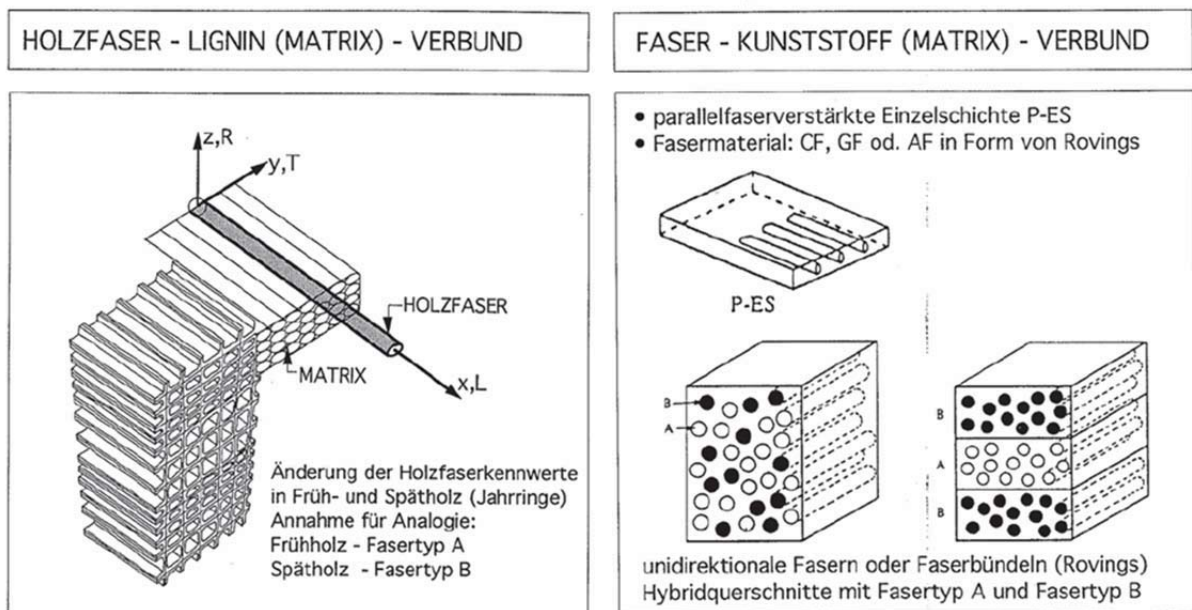


Abb. 1-13: Analogiebetrachtung für den Werkstoff Holz im Makrobereich [23]

Die Matrixstruktur hat in beiden Werkstoffen die Aufgabe der Formgebung und der Fixierung der Verstärkungsfasern in ihrer Lage sowie der Herstellung eines Verbundes zwischen den Fasern. Sie besteht beim natürlichen Verbundwerkstoff Holz aus Lignin sowie Hemizellulose, bei den Kunststoffen kommen dafür Duroplaste und Thermoplaste zum Einsatz.

Cellulosefasern, deren Anteil am Faservolumen bei 42 % liegt, sowie Lignin übernehmen bei Holz die Funktion der Verstärkung. Aramid-, Kohle- und Glasfasern werden bei bewehrten Kunststoffen als Verstärkungsfasern eingesetzt. Ihr Anteil am Faservolumen liegt i.d.R. zwischen 45 und 70 %.

Neben den Parallelen im Ausgangsmaterial Holz bzw. faserbewehrtem Kunststoff lassen sich aus Abb. 1-14 auch Ähnlichkeiten bei geschichteten Strukturen erkennen. Durch geeignete Orientierung der Einzelschichten zueinander lassen sich einige natürlich bedingte, unerwünschte Eigenschaften, wie etwa starkes Quell- und Schwindverhalten, teilweise kompensieren und so ein leistungsfähiger Werkstoff erzeugen.

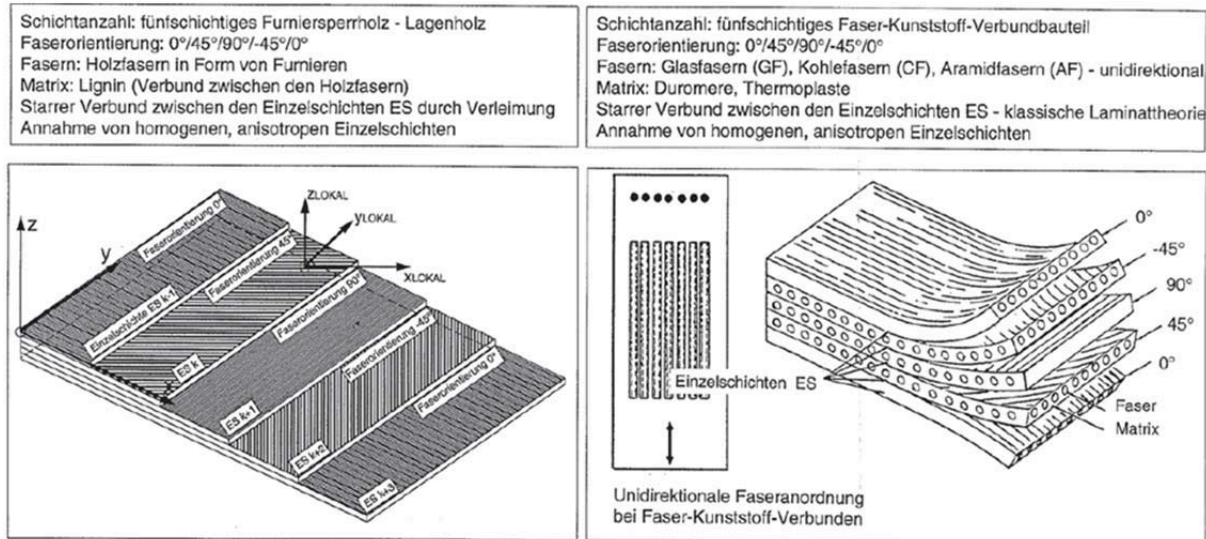


Abb. 1-14: Analogiebetrachtung für geschichtete Holzwerkstoffe [23]

## 1.2 Rollschub

Um eine Schubbeanspruchung eindeutig zu beschreiben, muss die Ebene der Beanspruchung sowie deren Richtung definiert werden. Im Holzbau ist aufgrund des annähernd zylindrisch-anisotropen Werkstoffverhaltens (siehe Abschnitt 1.1.1) die Beschreibung einer Ebene durch jene zwei Richtungen (*längs*, *tangential* bzw. *radial*) zweckmäßig, die diese aufspannen. Es kann daher zwischen den Ebenen *TL* (Längsschnitt), *TR* (Querschnitt) und *RL* (Radialschnitt) unterschieden werden (Abb. 1-15).

Um gleichzeitig die Richtung der Beanspruchung angeben zu können, wird dem Schubmodul als erster Index die Krafrichtung und als zweiter die Richtung des Normalvektors der Ebene, in der diese wirkt, nachgestellt.

In Abb. 1-15 sind für ein dem Stamm entnommenes Faserbündel exemplarisch drei Beanspruchungsrichtungen dargestellt, die Bezeichnung der jeweiligen Ebene angegeben und der entsprechende Schubmodul benannt. Im Fall A wird die Ebene *LR*, also aufgespannt durch längs- und radialachsenparallele Geraden, auf Schub beansprucht. Der hier anzuwendende Modul wird als  $G_{LT}$  bezeichnet. Im Fall B tritt Schub in der *TR*- Ebene mit  $G_{TL}$  auf. Fall C schließlich beschreibt eine der beiden Möglichkeiten, in der Rollschub auftritt: In der Ebene *RL* tritt Schub mit Richtung *R* auf, der zugehörige Modul wird als  $G_{RT}$  bezeichnet.

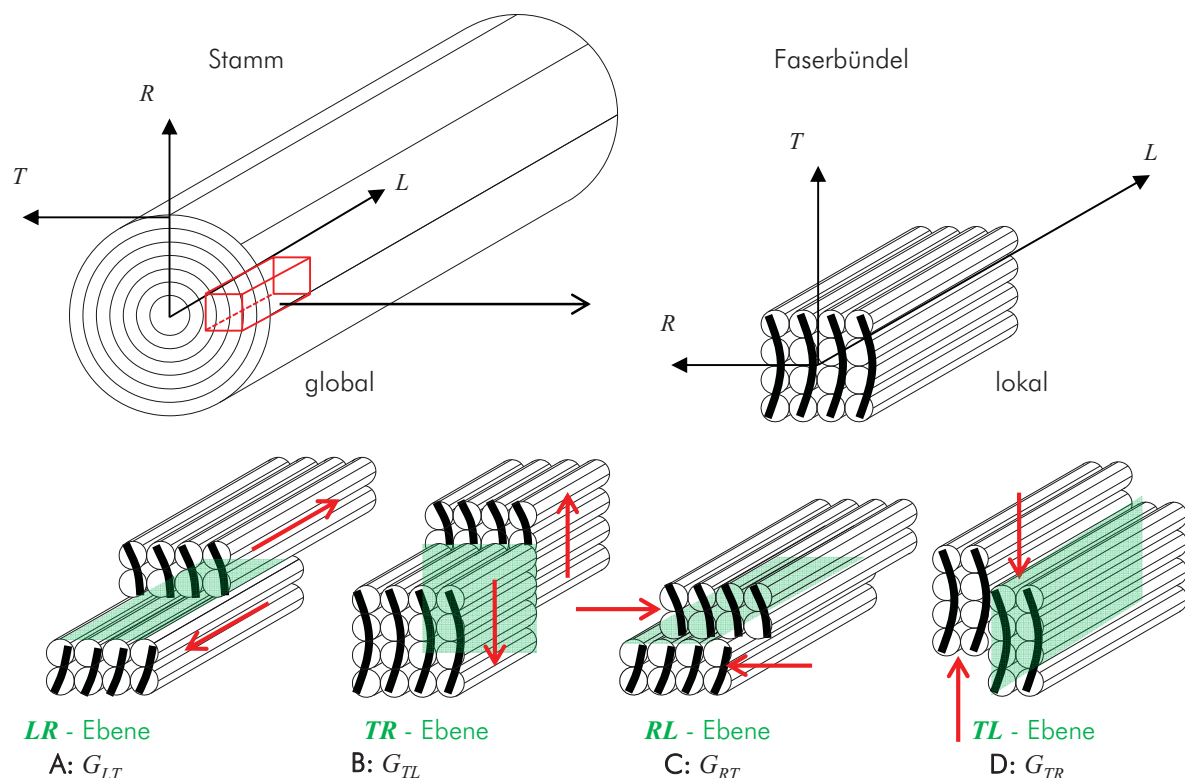


Abb. 1-15: Bezeichnung von Schubebenen und zugehörigen Moduln; parallel zur Faserrichtung in Ebene *LR* (A), tangential in Ebene *TR* (B), radial in Ebene *RL* (C = Rollschub) und tangential in Ebene *TL* (D = Rollschub), sonstige:  $G_{LR}$  und  $G_{RL}$

Da es drei unterschiedliche Ebenen gibt, die im gewählten Koordinatensystem vorkommen und jeweils zwei (linear unabhängige) (Kraft-) Richtungen existieren, sind neben den vier genannten Fällen noch zwei weitere möglich:

- Ebene  $RT$ , Richtung  $R$ :  $G_{RL}$
- Ebene  $LT$ , Richtung  $L$ :  $G_{LR}$

Eine praktikable Vereinfachung, die an dieser Stelle getroffen wird, ist die Zusammenfassung der beiden Rollschubmoduln  $G_{RT}$  und  $G_{TR}$  unter der Größe  $G_{9090}$ . Dies ist vor allem deshalb sinnvoll und zweckmäßig, da durch die Krümmung der Jahrringe und die Lastaufbringung in einer Ebene in Realität nie eine reine Belastung in Ebene  $TL$  bzw.  $RL$ , sondern immer eine Kombination dieser auftritt (Abb. 1-16).

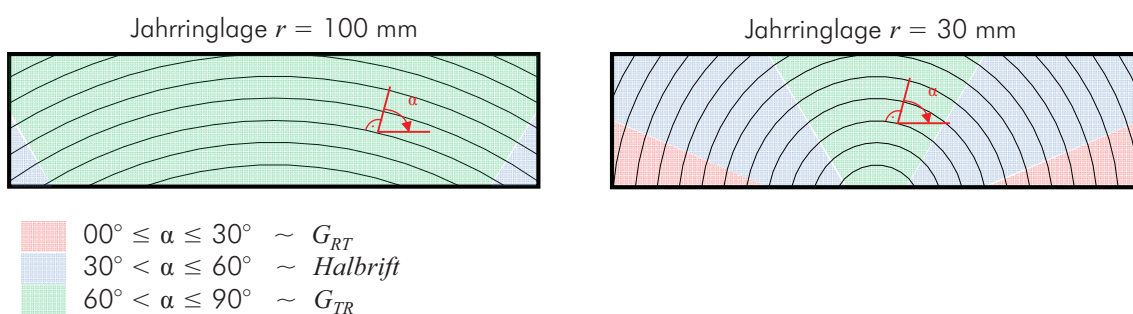


Abb. 1-16: Bereiche unterschiedlicher Schubmoduln bei Rollschubbeanspruchung

### 1.2.1 Definition und Versagensmechanismus

In [24] wird Rollschub als „...Schubspannung mit Spannungskomponenten, die rechtwinklig zur Faserrichtung wirken...“ definiert.

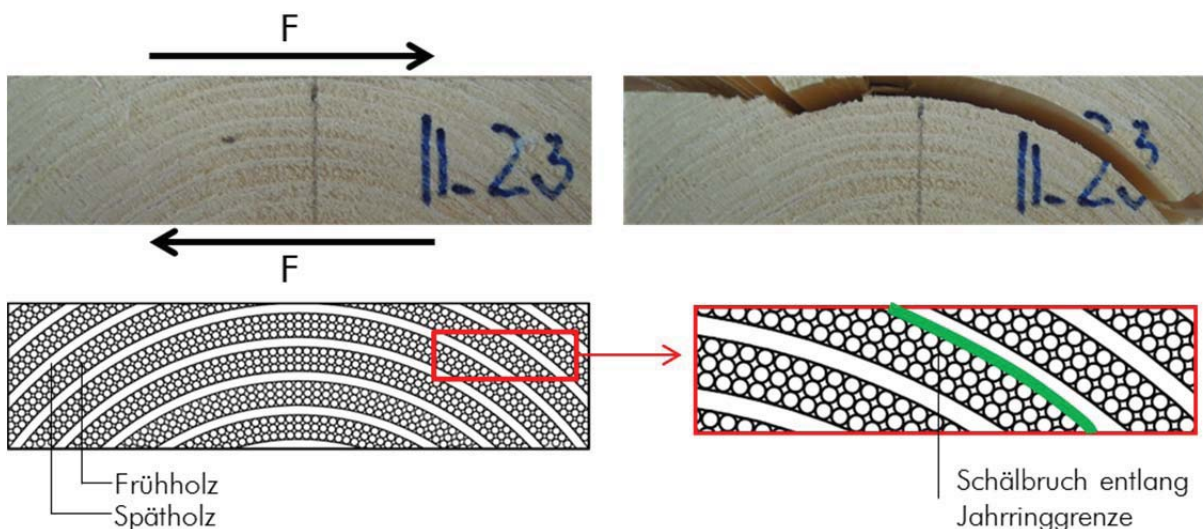


Abb. 1-17: Beanspruchungsrichtung und Versagen bei Rollschub

In Abb. 1-17 liegt eine Beanspruchung in  $TL$ -Ebene vor, der zugehörige Rollschubmodul ist hier  $G_{TR}$  (Vergleich Abb. 1-15).

Charakteristischer Versagensmechanismus ist dabei das Abrollen der zur Stammachse parallelen Holzfasern gegeneinander, aufgrund der niedrigeren Festigkeiten vornehmlich im Frühholzbereich bzw. als Schälbruch an der Jahrringgrenze entlang einiger weniger Jahrringe (Abb. 1-17).

## 1.2.2 Auftreten und Berechnung

### BSP unter Biegebelastung

Bei Bauteilen, die eine Belastung normal zu ihrer Achse (bei 1D-Elementen) bzw. normal zu ihrer Ebene (bei 2D-Elementen) erfahren, tritt Querkraft und damit eine Schubbeanspruchung des Querschnittes auf.

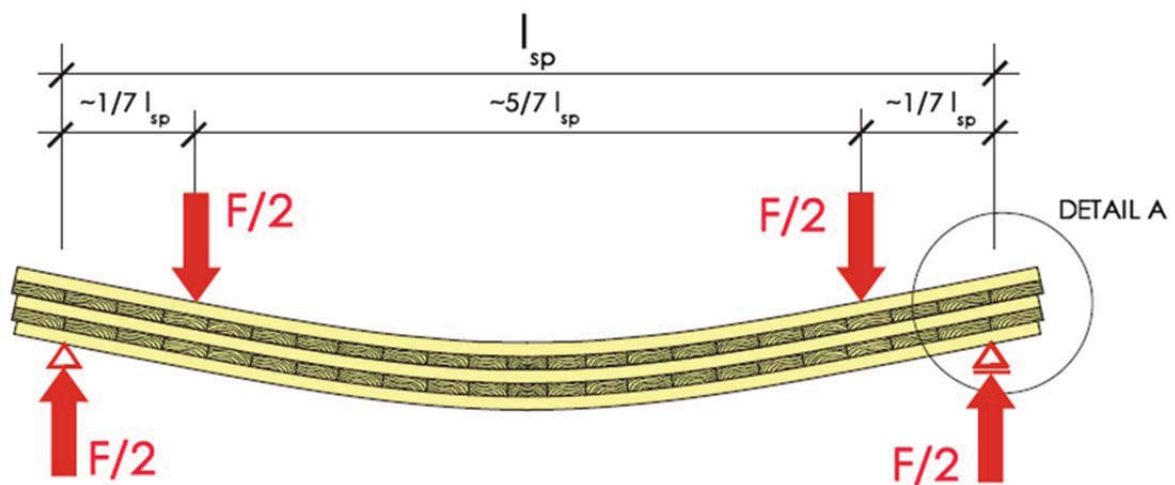


Abb. 1-18: Brettsperrholz unter Biegebelastung [25]

Im speziellen bei BSP-Elementen werden dabei neben den parallel zur Hauptspannrichtung orientierten Deck- und Zwischenlagen, die eine Schubbeanspruchung in Faserrichtung erfahren, auch die normal dazu orientierten Querlagen einer Schubbelastung ausgesetzt. Je geringer die Spannweite des beanspruchten Bauteiles, desto geringer ist das auftretende Biegemoment und umso unwahrscheinlicher ist ein Versagen der äußeren Lagen durch Überschreitung der Biegezug- bzw. -druckfestigkeit, d.h. das Schubversagen wird zunehmend maßgebend. Da der Widerstand, den die Querlagen der Schubbeanspruchung entgegenzusetzen haben – die Schubfestigkeit  $f_{v,90,90}$  – wesentlich geringer als jener der Längslagen –  $f_{v,0,90}$  – ist, wird das Versagen stets in den Querlagen auftreten.

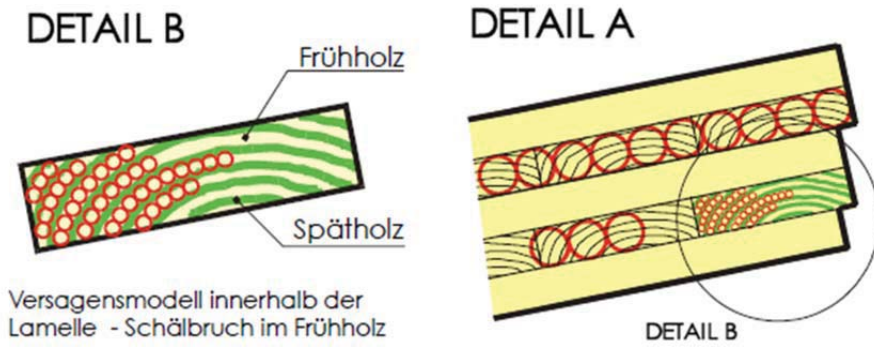


Abb. 1-19: Detailbetrachtung des Versagens [25]

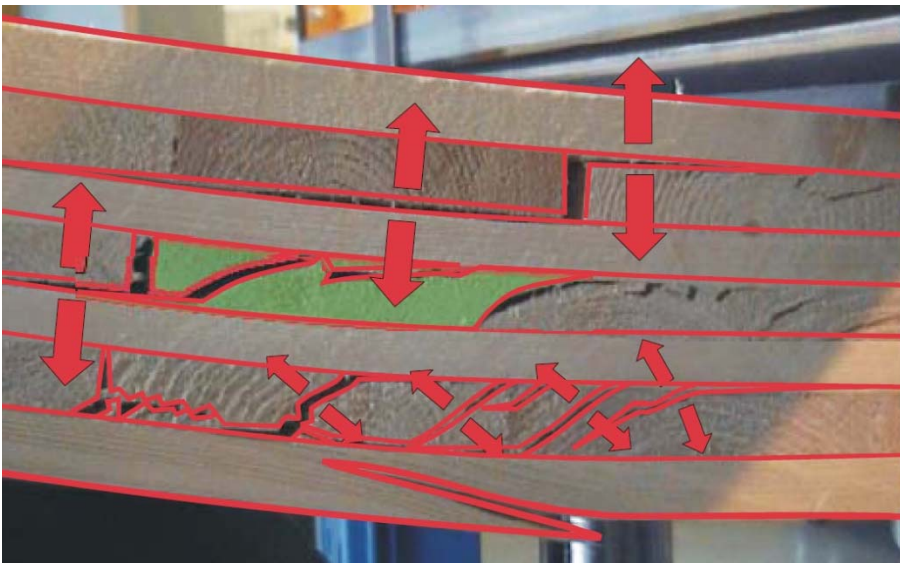


Abb. 1-20: Versagen eines BSP –Trägers im Schubversuch [25]

Bei dem in Abb. 1-20 dargestellten 7-schichtigen Brettsperrholzträger trat ein Querkzugversagen in der Klebefuge zwischen Längs- und Querlagen, kombiniert mit Rollschub- / Schälbrüchen in der Frühholzzone entlang der Jahresringe, auf [25].



## Berechnung

Anhand eines kurzen, realitätsnahen Berechnungsbeispiels soll aufgezeigt werden, in welche Nachweise Rollschubfestigkeit und -modul Eingang finden.

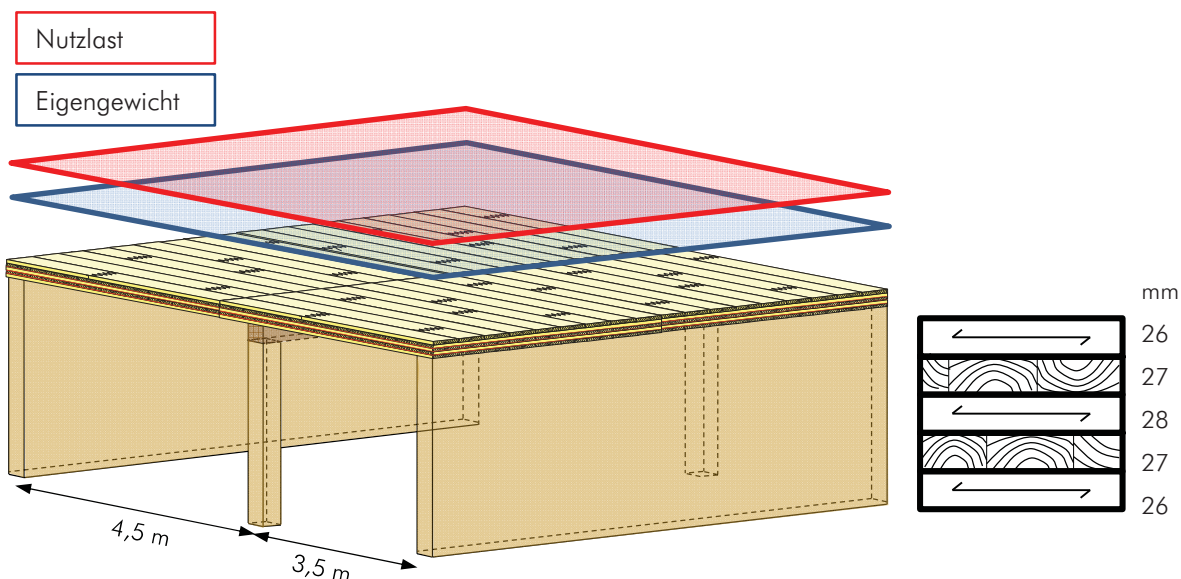


Abb. 1-21: Schematische Darstellung der zu berechnenden Geschossdecke und Aufbau der BSP-Platte

Für die in Abb. 1-21 dargestellte Geschossdecke sind die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS, engl.: ultimate limit state) und Gebrauchstauglichkeit (SLS, engl.: serviceability limit state) zu führen. Es handelt sich um ein Plattentragwerk unter Biegebeanspruchung. Wegen der Unterstützung durch einen Unterzug kann als statisches System ein Zweifeldträger modelliert werden (Abb. 1-22). In Tab. 1-5 werden die anzusetzenden Lasten aus Eigengewicht und Nutzlast ermittelt.

Tab. 1-5: Eigengewicht und Nutzlast

Eigengewicht, $\gamma = 1,35$		Nutzlast gem. [26], $\gamma = 1,5$	
Fußbodenbelag	0,05 kN/m <sup>2</sup>	„Bürofläche“	B
Estrich	1,04 kN/m <sup>2</sup>	„in Bürogebäude“	B2
Schüttung	0,06 kN/m <sup>2</sup>	$\psi_0$	0,7
Brettsperrholz	0,63 kN/m <sup>2</sup>	$\psi_1$	0,5
Gipskartonplatte	0,15 kN/m <sup>2</sup>	$\psi_2$	0,3
$g_k$	1,93 kN/m <sup>2</sup>	$p_k$	3,00 kN/m <sup>2</sup>

Wegen dem Einsatz des BSP-Elementes als Decke in einem Bürobau, kann von einer gleichbleibenden Temperatur von rd. 20°C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft von i.d.R. unter 65 % ausgegangen werden. Diese Bedingungen entsprechen der Nutzungsklasse 1. Für vertikale Nutzlasten im Hochbau ist die Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED) „mittel“ anzusetzen. Daraus folgt ein Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  von 0,80.

Die Materialkenngrößen werden entsprechend jenen von Brettschichtholz GL24h definiert.

$$f_{m,clt,d} = k_I \cdot \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{m,gl,k}}{\gamma_M} = 1,1 \cdot \frac{0,80 \cdot 24,0}{1,25} = 16,90 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{c,clt,90,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,gl,k}}{\gamma_M} = \frac{0,80 \cdot 2,7}{1,25} = 1,73 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{v,clt,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,gl,k}}{\gamma_M} = \frac{0,80 \cdot 3,0}{1,25} = 1,92 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$f_{r,clt,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{r,gl,k}}{\gamma_M} = \frac{0,80 \cdot 1,25}{1,25} = 0,80 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Zur Bemessung werden folgende Steifigkeitseigenschaften berücksichtigt:

$$E_{0,mean} = 11.600 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E_{90,mean} \approx 0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$G_{090,mean} = 720 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$G_{9090,mean} = 72 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Aufgrund der vorliegenden Lagerungsbedingungen erfolgt der Lastabtrag einachsial, es wird zur Berechnung in weiterer Folge deshalb ein 1 m-Streifen betrachtet. Die Schnittkräfte werden vorerst mit einer Linienlast der Einheitsgröße 1 kN/m berechnet und erst später mit den tatsächlichen Lasten multipliziert.

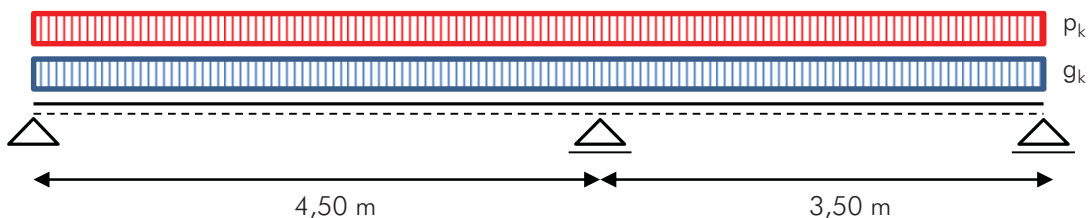


Abb. 1-22: Statisches System

Die Schubsteifigkeit für Brettspertholz  $S_{clt}$  ergibt sich als Summe der Schubsteifigkeiten der Einzelschichten unter Berücksichtigung eines Schubkorrekturfaktors (Abb. 1-23) nach [27] berechnet.

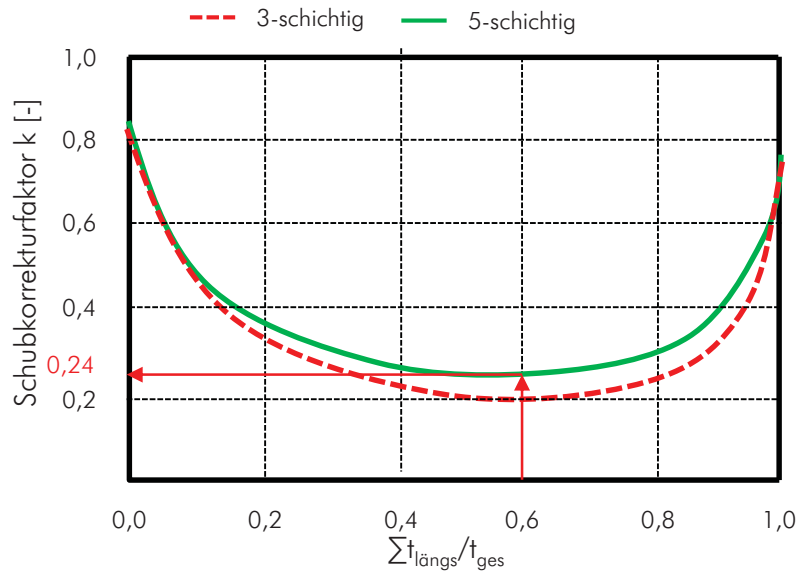


Abb. 1-23: Ablesen des Schubkorrekturfaktors nach [27]

$$S_{clt} = \kappa \cdot S_{ges} = 0,24 \cdot \sum (G_i \cdot b_i \cdot t_i) = 0,24 \cdot [720 \cdot 1000 \cdot (26 \cdot 2 + 28) + 72 \cdot 1000 \cdot (2 \cdot 27)] = 1,476 \cdot 10^7 [N]$$

Die Biegesteifigkeit  $K_{clt}$  lässt sich bei Vernachlässigung der deutlich weicheren Querlagen ( $E_{090} \approx 0$ ) wie folgt berechnen:

$$K_{clt} = \sum (I_i \cdot E_i) + \sum (A_i \cdot e_i^2 \cdot E_i) = 11.600 \cdot \left( \frac{1000 \cdot 26^3}{12} \cdot 2 + \frac{1000 \cdot 28^3}{12} + 1000 \cdot 26 \cdot 54^2 \right) = 1,814 \cdot 10^{12} [Nmm^2]$$

Wegen der 1-fachen statischen Unbestimmtheit des Systems wird zur Berechnung der Schnittkräfte das Kraftgrößenverfahren angewandt: Durch Entfernen des mittleren Auflagers wird ein statisch bestimmtes Grundsystem gebildet und die Einheitslast aufgebracht. Im virtuellen „1“-System wird an Stelle des entfernten, mittleren Auflagers eine virtuelle Kraft  $\delta F$  der Größe „1“ aufgebracht (Abb. 1-24).

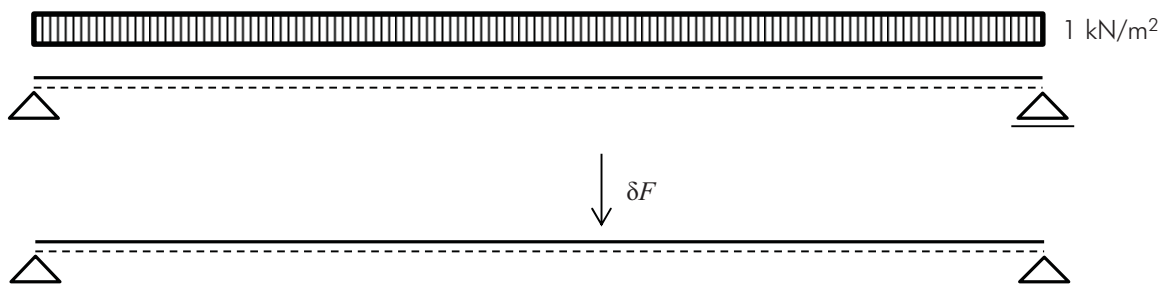


Abb. 1-24: Statisch bestimmtes „0“-System mit Einheitslast (oben) und virtuelles „1“-System (unten)

Mithilfe des Arbeitssatzes (Prinzip der virtuellen Kräfte) wird nun genau jene virtuelle Kraft ermittelt, die notwendig ist, um die Durchbiegung an der Stelle des entfernten Auflagers verschwinden zu lassen.

Dazu wird in einem ersten Schritt die Durchbiegung  $\delta_{01}$  ermittelt, die sich an der Stelle des mittleren Auflagers aufgrund der Einheitsbelastung einstellt. Dies ist beispielsweise mit dem Prinzip der virtuellen Kraftgrößen durch Überlagerung der Momenten- und Querkraftverläufe der Systeme aus Abb. 1-24 möglich.

$$\delta_{01} = \frac{10^6}{EI} \cdot \left[ \frac{4,5}{6} \cdot (0 + 4 + 6,47 \cdot 0,98 + 7,88 \cdot 1,97) + \frac{3,5}{6} \cdot (7,88 \cdot 1,97 + 4 \cdot 5,47 \cdot 0,98 + 0) \right] + \frac{1}{GA} \cdot \left[ \frac{4,5}{2} \cdot 0,44 \cdot (4 - 0,5) - \frac{3,5}{2} \cdot 0,56 \cdot (-0,5 - 4,0) \right] = \frac{10^6}{EI} \cdot 52,34 + \frac{1}{GA} \cdot 7,88$$

Als nächstes wird die Durchbiegung, die sich im „1“-System aufgrund von  $\delta F$  einstellt ( $\delta_{11}$ ), ermittelt.

$$\delta_{11} = \frac{10^6}{EI} \cdot \left[ \frac{4,5}{3} \cdot 1,97^2 + \frac{3,5}{3} \cdot 1,97^2 \right] + \frac{1}{GA} \cdot \left[ 4,5 \cdot 0,44^2 + 3,5 \cdot 0,56^2 \right] = \frac{10^6}{EI} \cdot 10,34 + \frac{1}{GA} \cdot 1,97$$

Um die Verformung an der Stelle des mittleren Auflagers auf null zu reduzieren, muss gelten:

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{01} = 0$$

Dabei ist  $X_1$  die gesuchte vertikale Kraft im mittleren Auflager, die sich aufgrund der Einheitsbelastung (1 kN/m) einstellt. Durch Umformung und Einsetzen in die Gleichungen erhält man:

$$X_1 = -\frac{\delta_{01}}{\delta_{11}} = -\frac{\frac{10^6}{EI} \cdot 52,34 + \frac{1}{GA} \cdot 7,88}{\frac{10^6}{EI} \cdot 10,34 + \frac{1}{GA} \cdot 1,97} = \frac{2,939 \cdot 10^{-5}}{5,834 \cdot 10^{-6}} = -5,06$$

Statt  $EI$  wird dabei als Biegesteifigkeit das zuvor berechnete  $K_{clt}$  und statt  $GA$  die ermittelte Schubsteifigkeit  $S_{clt}$  in die Gleichung eingesetzt und so  $X_1$  ermittelt.

Anm.: Dies bedeutet, dass der (Roll-)Schubmodul bereits bei der Verteilung der Schnittkräfte eine, wenn auch nur geringe, Rolle spielt.

Statt der Einheitslast wird nun die tatsächliche Belastung, also Eigengewicht und Nutzlast, aufgebracht, die Linienlast  $q_d$  errechnet sich zu:

$$q_d = 1,35 \cdot g_k + 1,50 \cdot p_k = 1,35 \cdot 1,93 + 1,50 \cdot 3,00 = 7,11 \text{ [kN / m]}$$

Damit lassen sich das maximale Moment im Stützquerschnitt sowie die maximale Querkraft ermitteln:

$$M_{St,max} = -14,89 \text{ [kNm]}$$

$$V_{max} = -19,31 \text{ [kN]}$$

Die Biegenormalspannung ergibt sich zu:

$$\sigma_{m,i} = \frac{M}{K_{clt}} \cdot z_i \cdot E(z)$$

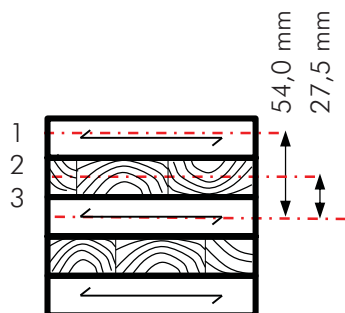
$$\text{mit: } \frac{M}{K_{clt}} \cdot E_{0,mean} = \frac{14,89 \cdot 10^6}{1,814 \cdot 10^{12}} \cdot 11.600 = 0,09522$$

$$\sigma_{m,1} = 0,09522 \cdot \frac{134}{2} = 6,38 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,2} = 0,09522 \cdot \left( \frac{134}{2} - 26 \right) = 3,90 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{m,3} = 0,09522 \cdot \frac{28}{2} = 1,33 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

Zur Berechnung der Schubspannung sind die statischen Momente zu ermitteln:



$$S_1 = A_1 \cdot e_1 = 26 \cdot 1000 \cdot 54 = 1,404 \cdot 10^6 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$S_2 = A_2 \cdot e_2 = 27 \cdot 1000 \cdot 27,5 = 7,425 \cdot 10^5 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$S_3 = A_3 \cdot e_3 = 14 \cdot 1000 \cdot 7,0 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Damit können auch die Schubspannungen berechnet werden:

$$\tau(z) = \frac{V \cdot S(z)}{I \cdot b} = \frac{V}{K_{clt} \cdot b} \cdot \sum S \cdot E$$

$$\text{mit: } \frac{V}{K_{clt} \cdot b} = \frac{19,31 \cdot 10^3}{1,814 \cdot 10^{12} \cdot 1000} = 1,0645 \cdot 10^{-11}$$

$$\tau_1 = 0 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$\tau_2 = 1,0645 \cdot 10^{-11} \cdot 1,404 \cdot 10^6 \cdot 11.600 = 0,17 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$\tau_3 = 1,0645 \cdot 10^{-11} \cdot (1,404 \cdot 10^6 \cdot 11.600 + 0) = 0,17 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$\tau_4 = 1,0645 \cdot 10^{-11} \cdot (1,404 \cdot 10^6 \cdot 11.600 + 0 + 9,8 \cdot 10^4 \cdot 11.600) = 0,19 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

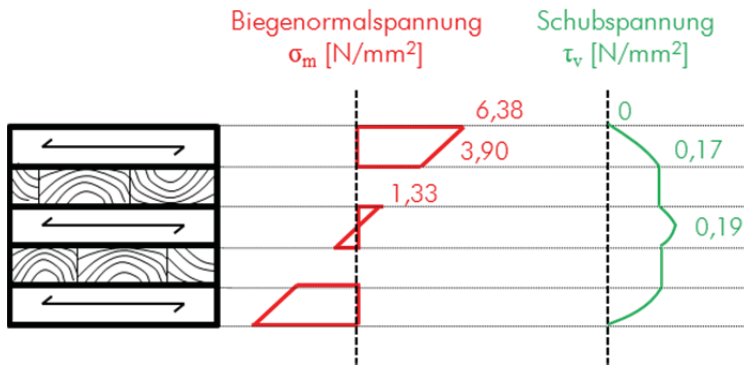


Abb. 1-25: Spannungsverteilung über den Querschnitt

Nachweise ULS:

$$\text{Biegenachweis: } \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,clt,d}} = \frac{6,38}{16,90} = 0,38 < 1,0$$

$$\text{Schubnachweis: } \frac{\tau_{v,d}}{f_{v,clt,d}} = \frac{0,19}{1,92} = 0,10 < 1,0$$

$$\text{Rollschubnachweis: } \frac{\tau_{r,d}}{f_{r,clt,d}} = \frac{0,17}{0,80} = 0,21 < 1,0$$

Anm.: Man erkennt die in diesem Fall relativ geringe Ausnutzung der Tragfähigkeit der BSP-Platte. Bei Beibehaltung des statischen Systems und Steigerung der Last, wäre ein Versagenseintritt durch Überschreitung der Biegezugfestigkeit wohl maßgebend. Wird bei gleichzeitiger Reduktion der Feldweite die Last gesteigert, so nehmen die Schubspannungen stärker zu als die Biegespannungen. Der Schubnachweis in Faserrichtung muss zwar aufgrund der Orientierung der Mittellage mit einer etwas größeren Beanspruchung geführt werden (im Schwerpunkt treten die höchsten Schubspannungen auf), die materialseitigen Widerstände sind in den Querlagen allerdings wesentlich niedriger und so wird das Versagen aufgrund überschrittener Rollschubfestigkeit maßgebend werden.

Zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit werden die Verformungen begrenzt. Dabei wird zwischen drei Kombinationen unterschieden, für die jeweils unterschiedliche Grenzwerte der Durchbiegung definiert sind (Tab. 1-6).

Tab. 1-6: Lastfallkombinationen nach enBR [13]

Lastfallkombination	Zeitpunkt	Ermittlung der Verformungen	Empfohlener Grenzwert Hochbau
{1} Charakteristische Kombination	$t = 0$	$w_3^{2)}$	L / 300
{2} Charakteristische Kombination	$t = \infty$	$w_3^{2)} + (w_1^{1)} + w_3^{3)}) k_{def}$	L / 200
{3} Quasi-ständige Kombination	$t = \infty$	$(w_1^{1)} + w_3^{3)}) (1 + k_{def}) - w_0$	L / 250

Nach [28] sind als charakteristische Werte veränderlicher Einwirkungen dabei jene mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren definiert. Quasiständige Werte veränderlicher Lasten sind so festgelegt, dass sie während 50 % des Bezugszeitraumes überschritten werden. Der Verformungsbeiwert  $k_{def}$  ermöglicht die Berücksichtigung des Langzeiteinflusses auf Tragwerke durch den Kriecheffekt, für BSP soll dieser nach [7] mit 0,85 angesetzt werden. Um die maximale Durchbiegung in der Mitte des längeren Feldes zu ermitteln, wird die veränderliche Nutzlast ungünstig nur auf diesem linken Feld aufgebracht (Abb. 1-26).

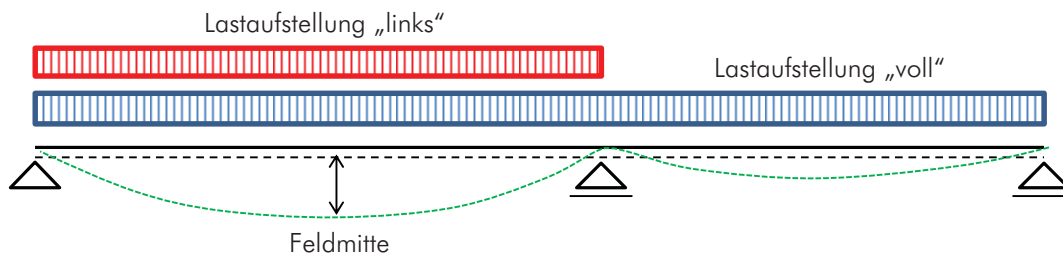


Abb. 1-26: Lastaufstellung und qualitativer Verlauf der Durchbiegung

Die ermittelten Durchbiegungen für die Einheitslast 1 kN/m sowie die Fälle {1}, {2} und {3} sind in Tab. 1-7, getrennt nach den Anteilen aus Biege- und Schubverformung, angegeben.

Tab. 1-7: Durchbiegung bei unterschiedlichen Lastfallkombinationen

	Last „voll“ (Eigengewicht) [mm]		Last „links“ (Nutzlast) [mm]		Gesamt [mm]	Grenzwert [mm]	$\eta$ [-]
	Biegeanteil	Schubanteil	Biegeanteil	Schubanteil			
Einheitslast	1,52	0,26	2,06	0,19	4,03	-	-
{1}	-	-	6,18	0,57	6,75	15,0	0,45
{2}	2,49	0,43	6,18	0,57	9,67	22,5	0,42
{3}	5,43	0,93	3,43	0,32	10,11	18,0	0,56

Anm.: Man erkennt, dass der Schubanteil in diesem Fall für rd. 10 bis 15 % der Durchbiegung verantwortlich zeichnet und der (Roll-)Schubmodul so direkten Einfluss auf das Verformungsverhalten besitzt. Insbesondere bei Tragwerken geringer  $L / H$ -Verhältnisse nimmt der Anteil der Schubverformung an der Gesamtverformung stark zu.

## 1.3 Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften

Den mechanischen Eigenschaften des natürlichen Werkstoffes Holz ist zum einen durch die Holzart ein Rahmen vorgegeben. Sie werden aber auch während des Wachstums genauer definiert und unterliegen selbst dann noch ständiger Veränderung, wenn es bereits als Bauteil Einsatz in einer Konstruktion gefunden hat. Durch die anisotrope Struktur sowie zahlreiche natürliche Holzmerkmale wie Äste oder Harzgallen, können Zusammenhänge zwischen physikalischen Eigenschaften und Materialkennwerten allerdings nur für eine statistisch ausreichend große Anzahl an Proben gefunden werden.

Im Nachfolgenden werden einige Parameter diskutiert, die Einfluss auf die Rollschubeigenschaften haben bzw. von denen ein solcher erwartet wird.

### 1.3.1 Holzart

Ein Einfluss der Holzart auf die mechanischen Eigenschaften scheint naheliegend, unterscheiden sich doch verschiedene Hölzer in ihrem mikrostrukturellen Aufbau, insbesondere jene der Nadel- im Vergleich zu den Laubhölzern.

Bereits 1976 wurden von Bendtsen [29] neun unterschiedliche Nadelhölzer hinsichtlich ihrer Rollschubeigenschaften untersucht. Jeweils ca. 30 Prüfkörper ( $n$ ) zweier Zedern-, Tannen- und Kiefernarten sowie von drei Fichtenarten mit den Abmessungen  $L / B / H = 15,24 / 5,08 / 1,27$  cm wurden dabei sandwichartig mit zwei Stahlplatten verklebt und durch eine Relativverschiebung dieser Platten einer Schubbelastung ausgesetzt. Über die aufgebrachte Kraft bei Versagenseintritt konnte die Rollschubfestigkeit und anhand des Kraft-Verformungsverhaltens im linear-elastischen Bereich auf den Rollschubmodul geschlossen werden.

Tab. 1-8: Rollschubfestigkeiten und -moduln unterschiedlicher Nadelhölzer nach [29]

Holzart	$n$	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{v,9090,12}$			$G_{9090,12}$		
			$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$CoV$ [%]	$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$CoV$ [%]
Lawsons-Scheinzypresse	31	426	2,24	0,60	27	75,7	28,0	37
Riesen-Lebensbaum	32	322	1,34	0,32	24	44,2	19,7	45
Balsamtanne	33	349	1,49	0,33	22	60,0	26,1	44
Felsengebirgstanne	35	324	1,44	0,33	23	48,5	11,3	23
Zucker-Kiefer	34	355	2,02	0,45	22	69,2	25,6	37
Westl.- Weymouth-Kiefer	33	378	2,05	0,59	29	71,4	29,2	41
Schwarz-Fichte	33	420	1,88	0,27	14	72,9	14,5	20
Rot-Fichte	31	404	1,79	0,36	20	68,2	12,7	19
Weiß-Fichte	34	361	1,79	0,38	21	57,9	15,2	26

Die in Tab. 1-8 angegebenen Werte wurden aus den Originaldaten [29] in metrische Einheiten umgerechnet und stellen Kennwerte bei einer Holzfeuchtigkeit von 12 % dar.

Einerseits lassen diese Ergebnisse, mit dem auch heutigen Anforderungen entsprechenden Prüfumfang, die unterschiedlichen Rollschubeigenschaften verschiedener Nadelhölzer erkennen, anderer-



seits deuten die ermittelten CoV (engl.: coefficient of variation, Variationskoeffizient =  $s / \bar{x}$  für Stichproben) innerhalb der Holzarten von bis zu 29 % bei Festigkeit und 45 % bei den ermittelten Moduln darauf hin, dass neben der Holzart noch weitere Parameter Einfluss auf diese Eigenschaften besitzen.

Die in Abschnitt 1.1.1 beschriebenen Unterschiede in der Anatomie zwischen Nadel- und Laubhölzer bzw. der Laubhölzer untereinander wurden bisher nicht in größeren Versuchsreihen auf ihren Einfluss auf die Rollschubeigenschaften untersucht. Insbesondere sind Kenntnisse über Auswirkungen der Gefäßverteilung in Laubhölzern, also dem Unterschied zwischen Ring- und Zerstreuporen, von großem Interesse.

### 1.3.2 Rohdichte

Der Einfluss der Rohdichte ( $\rho$ ) auf unterschiedliche mechanische Eigenschaften von Holz wurde in zahlreichen Prüfstudien untersucht und bestätigt. Die Rohdichte gilt beispielsweise als wichtigster Parameter zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit. Diese nimmt sowohl bei Nadel- als auch bei Laubholz nahezu linear mit der Rohdichte zu. Bei Variation der Stabdübeldurchmesser ergeben sich Korrelationskoeffizienten ( $R$ ) zwischen 0,71 und 0,92 unter Anwendung linearer Regression [30].

Die bereits erläuterten Untersuchungen Bendtsens [29] lassen neben den Erkenntnissen hinsichtlich des Einflusses der Holzart auf die Rollschubeigenschaften auch Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und der Rohdichte zu. Bendtsen stellt fest, dass jene Holzart mit der höchsten Rohdichte auch die höchste Rollschubfestigkeit sowie den höchsten Modul besitzt. Umgekehrt gehen die niedrigsten Materialkennwerte einher mit der geringsten Dichte. Auch die Ergebnisse der anderen Holzarten weisen auf eine Korrelation von Rohdichte und Rollschubeigenschaften hin, liegen sie doch nahezu nach ihrer Rohdichte gereiht zwischen Minimal- und Maximalwert, siehe Abb. 1-27. Darin sind die Mittelwerte der Rohdichte einer Holzart den mittleren Rollschubeigenschaften derselben gegenübergestellt und die Regressionsgerade angegeben.

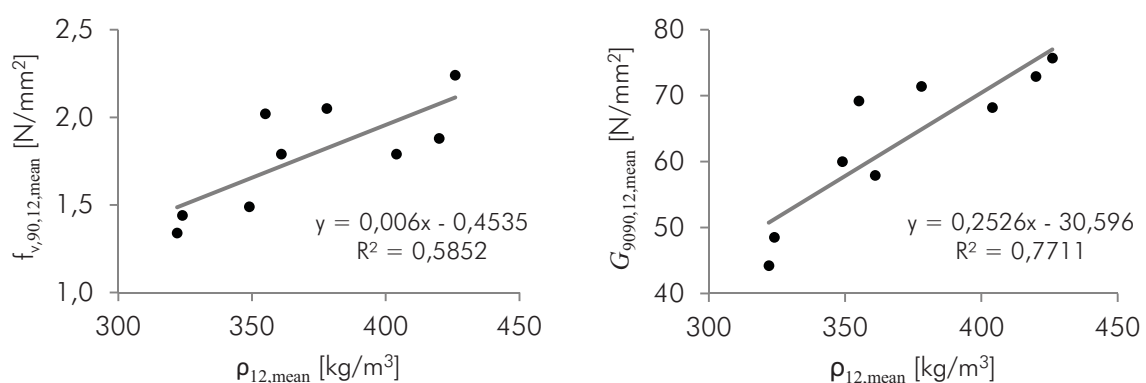


Abb. 1-27: Gegenüberstellung der Rollschubeigenschaften unterschiedlicher Holzarten in Abhängigkeit der mittleren Rohdichte nach [29]

Görlacher [31] führt Biegeschwingversuche an 160 Fichtenproben durch und gibt Gl. (1-1) als gefundene Regressionsgleichung zur Beschreibung des funktionellen Zusammenhanges von Rollschubmodul und Rohdichte an.

$$G_{9090} = 171 \cdot \rho - 22,7$$

Gl. (1-1)

$G_{9090}$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]

$\rho$  ... Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

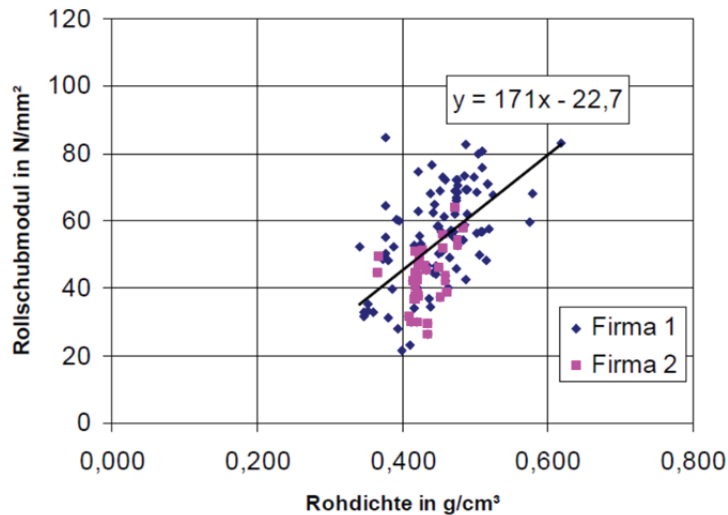


Abb. 1-28: Rollschubmodul in Abhängigkeit der Rohdichte [31]

Leider werden in [31] keine Angaben bezüglich der Korrelation der gefundenen Regressionsgleichung gemacht. Die in Abb. 1-28 dargestellten Ergebnisse lassen in dieser Form aber vermuten, dass der Zusammenhang nicht sehr ausgeprägt ist und neben der Rohdichte noch weitere Parameter Einfluss auf die Rollschubeigenschaften besitzen. Görlacher betont den starken Einfluss der Jahrringlage, worauf in Abschnitt 1.3.3 näher eingegangen wird.

### 1.3.3 Position des Brettes im Stamm

Während die Mikrostruktur, bestimmt durch die Holzart, und die Dichte des Holzes als Einflussparameter der Rollschubeigenschaften durch natürliche Prozesse definiert werden, zählt die Position des Brettes im Stamm und die damit verbundene Lage und Orientierung der Jahrringe zu den von der Verarbeitung, genauer gesagt dem Zuschnitt, abhängigen.

Aicher und Dill-Langer [32] führen numerische Untersuchungen hinsichtlich des Rollschubmoduls an Einzelbrettern durch und variieren dabei die Lage im Stamm. Insgesamt werden sechs unterschiedliche, repräsentative Jahrringverläufe betrachtet, die in Abb. 1-29 dargestellt sind. Über die der Berechnung zugrunde liegende Holzart werden keine Angaben gemacht, als Materialeigenschaften werden  $E_R / E_T / G_{RT} = 1 / 0,67 / 0,042 = 1.190 / 789 / 50 \text{ N/mm}^2$  sowie  $\nu_{RT} = 0,2 [-]$  definiert, was in etwa jenen von Fichtenholz entspricht.

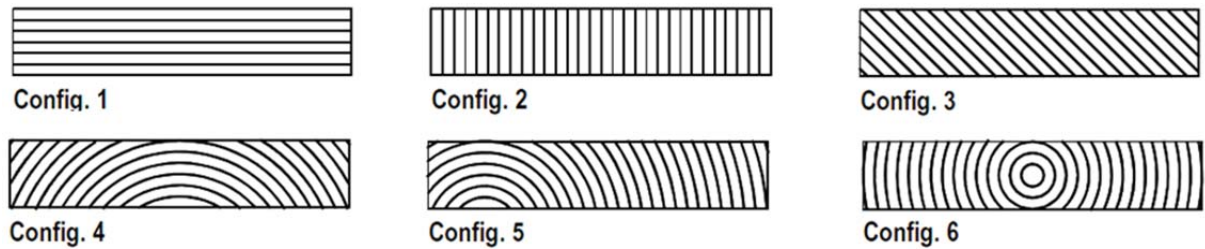


Abb. 1-29: In [32] untersuchte Jahringmuster

Die Konfigurationen 1,2 und 3 stellen mit ihren abstrahierten Jahringen zwar lediglich theoretische Grenzfälle bei einem unendlich großen Stammdurchmesser dar, erlauben aber Rückschlüsse auf realistische Schnittmuster. Konfiguration 4, 5 und 6 sind mögliche, Konfiguration 4 wohl, bedingt durch den industriell meist durchgeführten mehrstieligen, kernparallelen und zentrisch-orientierten Einschnitt, die häufigste in Wirklichkeit vorkommende Anordnung.

Die Lastaufbringung erfolgt in der numerischen Berechnung über beidseitig starr mit der Probe verbundenen Laschen (Abb. 1-30). Diese besitzen die Kennwerte  $E_X / E_Y / G_{XY} = 13.000 / 500 / 700 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $\nu_{XY} = 0,015 [-]$ .

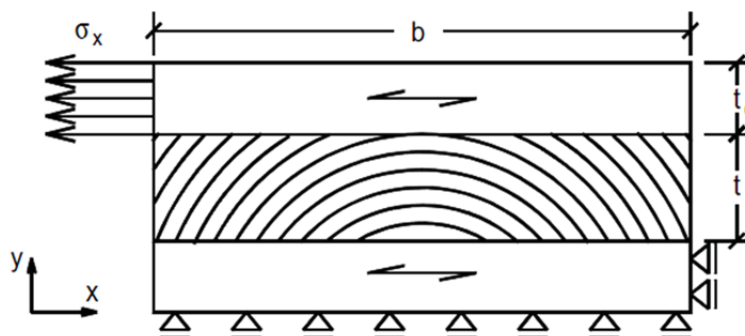


Abb. 1-30: Finite Elemente Modell aus [32] zur Untersuchung des Einflusses der Jahringlage auf den Rollschubmodul

- $b$  ... Breite = 150 mm
- $t$  ... Brettstärke = 30 mm
- $t_0$  ... Laschenstärke = 20 mm

Maximal- und Minimalwert der bei den unterschiedlichen Schnittmustern auftretenden Rollschubmoduln unterscheiden sich um den Faktor Vier, was den Einfluss der Brettlage sehr klar verdeutlicht. Liegende und stehende Jahringe, also solche, die parallel zu einer der Brettseiten verlaufen, bewirken eine Verringerung des Rollschubmoduls, jene in einem Winkel von  $45^\circ$  geneigten steigern diesen.

Der höchste Wert unter den realistischen Schnittmustern tritt bei Konfiguration 4 auf, da hier der Anteil an  $45^\circ$  geneigten Jahringen am größten ist. Er übersteigt jenen der Konfiguration 6 um 50 % (Abb. 1-31).

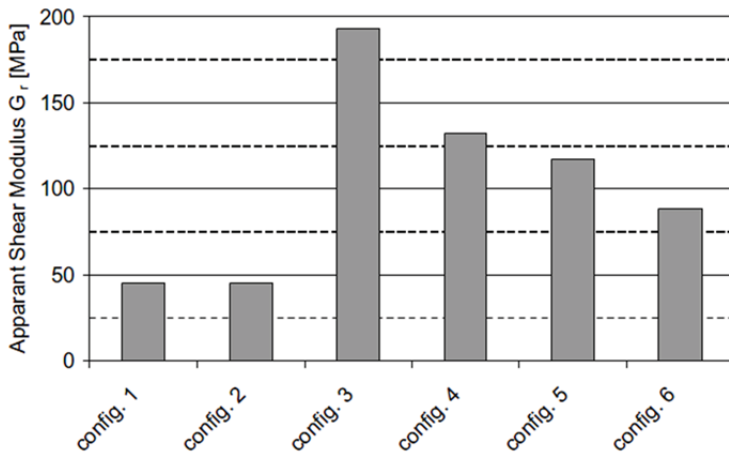


Abb. 1-31: Ergebnisse der Finite Elemente Untersuchung für die Rollschubmoduln unterschiedlicher Jahrringlagen [32]

Um die Erkenntnisse für Brettlagenholz anwenden zu können modifiziert Jakobs [33] die Randbedingungen aus [32]. Die Verdrehung der oberen – der Lasteinleitung dienenden – Lasche wird durch die Einführung zusätzlicher Lager verhindert und so die Behinderung der freien Verdrehung durch die Biegesteifigkeit benachbarter Lagen besser abgebildet (Abb. 1-32).

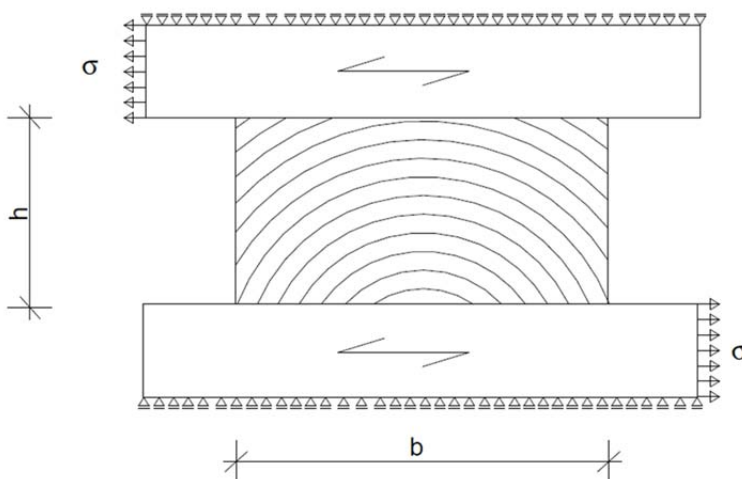


Abb. 1-32: Finite Elemente Modell aus zur Ermittlung von Rollschubmoduln von in Brettlagenholz eingesetzten Brettern

Als Ergebnis liefert Jakobs Grafiken, aus denen sich der Rollschubmodul für Bretter mit den geometrischen Verhältnissen  $h/b = 0,2$  bzw.  $0,33$  bzw.  $1,0$  [-] je nach Lage in einem Stamm mit 400 mm Durchmesser ablesen lässt (Abb. 1-33). Analog zu den Erkenntnissen von [32] erreichen die Werte dort Maxima, wo der Anteil der um  $45^\circ$  geneigten Jahrringe am größten ist. Stehende und liegende Jahrringe führen weiterhin dazu, dass geringere Moduln bei Rollschubbelastung vorhanden sind. Jakobs weist daraufhin, dass eine experimentelle Untersuchung dieser Finite Elemente Analyse bisher nicht durchgeführt wurde, jedoch notwendig scheint.

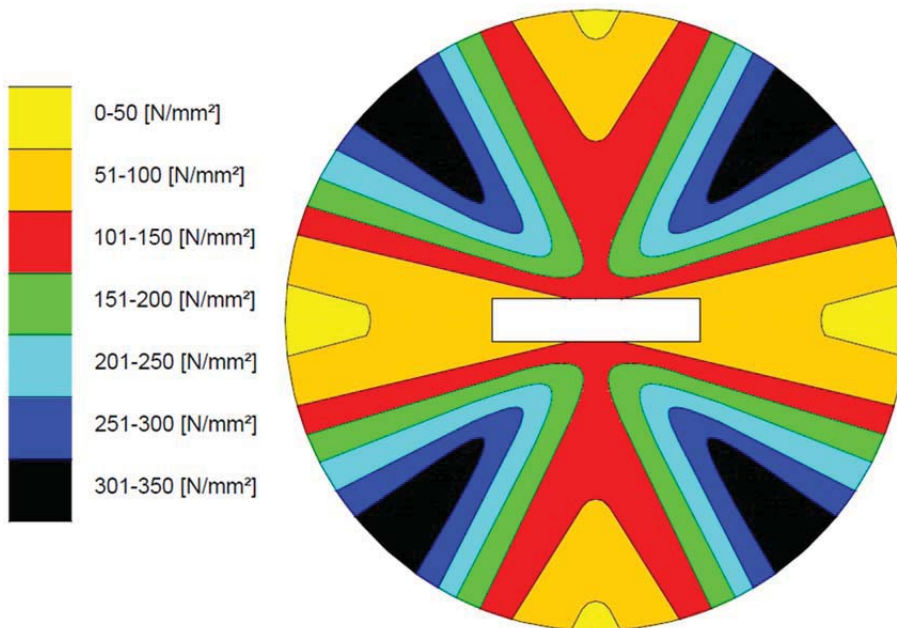


Abb. 1-33: Rollschubmodul für unterschiedliche Stammlagen bei  $b / d = 5$  [-] und Stammdurchmesser  $D = 400$  mm [33]

Görlacher [31] ermittelt die Eigenfrequenz von Prüfkörpern mit Jahrringneigungen von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  und berechnet deren Rollschubmodul. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise findet sich in Abschnitt 1.4.1.6.

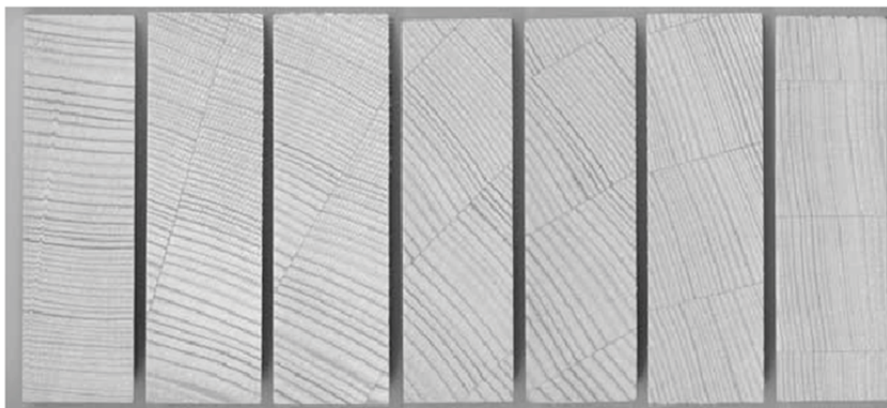


Abbildung 1-1: Jahrringverläufe von in [31] untersuchten Proben

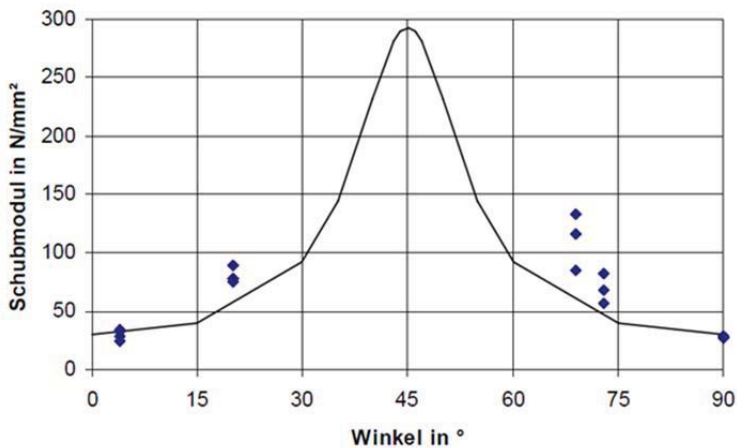


Abb. 1-34: Rollschubmodul in Abhängigkeit vom Winkel  $\beta$  der Jahrringe [31]

Die Ergebnisse der an 160 Fichtenholz-Prüfkörper mit unterschiedlichen Jahrringverläufen durchgeführten Versuche zeigen, wie auch [32] und [33], den Einfluss der Lage des Brettes im Stamm auf. Für Winkel der Jahrringe zwischen  $35^\circ$  und  $55^\circ$  nimmt der Schubmodul derart hohe Werte an, dass, bei gleichzeitig sinkendem Elastizitätsmodul, das  $E_{90} / G_{9090}$ -Verhältnis zu gering ist, um den Schubmodul aus der Schwingungsgleichung ermitteln zu können.

Feichter [34] führt in seiner Masterarbeit numerische Untersuchungen bezüglich des Rollschubmoduls durch und stellt dabei eine starke Abhängigkeit des effektiven Wertes von der Lage des Brettes im Stamm fest. Höchste Werte werden dabei von Halbrifftbrettern, bei denen eine Jahrringneigung von annähernd  $45^\circ$  vorliegt, sowie bei Kernbrettern erzielt. Feichter gibt an, dass der effektive Rollschubmodul sinkt, je weiter das Brett vom Kern entfernt liegt. Die Randbedingungen und Bezeichnungen sind Abb. 1-35 dargestellt.



Abb. 1-35: Finite Elemente Modell aus [34]

Den Untersuchungen legt Feichter vergleichend technisches Material mit einem nominellen Rollschubmodul von  $50 \text{ N/mm}^2$  und  $G_{0,\text{mean}} = 690 \text{ N/mm}^2$  sowie Material nach Neuhaus [35] mit  $G_{RL} = 42 \text{ N/mm}^2$ ,  $G_{0,\text{mean}} = 623 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu = 0,6021$  zugrunde. Die Berechnungen werden mit zylindrischem und kartesischem Koordinatensystem durchgeführt und deren Ergebnisse auf den Referenzwert ( $42$  bzw.  $50 \text{ N/mm}^2$ ) bezogen dargestellt. Im kartesischen System wird die Jahr-

ringneigung zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  variiert. Der radiale Abstand sowie die Exzentrizität sind die veränderlichen Parameter in den Berechnungen mit zylindrischem Koordinatensystem.

Aus der transformierten Materialsteifigkeitsmatrix lässt sich die Formel für den Rollschubmodul in Abhängigkeit vom Winkel  $\beta$  ablesen (Gl. (1-2)). Wird dabei  $E_{90,\text{mean}} = 370 \text{ N/mm}^2$  gesetzt, ergibt sich der in Abb. 1-36 dargestellte Zusammenhang aus Rollschubmodul und dem Winkel  $\beta$  der Jahrringe [34].

$$G_{R,\beta}(\beta) = 2 \cdot \cos^2(\beta) \cdot \sin^2(\beta) \cdot E_{90,\text{mean}} + (\cos^4(\beta) - 2 \cdot \cos^2(\beta) \cdot \sin^2(\beta) + \sin^4(\beta)) \cdot G_{R,\text{mean}} \quad \text{Gl. (1-2)}$$

$G_{R,\beta}$  ... Rollschubmodul [ $\text{N/mm}^2$ ]  
 $\beta$  ... Winkel der Jahrringe [ $^\circ$ ]  
 $E_{90,\text{mean}}$  ... Elastizitätsmodul normal zur Faser [ $\text{N/mm}^2$ ]

Aus Abb. 1-36 geht erneut die starke Abhängigkeit des Rollschubmoduls vom Jahrringmuster hervor, die Ergebnisse aus [31] und [33] werden hierdurch bestätigt.

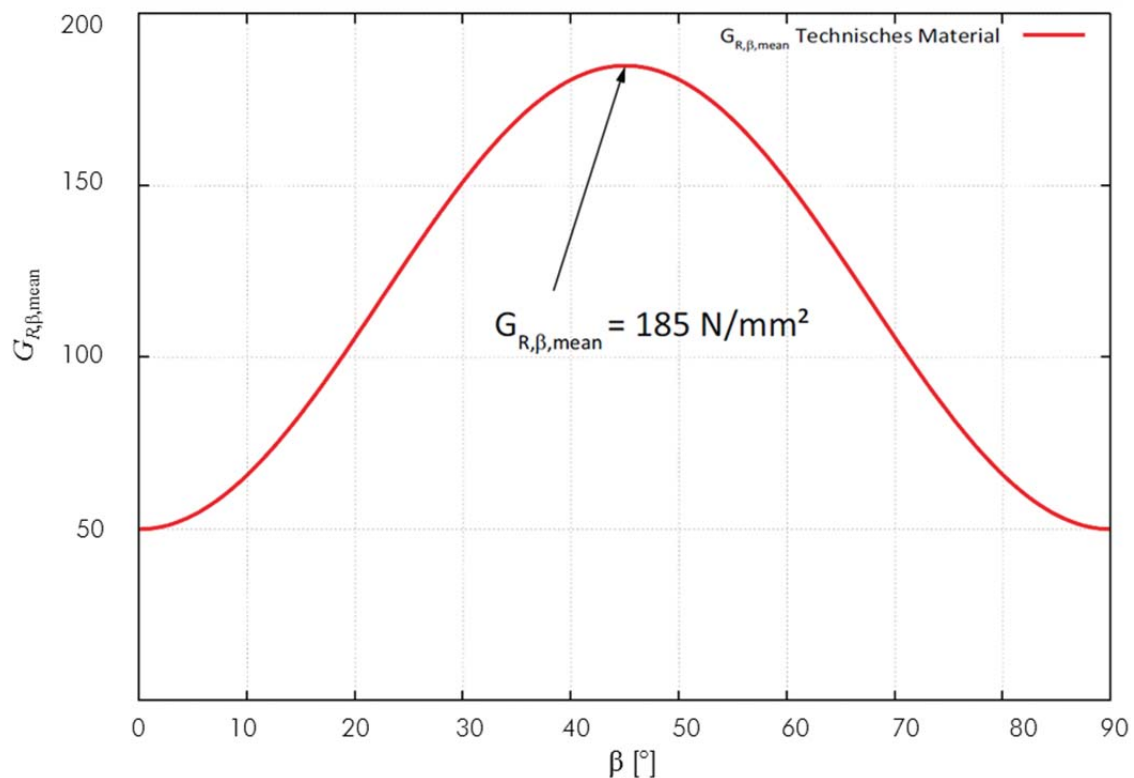


Abb. 1-36: Rollschubmodul in Abhängigkeit vom Winkel der Jahrringe [34]

Für unterschiedliche Brettstärken ( $15 \text{ mm} \leq d \leq 40 \text{ mm}$ , 5 mm-Schritte sowie  $d = 32 \text{ mm}$ ) wird neben Material und Koordinatensystem auch die Brettbreite variiert ( $60 \text{ mm} \leq b \leq 180 \text{ mm}$ , 30 mm-Schritte) und der unter Abschnitt 1.3.4 näher betrachtete Einfluss des geometrischen Verhältnisses des Brettes aufgezeigt, wobei eine Verringerung der Brettbreite einher geht mit sinkenden Materialkennwerten.

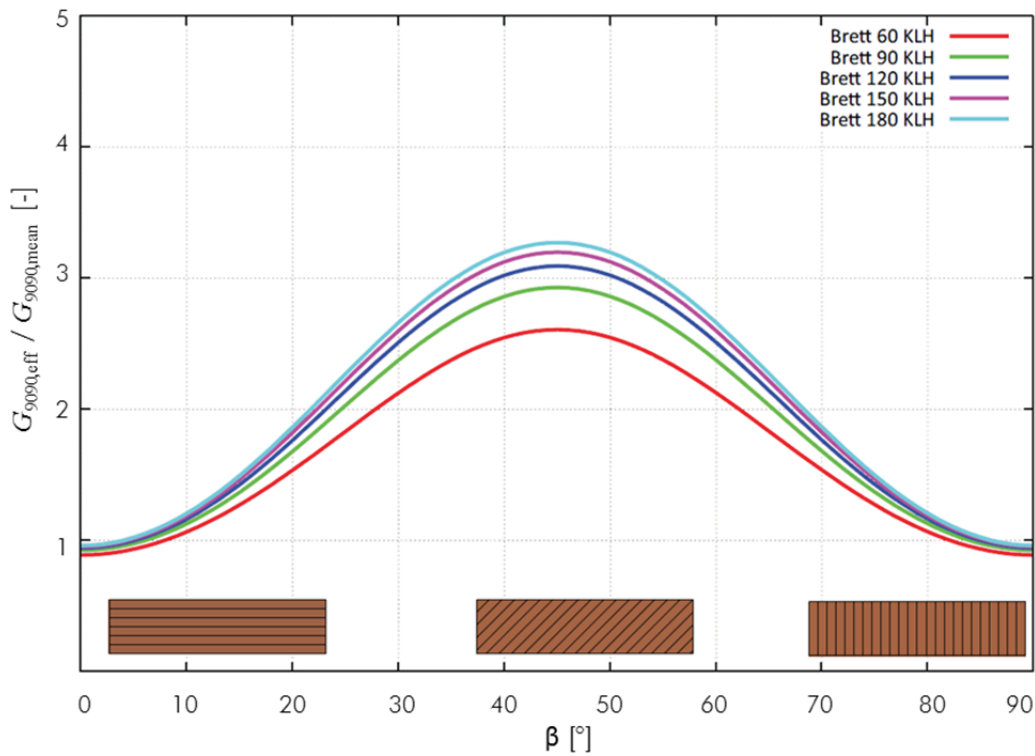


Abb. 1-37: Rollschubmodul in Abhängigkeit der Jahrringneigung für  $h = 32$  mm, technisches Material und kartesisches Koordinatensystem [34]

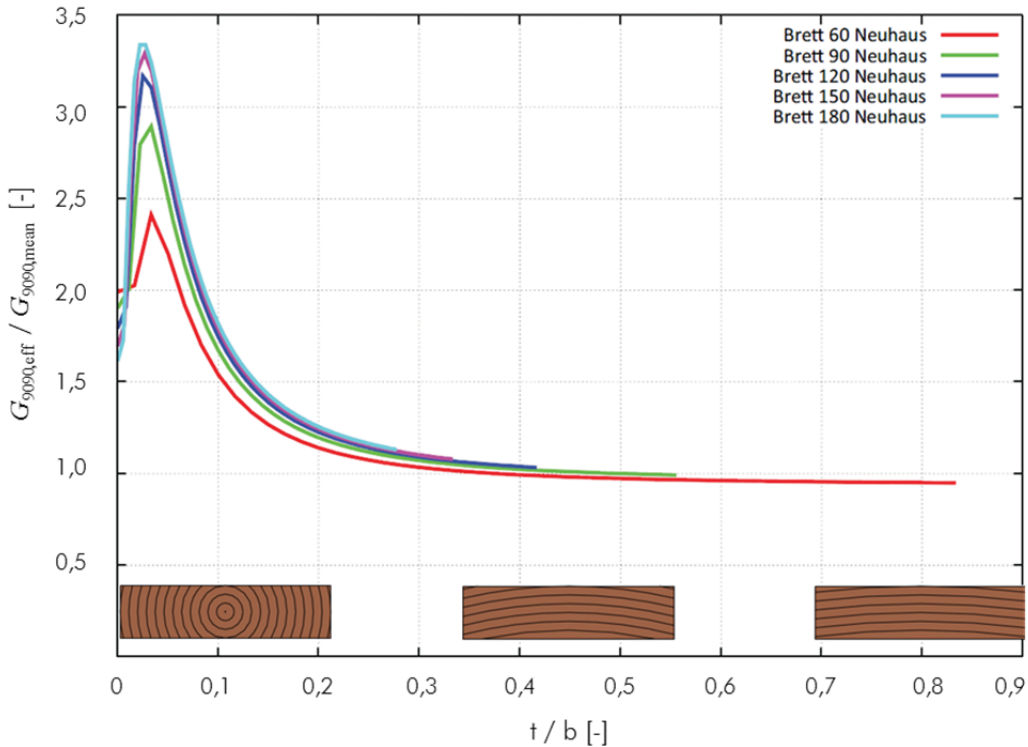


Abb. 1-38: Rollschubmodul in Abhängigkeit von der Lage des Brettes im Stamm für  $d = 32$  mm, Material nach Neuhaus und zylindrisches Koordinatensystem [34]



Exemplarisch sind die Ergebnisse der numerischen Simulation für Bretter mit der Dicke  $d = 32$  mm, einmal mit technischem Material und kartesischem Koordinatensystem (Abb. 1-37) und vergleichend Material nach Neuhaus unter Verwendung eines zylindrischen Koordinatensystems (Abb. 1-38) dargestellt. Die Bezeichnung  $t$  gibt dabei den Abstand des Brettmittelpunktes zur Stammachse an.

### 1.3.4 Geometrische Verhältnisse des Einzelbrettes

Von Jakobs [33] werden Biegeversuche an 3-schichtigen Plattenstreifen mit querliegender Mittelschicht durchgeführt. Die geometrischen Abmessungen der Träger (Länge, Breite, Schichthöhe und Gesamthöhe) werden für sämtliche Prüfkörper konstant gehalten. Sortierung, Holzfeuchte und Versuchsdurchführung bleiben ebenso unverändert. Bei Änderung des Verhältnisses  $b / d$  bzw. geänderter Jahrringmuster in den Zwischenlagen wird eine deutlich veränderte Durchbiegung in Feldmitte beobachtet (Abb. 1-39).

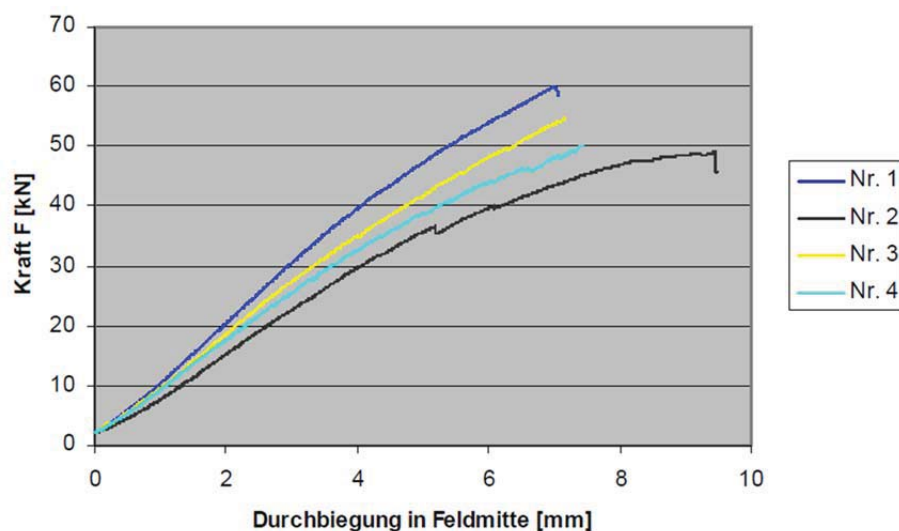


Abb. 1-39: Durchbiegung der Träger bei unterschiedlichen Mittellagen [33]

Die Plattenstreifen Nr. 2 und Nr. 3 besitzen Mittellagen mit einem  $b / d$ -Verhältnis von  $36 / 36 \text{ mm} = 1$ , die beiden anderen Plattenstreifen ein solches von  $126 / 36 \text{ mm} = 3,5$ .

In einer weiteren numerischen Untersuchung bestätigt Jakobs [33], dass die Schubverformungen stark vom  $d / b$ -Verhältnis des betrachteten Brettes abhängen, bei Unterschreitung eines Quotienten von 0,1 die Verformungen aber nicht weiter zunehmen. Für unterschiedliche Brettstärken  $d$  (17, 27, 33, 40 mm) variiert er die Brettbreite  $b$  (30, 50, 80, 120, 200, 300, 400 mm) und ermittelt die auftretenden Schubverformungen. Mit dem eigens definierten Faktor *uprozent*, der die nichtlineare Zunahme der Verformung eines Brettes im Vergleich zu einem Brett mit  $d / b = 0,1$  beschreibt, kann die Reduktion der Schubsteifigkeit errechnet werden.

Die FE-Simulationen werden mit Rollschubmoduln in der Höhe von 50, 100, 200, 300 N/mm<sup>2</sup> durchgeführt, wobei sich der Faktor *uprozent* verändert. Je größer der Rollschubmodul, desto stärker wirkt sich das  $d / b$ -Verhältnis aus.

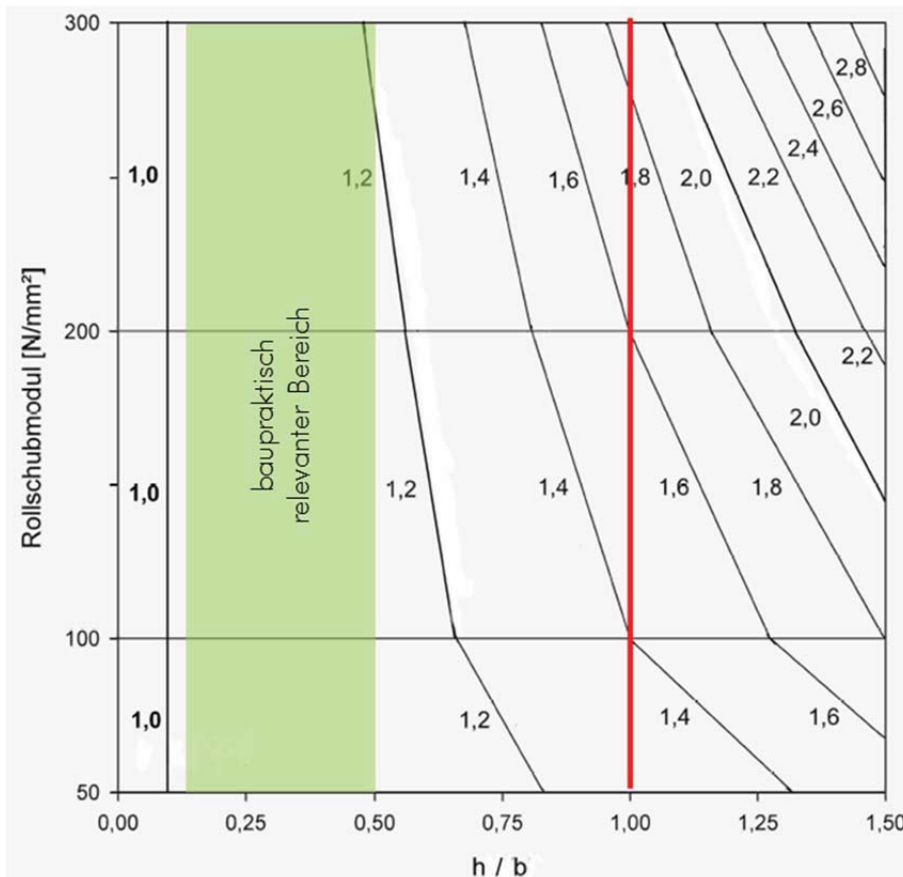


Abb. 1-40: Nomogramm zur Ermittlung des Faktors *uprozent* für unterschiedliche Rollschubmoduln und  $d/b$ -Verhältnisse nach [33]; ( $h = d =$  Brettstärke)

Aus dem von Jakobs erstellten Nomogramm (Abb. 1-40) lässt sich zwar für sehr große  $d/b$ -Verhältnisse eine Änderung von *uprozent* bei unterschiedlichen Rollschubmoduln erkennen, für den baupraktisch relevanten Bereich des  $d/b$ -Verhältnisses (ca.  $0,1 \leq d/b \leq 0,5$ ) besitzt dieses allerdings nur eingeschränkte Aussagekraft.

Scholz [36] gibt an, dass die Rollschubfestigkeit abhängig vom Verhältnis der ungestörten Brettbreite zur Brettstärke ist und sich aus der Schubfestigkeit in der Tangential- bis Radialebene, multipliziert mit einem Beiwert, errechnet werden kann. Dieser Reduktionsfaktor  $k_{Red}$  kann anhand von Traglaststudien an Schubblöcken abgeleitet werden und liegt bei üblichen Verhältnissen von  $d/b = 1/2 \dots 1/10$  zwischen 0,8 und 0,9.

Mestek [37] beobachtet in seinen experimentellen Untersuchungen (siehe auch 1.4.1.2 und 1.4.2.2) einen mit den theoretischen Analysen von Kreuzinger und Scholz [38] „...tendenziell übereinstimmenden...“ Zusammenhang des Verhältnisses Fugenabstand  $l_F$  zu Brettstärke  $d$  und der Rollschubfestigkeit. Bei Prüfkörpern, deren Querlagen Entlastungsnuten aufweisen, tritt das Versagen aufgrund einer kombinierten Beanspruchung aus Rollschub und Querkzug senkrecht zur Faser ein, wobei ein abnehmendes  $l_F/d$ -Verhältnis zunehmende Querkzugbelastungen zur Folge hat. Einem nach Gl. (1-3) errechneten theoretischen Reduktionsfaktor von 79 % für  $l_F/d = 3,0$  steht eine experimentell ermittelte Festigkeitsminderung bei Kleinversuchen mit  $l_F/d = 60/20 \text{ mm} =$

3,0 auf 76 % gegenüber, jeweils bezogen auf Prüfkörper ohne Entlastungsnuten mit schmalseitenverklebten Querlagen.

$$k_{Red} = 1 - \left[ \frac{d}{l_F} \cdot 2 \cdot \sin \left( \frac{l_F}{d} \cdot 6 \right) \right] \quad \text{Gl. (1-3)}$$

$k_{Red}$  ... Reduktionsfaktor  
 $d$  ... Brettstärke [mm]  
 $l_F$  ... Fugenabstand [mm]

### 1.3.5 Holzfeuchte

Sowohl Festigkeiten als auch Steifigkeiten hängen von der Holzfeuchte ab. ÖNORM EN 384 [39] enthält für nicht bei der Bezugsholzfeuchte von 12 % geprüfte Proben mit Feuchtegehalt zwischen 10 und 18 % folgende Regelungen zur Anpassung des 5 %-Quantils bzw. des Mittelwertes:

- 1.) Biege- und Zugfestigkeit: keine Anpassung
- 2.) Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung: Änderung um 3 % je Prozent Holzfeuchteunterschied
- 3.) Elastizitätsmodul: Änderung um 2 % je Prozent Holzfeuchteunterschied
- 4.) für (2) und (3) gilt: die Werte werden erhöht, wenn Werte mit einer höheren Holzfeuchte umzurechnen sind und umgekehrt.

Brandner et al [40] schlagen Gl. (1-4) bzw. Gl. (1-5) zur Korrektur der Schubfestigkeit  $f_v$  und des Schubmoduls  $G_{090}$  für Proben, die von der Bezugsfeuchte 12 % abweichen, vor.

$$f_{v,12} = f_{v,u} \cdot \left[ 1 - (12 - u) \cdot \frac{3}{100} \right] \quad \text{Gl. (1-4)}$$

$f_{v,12}$  ... Schubfestigkeit bei 12 % Feuchtegehalt [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_{v,u}$  ... Schubfestigkeit bei Feuchtegehalt  $u$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 $u$  ... Feuchtegehalt [%],  $8 < u < 20$  %

$$G_{090,12} = G_{090,u} \cdot \left[ 1 - (12 - u) \cdot \frac{1}{100} \right] \quad \text{Gl. (1-5)}$$

$G_{090,12}$  ... Schubmodul normal zur Faser bei 12 % Feuchtegehalt [N/mm<sup>2</sup>]  
 $G_{090,u}$  ... Schubmodul normal zur Faser bei Feuchtegehalt  $u$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 $u$  ... Feuchtegehalt [%],  $8 < u < 20$  %

Liegt die Temperatur der Probe während der Prüfung zwischen 15 und 25 °C, so ist keine darüber hinausgehende Korrektur vorzunehmen.

Neuhaus [35] bestimmt in seiner Dissertation von 1981 sämtliche (zwölf) Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit der Holzfeuchte (siehe auch 1.4.1.1). Dabei stellt er fest, dass sich für den als „Gleitzahl  $S_{55}$ “ bezeichneten Kehrwert des Rollschubmoduls „...im hygroskopischen Bereich fast dreifache Werte...“ ergeben.

Werden die in [35] angegebenen Werte der Nachgiebigkeiten zu Moduln umgerechnet und abermals in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit  $u$  dargestellt, so ist ein nahezu linearer Zusammenhang erkennbar (Abb. 1-41). Unter Anwendung linearer Regression lässt sich  $G_R$  als Funktion von  $u$  durch Gl. (1-6) sehr gut beschreiben, demnach nimmt dieser mit jedem Prozent Feuchtezunahme um 1,85 % ab.

$$G_R = -1,85 \cdot u + 65,1 \quad \text{Gl. (1-6)}$$

$G_R$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]

$u$  ... Holzfeuchte [%]

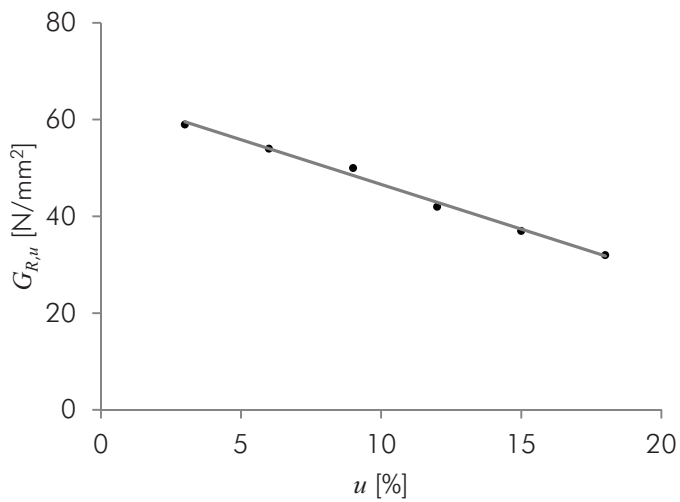


Abb. 1-41: Annähernd linearer Zusammenhang zwischen Rollschubmodul und Holzfeuchtigkeit nach [35]

## 1.4 Untersuchung geeigneter Prüfkfigurationen

---

Das Erlangen „korrekter“ Materialkennwerte setzt den Einsatz geeigneter Prüfkfigurationen und -Abläufe voraus. Während sich für die Ermittlung einiger Kennwerte im Holzbau bereits Verfahren als passend erwiesen haben und in der Praxis ausreichend erprobt wurden, so kann im Speziellen bei Prüfstudien betreffend Rollschub auf ein solches nicht zurückgegriffen werden. Zahlreiche, in Zugang, Aufwand, Materialbedarf, „Reinheit“ der Schubbelastung etc. höchst unterschiedliche Verfahren werden in der Literatur beschrieben. Im Folgenden werden einige dieser kurz vorgestellt, Studien, in denen diese Verfahren Anwendung fanden betrachtet und ihre Eignung für die durchzuführende Studie hinsichtlich wesentlicher Aspekte diskutiert. Zuerst werden Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Rollschubeigenschaften an einzelnen Kleinproben, schließlich solche zur Ermittlung von Systemkennwerten von Brettsperrholz behandelt.

Zur Auswahl einer geeigneten Prüfkfiguration zur Ermittlung der Rollschubeigenschaften an Vollholz oder Holzprodukten ist Augenmerk auf für den praktisch tätigen Ingenieur sinngebende Werte zu legen. Zudem gilt die Stabilität des Prüfverfahrens im Sinne der Wiederholbarkeit von Prüfergebnissen als wesentlich.

### 1.4.1 Versuche mit Einzelproben

Die wesentlichen Vorteile, die Kleinprobenversuche mit sich bringen, liegen neben dem vergleichsweise eingeschränkten Aufwand und den geringeren Kosten vor allem in der Möglichkeit, verschiedene Eigenschaften von Prüfkörpern gezielt variieren zu können und daraus resultierende Änderungen von Ergebnissen unmittelbar interpretierbar zu machen. In Anbetracht der zahlreichen Einflussparameter auf die Materialkennwerte, welche bereits in Abschnitt 1.3 angeführt wurden, scheint eine zumindest teilweise Durchführung der Studie an Kleinprobenversuchen als zweckmäßig bzw. unumgänglich.

#### 1.4.1.1 Torsionsversuch

Bei Torsionsversuchen handelt es sich um indirekte Verfahren zur Ermittlung der Schubmoduln bzw. deren Kehrwerte, der Gleitzahlen. Weil je zwei Schubmoduln jedes Stabes unbekannt sind, kann nicht direkt über die Messung der Verdrehungen auf die gesuchten Kennwerte geschlossen werden. Unter Zugrundelegung rhombischer Anisotropie kann bei Verwendung prismatischer Prüfkörper die von Horig [41] entwickelte  $R(p)$ -Methode, ein iteratives Verfahren, angewandt werden.

In der bereits in Abschnitt 1.3.5 erwähnten Dissertation von Neuhaus [35] werden, mit dem Hintergrund, sämtliche zwölf (davon neun unabhängige) Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit der Holzfeuchte ermitteln zu wollen, u.a. Torsionsversuche verwendet und mithilfe der  $R(p)$ -Methode [41] auf die Gleitzahlen geschlossen. Aus astfreiem Vollholz gewonnene Würfel mit einer Kantenlänge von rund 22 mm werden dazu wieder zu Stäben verleimt und diese auf ein Maß von 20 / 20 / 240 mm gebracht. So können neben Torsionsstäben mit Längsachse parallel zur Holzfaser auch Radial- bzw. Tangentialstäbe hergestellt und geprüft werden.

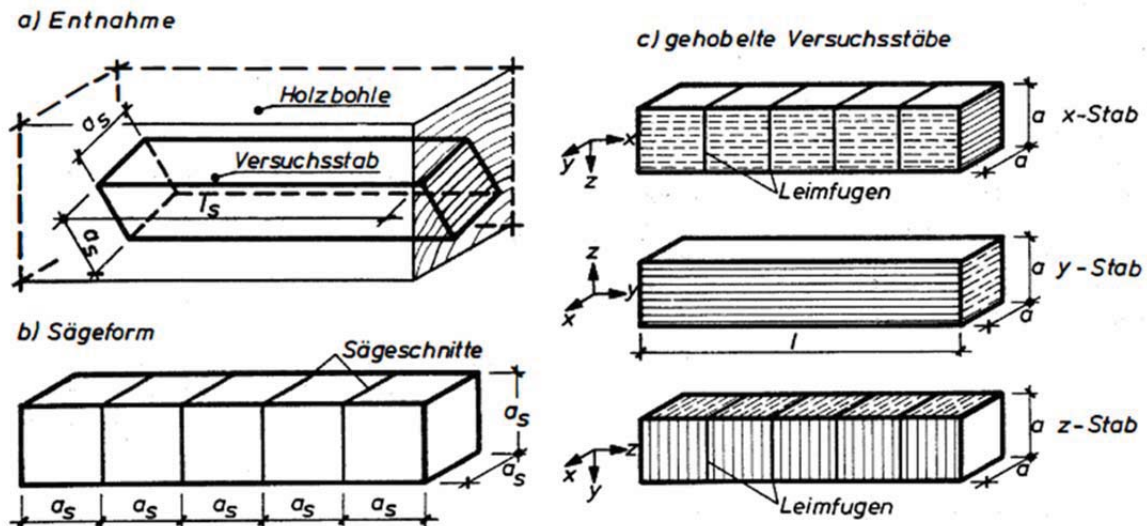


Abb. 1-42: Entnahme der Holzwürfel (a) und Herstellung (b) der Stäbe sowie Darstellung der drei unterschiedlichen Stabtypen (c) [35]

Die von Neuhaus [35] verwendeten Bezeichnungen der Achsen und damit auch jene der Spannungen und Elastizitätszahlen unterscheiden sich von jenen in dieser Arbeit. In Abb. 1-43 sind beide Bezeichnungen gegenübergestellt, dies soll dem leichtern Verständnis der folgenden Ausführungen dienen.

Aus dem, um den Einfluss der Holzfeuchteänderung erweiterten, Elastizitätsgesetz (Abb. 1-44) lässt sich aus der fünften, grün markierten, Zeile der Zusammenhang aus der Schubverzerrung  $\gamma_{zx}$  und der dabei auftretenden Schubspannung  $\tau_{zx}$  durch die Gleitzahl  $S_{55}$  erkennen. Unter Beachtung der unterschiedlichen Achsbezeichnungen entspricht diese dem Kehrwert des Rollschubmoduls  $G_{RT}$ .

Für eine Holzfeuchtigkeit von 11,5 % ermittelt Neuhaus [35] eine mittlere Gleitzahl  $S_{55}$  von  $22,012 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$ , was einem Schubmodul von  $45,4 \text{ N/mm}^2$  entspricht. Der CoV liegt dabei bei rund 21 %.

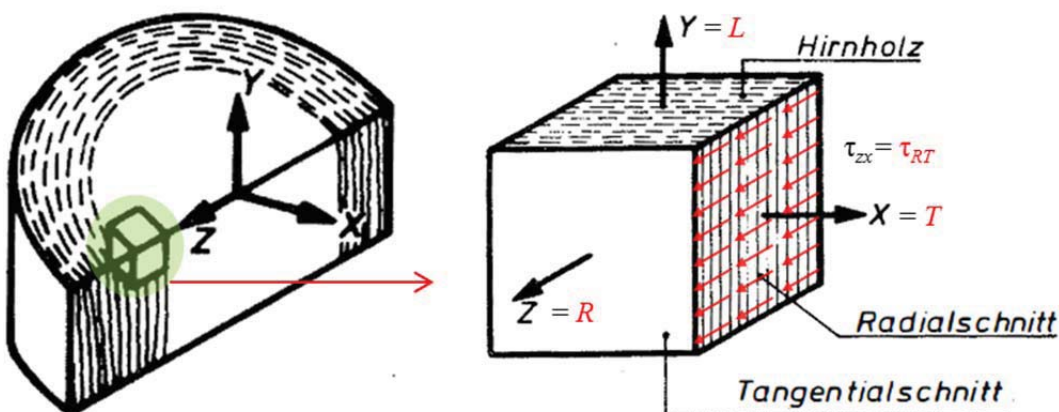


Abb. 1-43: Von Neuhaus [35] verwendete Bezeichnungen für Achsen und Spannungen und entsprechende Begriffe in dieser Arbeit

Neben dem erwähnten Nachteil der indirekten Berechnung ist zur Durchführung von Torsionsversuchen ein beträchtlicher Aufwand in der Herstellung der Prüfkörper notwendig. Die sorgfältige Verklebung der aus der richtigen Lage im Stamm gewonnenen und dann in Würfel geschnittenen Stäbe stellt einen zusätzlichen Arbeitsschritt dar, die Klebefläche zwischen den Würfeln selbst bedingt ohnedies eine, wenn auch nur geringe, Unterbrechung der natürlichen Holzstruktur. Durch den Aufbau der Torsionsstäbe aus einzelnen Würfeln werden stets Systeme gebildet, die Prüfung von, in seiner natürlichen Struktur, „ungestörten“ Holz ist daher nicht möglich.

$$\begin{aligned}
 \epsilon_x &= s_{11} \sigma_x + s_{12} \sigma_y + s_{13} \sigma_z & + \alpha_x (\Delta n) \\
 \epsilon_y &= s_{21} \sigma_x + s_{22} \sigma_y + s_{23} \sigma_z & + \alpha_y (\Delta n) \\
 \epsilon_z &= s_{31} \sigma_x + s_{32} \sigma_y + s_{33} \sigma_z & + \alpha_z (\Delta n) \\
 \gamma_{yz} &= & s_{44} \tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= & s_{55} \tau_{zx} \\
 \gamma_{xy} &= & s_{66} \tau_{xy}
 \end{aligned}$$

Abb. 1-44: Um Feuchtigkeitsänderungen erweitertes Elastizitätsgesetz [35]

Die geringen Prüfkörperabmessungen können im Sinne einer einfacheren Betrachtung von definierten Rohdichten, Jahrringlagen, Jahrringdichten und weiteren Aspekten einerseits positiv beurteilt werden, die Prüfung von Kleinstproben als Clear Wood stellt allerdings Ergebnisse zur Verfügung, deren Anwendbarkeit für die Ermittlung von Systemkennwerten von Brettsperrholz zumindest in Frage gestellt werden müssen. Eine eingehende Untersuchung hinsichtlich der Abhängigkeit der Rollschubeigenschaften von der Geometrie von Brettlamellen ( $b/d$ -Verhältnis) ist außerdem mit einem erheblichen Aufwand aufgrund der vorzunehmenden Änderung an der Prüfapparatur verbunden.

#### 1.4.1.2 Schubversuch nach ÖNORM EN 408 [42]

ÖNORM EN 408 [42] beschreibt in Punkt 18 ein „Verfahren zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung“ und legt Abmessungen und Eigenschaften der einzelnen Komponenten (Abb. 1-45) sowie die Durchführung der Prüfung fest. Dabei werden seitlich auf einen Prüfkörper abgeschrägte Stahlplatten aufgeklebt und unter einem Winkel von  $14^\circ$  eine Kraft eingeleitet, die den Prüfkörper auf Schub versagen lässt.

Aufgrund der Anordnung des Versuchskörpers tritt neben der Kraft parallel zur Faser bzw. zu den Stahlplatten auch eine Kraftkomponente normal dazu auf, wodurch keine reine Schub-, sondern eine kombinierte Schub-Querdruck bzw. -Querzug-Belastung entsteht.

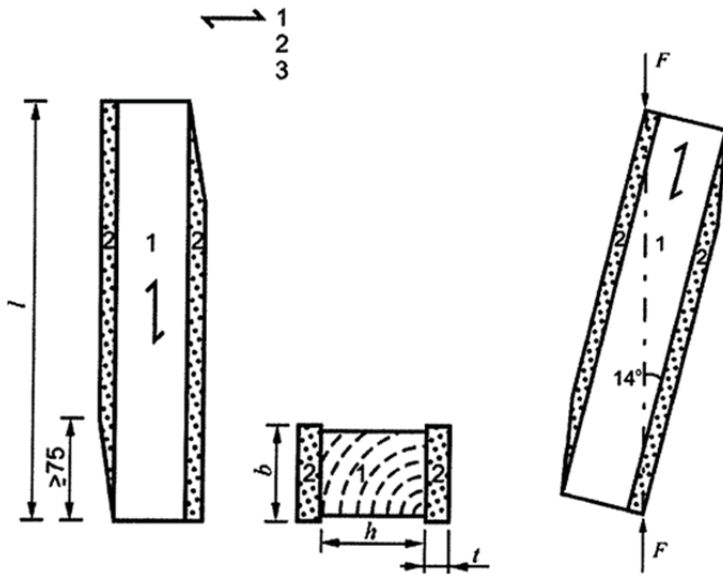


Abb. 1-45: Prüfkörperausbildung und Belastungsanordnung, Faserrichtung (1); Stahlplatte (2); Prüfkörper aus Holz (3); nach [42]

Mestek untersucht in seiner Dissertation [37], ob sich dieses Verfahren auch zur Bestimmung der Rollschubeigenschaften eignet und optimiert die Anordnung nach ÖNORM EN 408 [42] mithilfe FE-Analysen.

Sieben Prüfkonfigurationen (A bis G), die sich in Laschenmaterial (Stahl / Buche) und -stärke sowie Winkel der Krafteinleitung ( $6^\circ / 10^\circ$ ) unterscheiden, werden hinsichtlich ihrer Spannungsverläufe parallel und normal zur Schubfuge analysiert und bewertet.

Bei sämtlichen Varianten mit einem Kraft-Scherfugenwinkel von  $10^\circ$  stellen sich in den Randbereiche Druckspannungen normal zur Scherfuge ein, in den zentralen Bereichen liegt stets eine geringe Querkzugspannung vor (Abb. 1-46).



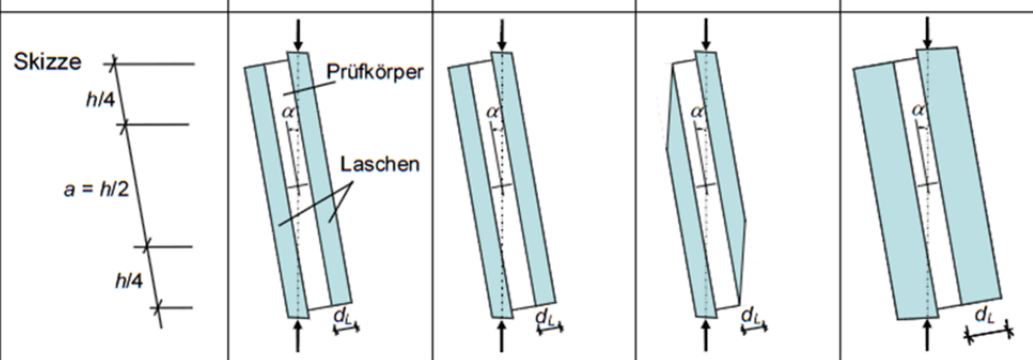
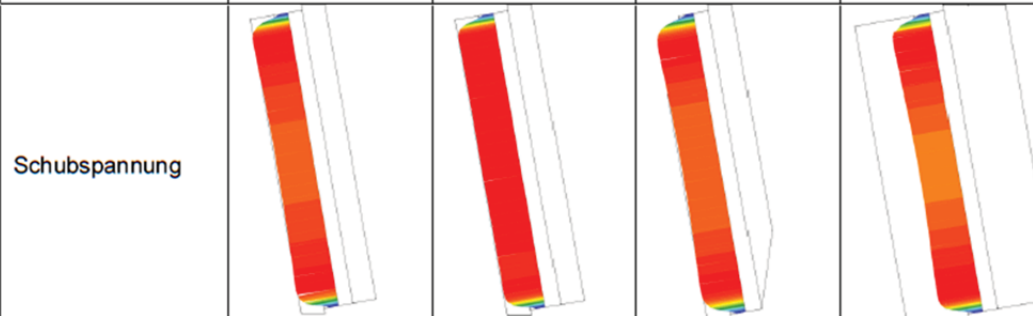
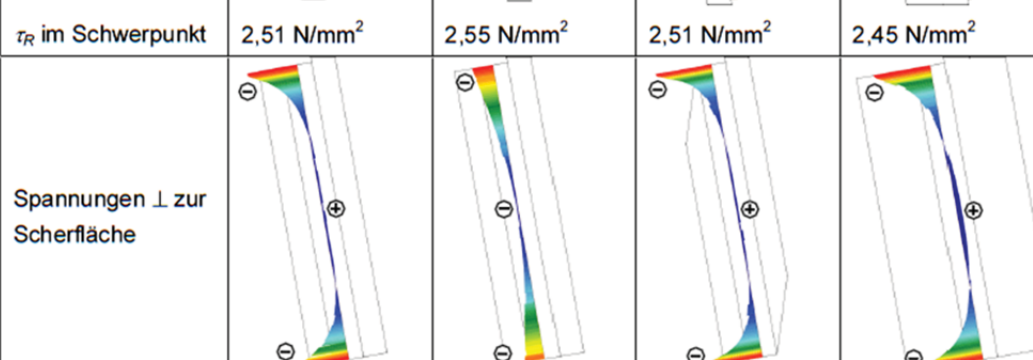
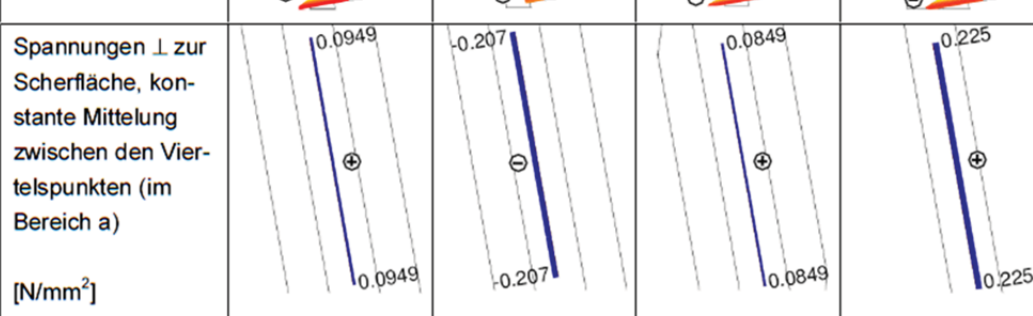
Variante	A	B	C	D
Laschen aus	Buche	Stahl	Buche	Buche
Dicke $d_L$	16 mm	16 mm	16 mm	40 mm
Skizze				
Schubspannung				
$\tau_R$ im Schwerpunkt	2,51 N/mm <sup>2</sup>	2,55 N/mm <sup>2</sup>	2,51 N/mm <sup>2</sup>	2,45 N/mm <sup>2</sup>
Spannungen $\perp$ zur Scherfläche				
Spannungen $\perp$ zur Scherfläche, konstante Mittelung zwischen den Viertelpunkten (im Bereich a)				
[N/mm <sup>2</sup> ]	0,0949	-0,207	0,0849	0,225

Abb. 1-46: Gegenüberstellung der untersuchten Prüfkfigurationen A bis D [37]

Mestek [37] kommt zum Schluss, dass insgesamt Variante A mit Laschen aus Buchenholz mit einer Dicke von 16 mm und einem Neigungswinkel von 10° als Günstigste der Untersuchten zu bewerten ist, da sich ein relativ konstanter Schubspannungsverlauf in der Scherfuge einstellt und auch der Arbeits- und Materialaufwand vergleichsweise gering ist.

Um Kenntnis über den Einfluss des Querdruckes auf die Rollschubeigenschaften zu erlangen führt Mestek [37] weitere Prüfungen durch, bei denen eine planmäßige Kraft normal zur Scherfuge aufgebracht wird, die jeweils (zusätzlichen) Querdruck in der Höhe von  $0,5 \text{ N/mm}^2$  (Serie 2 und 6),  $1,0 \text{ N/mm}^2$  (Serie 3 und 7) oder  $1,5 \text{ N/mm}^2$  (Serie 4 und 8) erzeugt (Abb. 1-47).

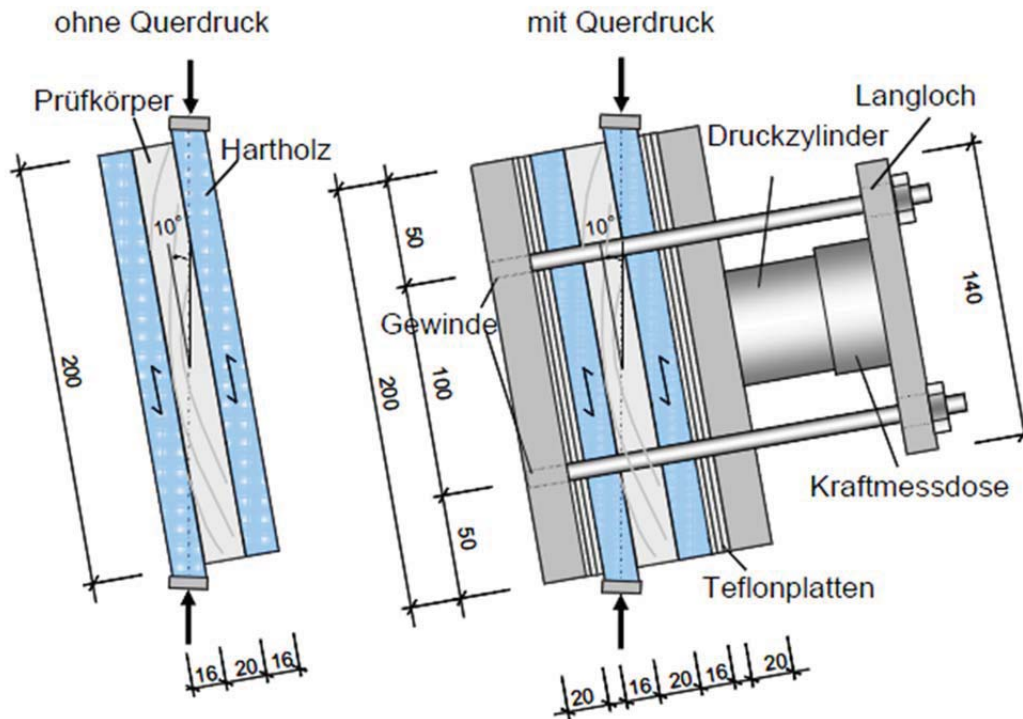


Abb. 1-47: Prüfkonfiguration ohne (links) und mit (rechts) zusätzlich aufgebrachtem Querdruck [33]

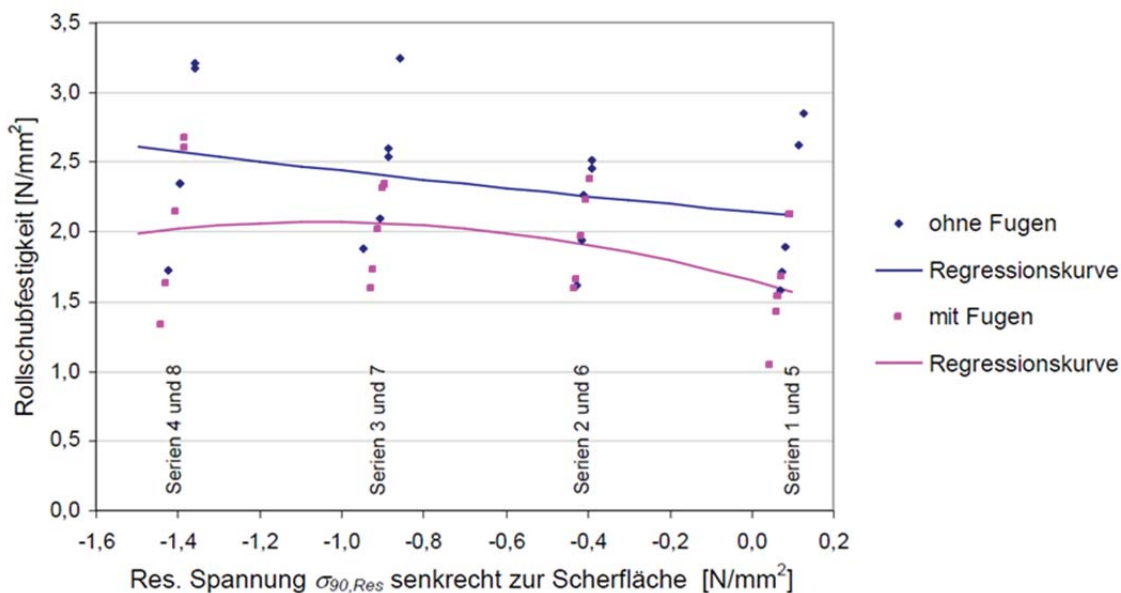


Abb. 1-48: Einzelwerte der Rollschubfestigkeit bei unterschiedlich hohem Querdruck sowie gefundene Regressionskurven [37]

In Abb. 1-48 sind die Rollschubfestigkeiten der unterschiedlich starkem Querdruck ausgesetzten Prüfkörper sowie die gefundenen Regressionskurven dargestellt. Generell lässt sich ein leichter Trend von zunehmenden Festigkeiten bei Erhöhung des Querdrucks erkennen, die relativ geringe Anzahl an Prüfkörpern sowie die starke Streuung der Ergebnisse für identen Querdruck sind bei Anwendung der angegebenen Regressionsfunktionen (Gl. (1-7), ohne Fugen,  $R^2 = 0,10$  und Gl. (1-8), mit Fugen,  $R^2 = 0,19$ ) allerdings zu bedenken.

$$f_R = 0,04 \cdot \sigma_{90,Res}^2 - 0,25 \cdot \sigma_{90,Res} + 2,15 \quad \text{Gl. (1-7)}$$

$$f_R = -0,38 \cdot \sigma_{90,Res}^2 - 0,80 \cdot \sigma_{90,Res} + 1,65 \quad \text{Gl. (1-8)}$$

$f_R$  ... Rollschubspannung

$\sigma_{90,Res}$  ... resultierende Spannung normal zur Scherfuge

Die der Prüfkonfiguration immanenten, normal zur Schubfuge wirkenden Spannungen werden dadurch berücksichtigt, dass die extern aufgebrachte Vorspannung mit der im mittleren Bereich, in dem das Versagen größtenteils beobachtet wurde, auftretenden Querzugspannung superponiert wird.

Dem unvermeidbaren Nachteil, nicht eine reine Schubbelastung, sondern zusätzlich einen ungewünschten, wenn auch, gemäß den Untersuchungen von Mestek [37] geringen Querdruck, in Kauf nehmen zu müssen, stehen zahlreiche Vorteile gegenüber:

- Mit dieser Konfiguration können sowohl Einzelbretter als auch, bei Anpassung der Laschengeometrie, Brettsperrholz geprüft werden.
- Die Herstellung der Prüfkörper ist einfach und wenig arbeitsintensiv, die Verwendung von Buchenlaschen bei Nadelholzproben senkt den Arbeitsaufwand noch zusätzlich.
- Die Messung der auftretenden Verformungen kann sowohl mittels Bildmessung (DSP-Digital Speckle Photography) als auch konventionellen Wegabnehmern (z.B. induktiv) erfolgen.

#### 1.4.1.3 Single-Cube-Apparatus (SCA)

Hassel et al. [43] führen mit dem vorgestellten Apparat Schubversuche an einzelnen Holz-Prüfwürfeln durch. Eine vertikale Kraft wird dabei durch den SCA über Stahlwalzen und -Winkel so auf den um  $31^\circ$  geneigten, eine Seitenlänge von 40 mm aufweisenden, Holzwürfel aufgebracht, dass dieser eine Schubbelastung erfährt (Abb. 1-49). Je nach Ebene, deren Schubmodul von Interesse ist, kann dieser Würfel unterschiedlich eingebaut und geprüft werden.

Mithilfe einer digitalen Fotokamera und geeigneter Software kann während der Prüfung über Bildmessung ein 2D-Verzerrungsbild erstellt und daraus die Verschiebungen und in Verbindung mit der eingeleiteten Kraft die Rollschubeigenschaften ermittelt werden.

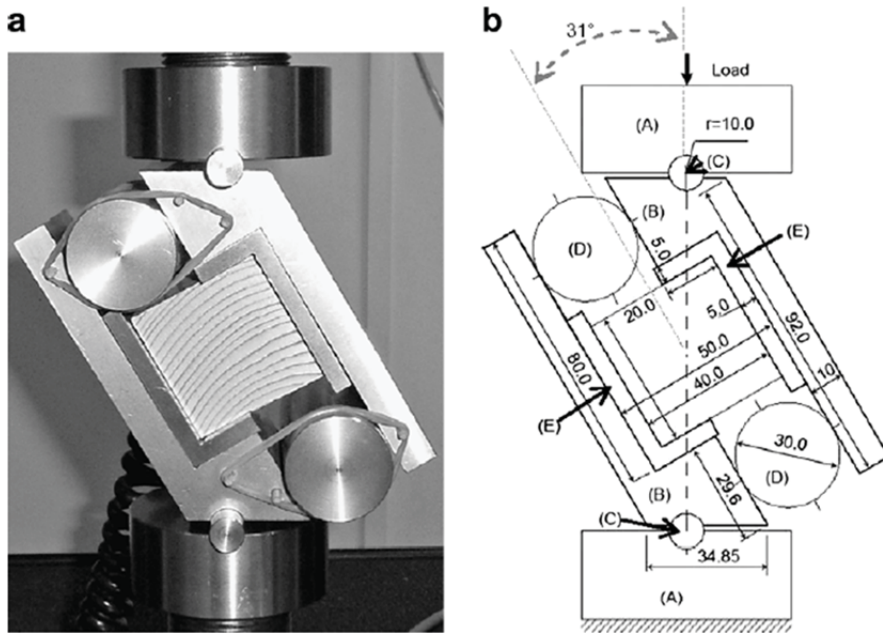


Abb. 1-49: Aufbau (a) und Abmessungen (b) einer SCA Prüfung [43]

Um die Apparatur sowie das Verfahren auf ihre Eignung zur Ermittlung der Rollschubeigenschaften zu überprüfen, wurden 18 Fichtenholz-Prüfkörper mit dem SCA getestet und das Verzerrungsbild optisch aufgenommen. Jeweils zur Hälfte wiesen die Prüfkörper stehende ( $G_{TR}$ ) bzw. liegende Jahrringe ( $G_{RT}$ ) auf. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung wurden anschließend mit den Resultaten einer parallel dazu durchgeführten FE-Analyse verglichen. Übereinstimmend zeigen beide Studien, dass sich in der Mitte des Prüfkörpers ein relativ großer Bereich konstanter Schubverzerrung einstellt (Abb. 1-50).

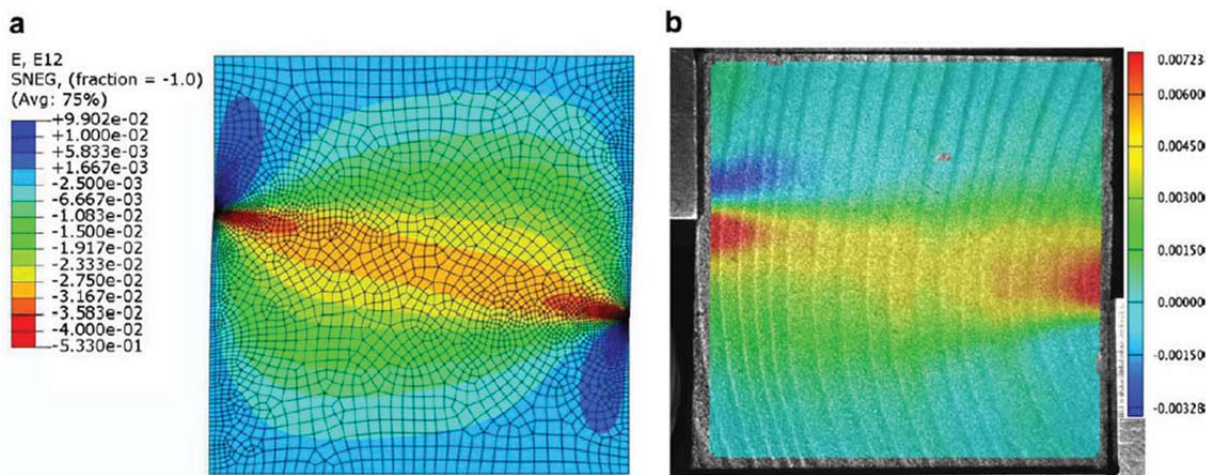


Abb. 1-50: Vergleich der Ergebnisse aus FE-Studie (a) und DSP-Messung (b) in der  $RT$ -Ebene [43]

Die sehr einfache Herstellung der Prüfkörper sowie die Möglichkeiten hinsichtlich der Variation einzelner Prüfkörpereigenschaften wie beispielsweise der Jahrringlage macht diese Methode sehr attraktiv, ebenso der relativ große Bereich konstanter Schubverzerrung in Prüfkörpermitte.

In [43] wird festgestellt, dass sich der SCA nicht zur Ermittlung von Festigkeitskennwerten eignet, da die gesamte Probe durch die äußeren, nicht zentral im Schubfeld befindlichen, Bereiche stabilisiert werden.

Die Gebundenheit an würfelförmige Geometrien und der notwendige Aufwand, Apparaturen für Würfel unterschiedlicher Größe herzustellen, bedeuten darüber hinaus eine starke Einschränkung,  $b/d$ -Variationen sind etwa nicht möglich. Die Messung der Verformungen bzw. Verzerrungen ist manuell nur schwer möglich, die Möglichkeit zur Durchführung von Bildmessungen mittels DSP wird daher vorausgesetzt.

#### 1.4.1.4 losipescu-Scherversuch

1967 von N. losipescu [44] entwickelt hat sich diese Methode bereits zur Bestimmung von Schubeigenschaften von Metallen aber auch von Verbundwerkstoffen als geeignet erwiesen. Dabei handelt es sich um eine Vier-Punkt-Biegeanordnung, bei der in einem durch eine Kerbung planmäßig geschwächten Bereich eine reine Schubbelastung auftritt und ein Schubversagen herbeigeführt werden soll (Abb. 1-51).

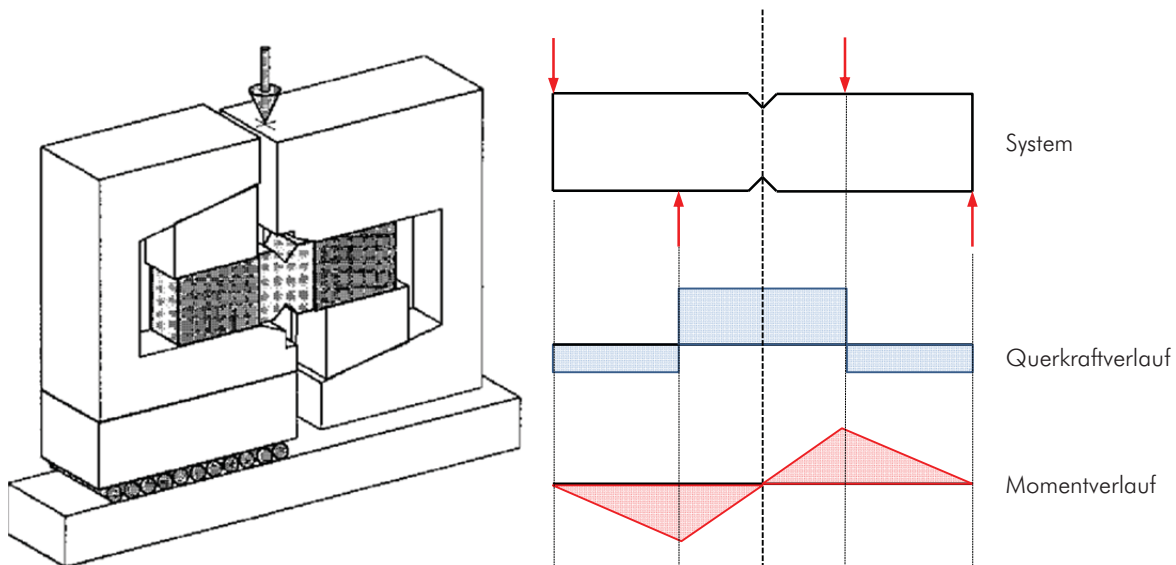


Abb. 1-51: Apparatur zur Durchführung des losipescu-Scherversuch [45] und qualitativer Schnittkraftverlauf

Dumail et al. [45] untersuchen mit Fichtenholz in lufttrockenem und wassergesättigtem Zustand die Eignung dieser Konfiguration zur Ermittlung von Rollschubeigenschaften. Die Scherfläche, in der das Versagen eintreten soll, besitzt einen Querschnitt von 11,5 / 10,7 mm, hergestellt durch eine Einkerbung, die mit einem Radius von 0,25 mm ausgerundet wird. Um lokale Pressung zu vermeiden, werden seitlich Bleche aus Aluminium mit einer Dicke von 1 mm aufgeklebt (Abb. 1-52).

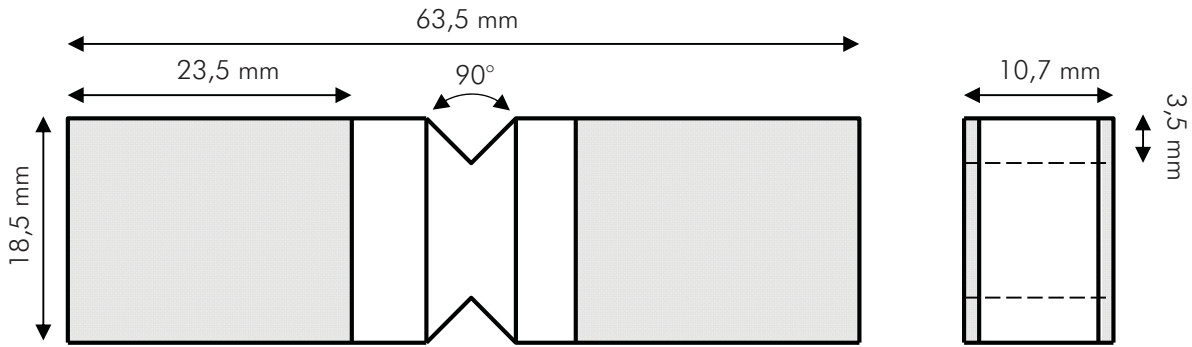


Abb. 1-52: Abmessungen der in [45] untersuchten Prüfkörper längs (links) und im Querschnitt (rechts)

Die Ergebnisse stimmen mit jenen der Literatur gut überein, allerdings trat bei 13 von 17 wassergesättigten Prüfkörpern das Versagen außerhalb des vorgesehenen Bereiches auf, bei den luftgetrockneten Prüfkörpern war dies bei sieben von zehn der Fall (Abb. 1-53).

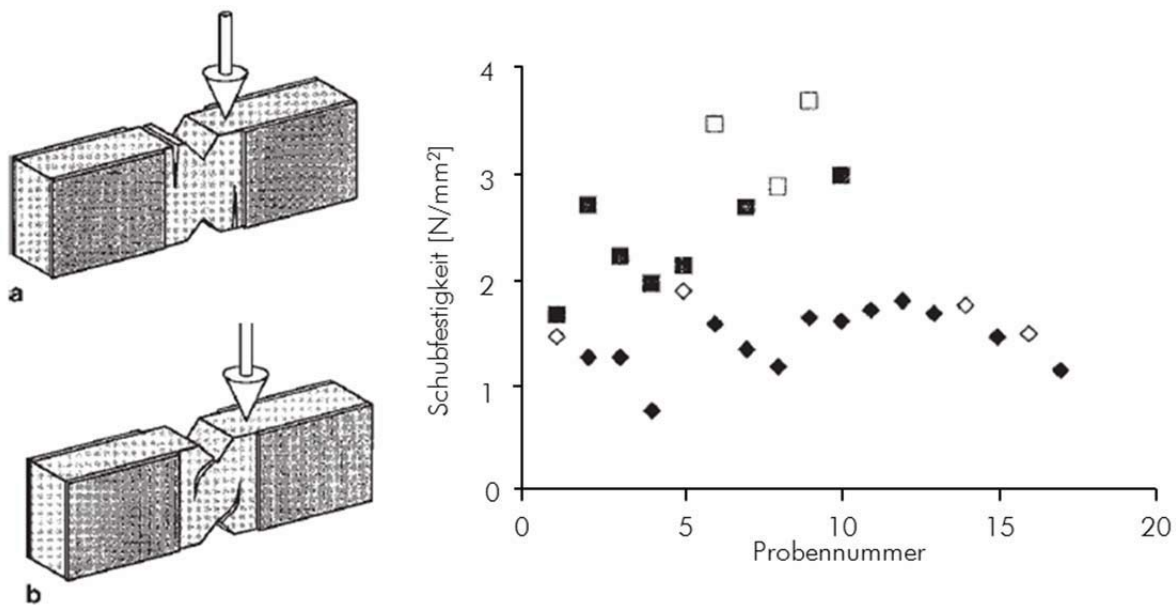


Abb. 1-53: Illustration ungewünschter Versagensformen (a, b) und Anteil dieser (schwarz gefüllt) bei luftgetrockneten (Quadrate) und wassergesättigten (Rauten) Prüfkörpern

Bedingt durch die 90°-Kerbung mittig im Prüfkörper stellt sich deren Herstellung relativ aufwändig dar. Auch die kleine Scherfläche eignet sich für die durchzuführende Studie nur bedingt. Insbesondere aber stellt das Versagen der Mehrheit der Prüfkörper außerhalb der gewünschten Zone ein Problem dar, ändert sich doch bei Bezugnahme auf unterschiedliche Querschnittswerte sowohl Rollschubfestigkeit und -modul als auch der örtliche Spannungszustand.

### 1.4.1.5 Arcan-Shear-Test

Xavier et al. [46] verwenden eine Arcan-Shear-Test Konfiguration, um die Schubeigenschaften der Holzart See-Kiefer (*Pinus pinaster* ait.) in den natürlichen Symmetrie-Ebenen  $LR$ ,  $LT$  und  $RT$  zu untersuchen. Dabei werden Einkerbungen zur Definition der Sollbruchstelle mittig an der Probe angefertigt. Zur Kräfteinleitung werden anschließend beidseitig Stahllaschen, beispielsweise durch Verklebung, angebracht. (Abb. 1-54).

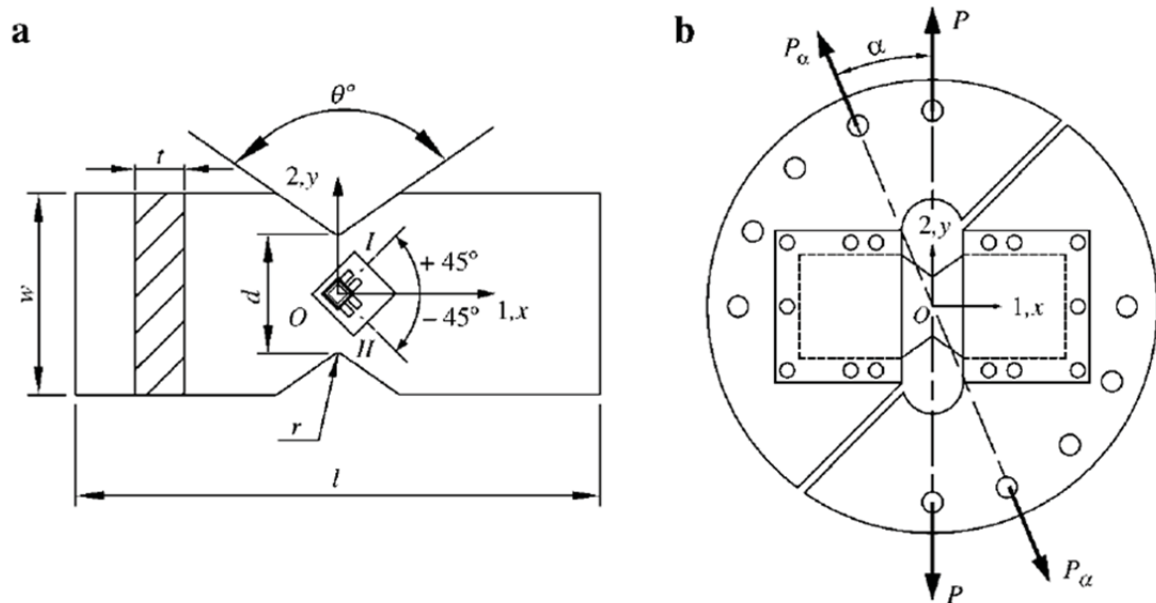


Abb. 1-54: Probekörper (a) und Prüfkongfiguration (b) zur Durchführung des Arcan-Shear-Tests [46]

Durch den Verlauf der Kraftachse in der Sollbruchebeben liegt eine reine Schubbeanspruchung vor. Der ungleichmäßigen Schubspannungs- und -verzerrungsverteilung über den Querschnitt wird durch eine begleitende FE-Analyse und der Berechnung von Korrekturbeiwerten Rechnung getragen. Zur Ermittlung des Schubmoduls in  $RT$ -Ebene ist nach [46] keine Korrektur notwendig.

Da das Versagen der Prüfkörper in sämtlichen Ebenen an Stellen lokaler Spannungsspitzen eintrat, konnte die Rollschubfestigkeit nicht direkt aus den Arcan-Shear-Tests ermittelt werden. Eine Abschätzung der Werte für alle Ebenen ist durch den Vergleich der Messergebnisse mit jenen aus Iosipescu-Versuchen (siehe auch Abschnitt 1.4.1.4) bzw. Off-Axis-Tests laut [46] allerdings möglich.

Den Vorteilen der relativ einfachen Herstellung der Prüfkörper, der zuverlässigen Messung der Verzerrungen mittels Dehnmessstreifen sowie einer reinen, wenn auch nicht spannungsspitzenfreien, Schubbelastung stehen auch negative Aspekte gegenüber: Die Geometrie der Prüfkörper lässt sich nur bei gleichzeitiger Anpassung der Laschengeometrie verändern, die Probe ist außerdem in der Größe beschränkt und der Versuch nur auf Clear-Wood anwendbar.

### 1.4.1.6 Schwingungsmessung

Schwingungsmessungen stellen eine Möglichkeit dar, auf einfachem, kostengünstigem und nicht-zerstörendem Wege Kenntnis über einige Materialparameter zu erlangen. Bedingung dafür ist ein durch begleitende Versuche und / oder numerische Simulation ausreichend verifiziertes Modell, in das sämtliche relevante bekannte Kennwerte des Prüfkörpers Eingang finden.

Nach einem von Görlacher [31] vorgestellten Verfahren lässt sich der Rollschubmodul über die gemessene Eigenfrequenz von (geeigneten) Prüfkörpern ermitteln. Mit Gl. (1-9) lässt sich bei bekannter Prüfkörpergeometrie und -dichte, dem Elastizitätsmodul und der gemessenen Eigenfrequenz der Rollschubmodul berechnen. Voraussetzung dafür ist ein geringes  $l/h$ -Verhältnis des Prüfkörpers bzw. ein großes  $E/G$ -Verhältnis.

$$E = \frac{4\pi^2 l^4 f_0^2 \rho}{500,6 \cdot i^2} \cdot \left[ 1 + \frac{i^2}{l^2} \left( 49,48 + 12,3 \cdot s \cdot \frac{E}{G} \right) - \frac{4\pi^2 s \cdot i^2 f_0^2 \rho}{G} \right] \quad \text{Gl. (1-9)}$$

- $l$  ... Probenlänge
- $E$  ... Elastizitätsmodul
- $G$  ... Schubmodul
- $f_0$  ... Eigenfrequenz der Biegeschwingung
- $\rho$  ... Rohdichte
- $s$  ... Formfaktor (1,06 für Holz)
- $i$  ... Trägheitsradius

In seinen Versuchsreihen wählt Görlacher Abmessungen von 100 / 30 mm und eine Dicke in Faserrichtung von 15 mm; es werden Winkel von 0°, 30°, 45°, 60° und 90° untersucht. In einem ersten Schritt wird eine Biegeschwingung mit Auslenkung in Faserrichtung des Holzes aufgebracht und der Schubmodul mit 500 MPa angenommen. Mit der sich ergebenden Eigenfrequenz kann damit der Elastizitätsmodul ermittelt werden. Nun wird der Prüfkörper mit Auslenkung normal zur Faserrichtung in Biegeschwingung versetzt, der aus der ersten Messung erhaltene Elastizitätsmodul herangezogen und so der Rollschubmodul berechnet. Mit einer parallel dazu durchgeführten FE-Analyse wird die Anwendbarkeit der Schwingungsgleichung für die vorhandene Prüfkörpergeometrie validiert.

Durch Anwendung dieser Methode kann rasch und einfach der Rollschubmodul ermittelt werden, allerdings stellt dieser Wert dann das Ergebnis einer Modellberechnung dar, die von zahlreichen Parametern, die vorab definiert werden müssen, abhängt. Die Auswirkung von lokalen Unregelmäßigkeiten wie Ästen oder Harzgallen könnte sich nur verspiegeln in der Rohdichte widerspiegeln, weshalb dieses Verfahren auf Clear Wood beschränkt ist. Ermittelt werden außerdem lediglich Steifigkeiten und naturgemäß keine Festigkeiten.



## 1.4.2 Systemversuche

### 1.4.2.1 Zugscherversuch

Blaß und Görlacher [47] bedienen sich bei der Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens der Querhölzer von schubweich verbundenen Biegeträgern einer von Gahl entwickelten, allerdings unveröffentlichten Prüfanordnung, bei der jeweils vier Hölzer gleichzeitig einer Schubbelastung ausgesetzt werden (Abb. 1-55).

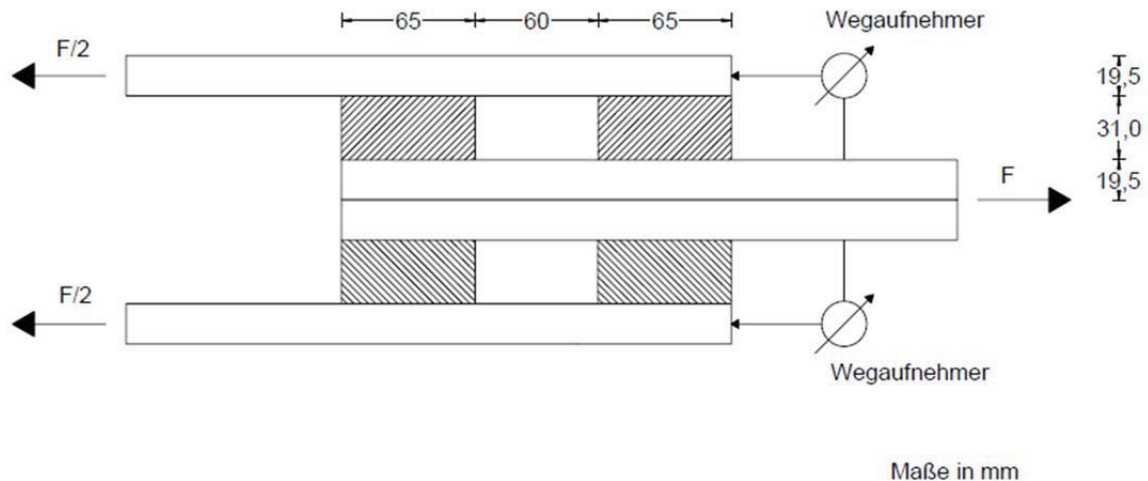


Abb. 1-55: Zugscher-Prüfkonfiguration aus [47]

Aus dem Last-Verschiebungsdiagramm der Zugscher-Prüfungen (Abb. 1-56) kann der Verschiebungsmodul  $C$  abgelesen werden und mittels Gl. (1-10) auf den Rollschubmodul  $G_R$  umgerechnet werden. Der mittlere Modul von lediglich drei Prüfkörpern lag in dieser Studie bei rd.  $51 \text{ N/mm}^2$ .

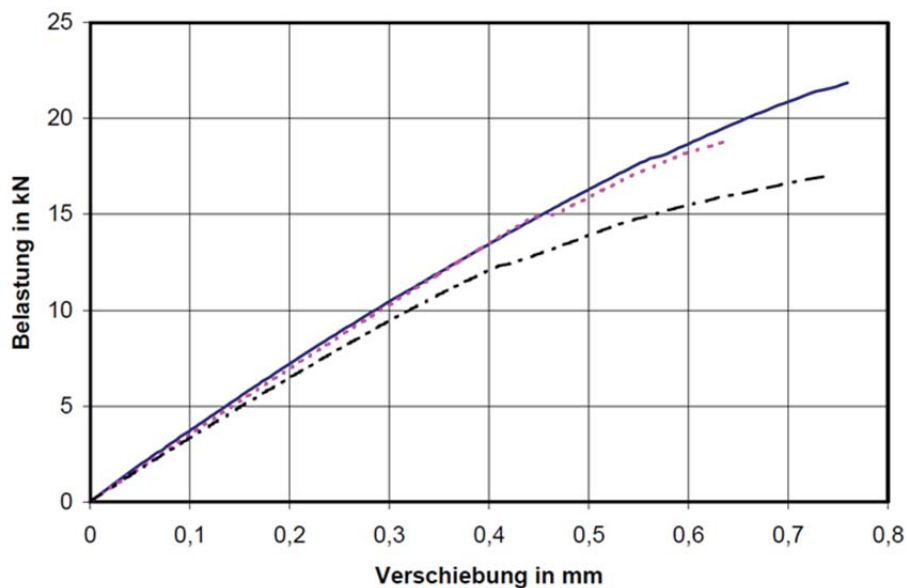


Abb. 1-56: Last-Verschiebungs-Diagramm der Zugscher-Prüfungen [47]

$$G_R = \frac{C \cdot d}{l \cdot b} = \frac{32.000}{4} \cdot \frac{31}{65 \cdot 75} \approx 51 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Gl. (1-10)}$$

- $G_R$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]
- $C$  ... Verschiebungsmodul [N/mm]
- $d$  ... Brettstärke [mm]
- $l$  ... Brettlänge in Krafrichtung [mm]
- $b$  ... Brettbreite [mm]

In Anlehnung an diesen Zugscherversuch durchgeführte Prüfungen können immer nur mit einer geraden Anzahl an Probekörpern durchgeführt werden, es wird also stets ein Systemkennwert ermittelt, was die Variation der Einflussparameter erschwert und deren Effekte teilweise durch Mittelung ausgleicht. Auch kann nicht von einer reinen Schubbeanspruchung gesprochen werden. Während die Herstellung der Prüfkörper aufgrund der zweiseitigen Verklebung von zumindest vier Hölzern und der Lasteintrag auf den Prüfkörper als mit erhöhtem Aufwand verbunden bezeichnet werden kann, ist die Messung der Verformungen einfach möglich.

#### 1.4.2.2 Schubversuch nach Mestek

Die bereits unter 1.4.1.2 erläuterte Versuchsanordnung nach Mestek [37] in Anlehnung an die ÖNORM EN 408 [42] Punkt 18 kann durch eine veränderte Laschengeometrie auch einfach zu einem Systemversuch erweitert werden.

Mestek [37] untersucht das Interaktionsverhalten von Rollschub und Querdruck an 7-schichtigen Brettsperrholzelementen mit Schichtstärken von 17 mm (Typ „119“) bzw. 27 mm (Typ „189“, Typ „189S“ ohne Entlastungsnuten), teilweise mit Entlastungsnuten. Auf die drei unterschiedlichen Serien werden Querdruckspannungen von 0,0 N/mm<sup>2</sup> ( $i = 0$ ), 0,3 N/mm<sup>2</sup> ( $i = 1$ ) und 0,8 N/mm<sup>2</sup> ( $i = 2$ ) zusätzlich zur rollschuberzeugenden Scherbelastung aufgebracht.

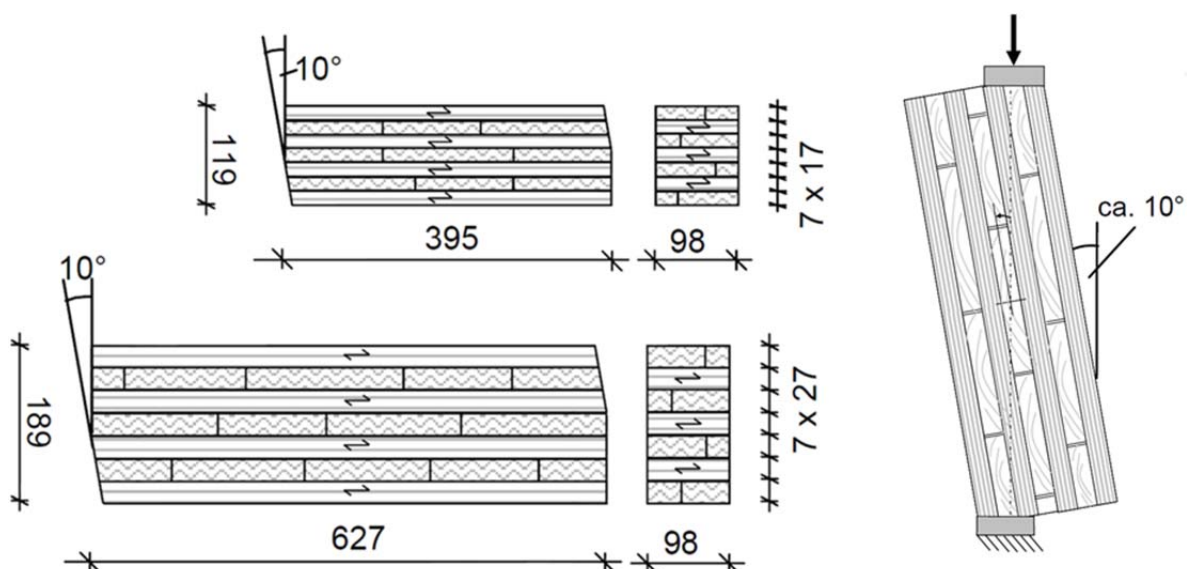


Abb. 1-57: Abmessungen der Prüfkörpertypen „119“ und „189“ [37] (links) und Prüfanordnung (rechts)

Da die Abstände zwischen den Entlastungsnuten der Querlagen beider Prüfkörpergrößen gleich groß sind, ergibt sich wegen der größeren Schichtdicke für den Querschnittstypen 189 ein geringeres Verhältnis aus Fugenabstand und Schichtdicke. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Jakobs [33] und Scholz [36] wirkt sich dieser Umstand, der als reduziertes  $b/d$ -Verhältnis gesehen werden kann, negativ auf die Rollschubfestigkeiten aus. Die Festigkeiten der Prüfkörper ohne Entlastungsnuten liegen ebenfalls über jenen der vergleichbaren Querschnitte, die solche enthalten (Abb. 1-58).

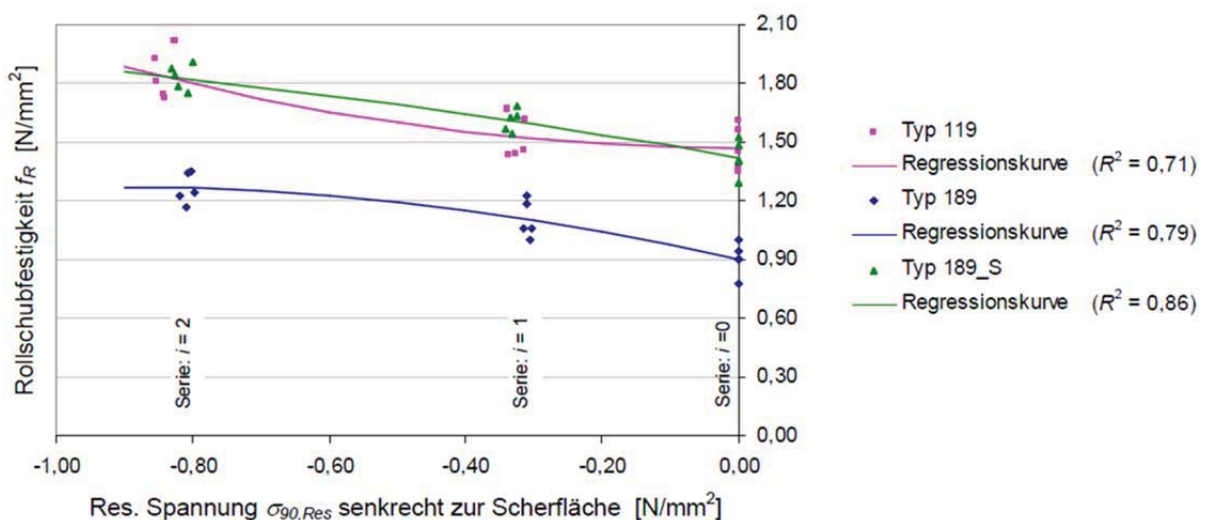


Abb. 1-58: Rollschubfestigkeit der Typen 119, 189 und 189S (ohne Entlastungsnuten) bei unterschiedlichem externem Querdruck ( $i = 0, 1$  oder  $2$ )

Mestek [37] weist auf die, im Vergleich zu den durchgeführten Kleinversuchen, wesentlich geringere Streuung der Versuchsergebnisse hin und begründet diese mit den größeren Elementabmessungen und einem damit einhergehenden Vergütungseffekt. Die Möglichkeit der Spannungumlagerung, es liegt ein paralleles System vor, innerhalb der Querlage führt dazu, dass nicht die Rollschubfestigkeit des „...vermeintlich schwächsten Brettes der Lage...“ maßgeblich ist.

Dem, wenn auch geringen, Einfluss der konfigurationsbedingten Querbelastung als negativer Kritikpunkt dieser Versuchsanordnung stehen eine hohe Variabilität in der letztendlichen Prüfkörpergeometrie sowie eine einfache Herstellung der Prüfkörper und Messung der Verformungen gegenüber.

#### 1.4.2.3 Vier-Punkt-Biegeversuch nach ÖNORM EN 408

In ÖNORM EN 408 [42] wird unter Punkt 9 ein Verfahren zur Ermittlung des lokalen Biegeelastizitätsmoduls beschrieben (Abb. 1-59).

Durch die Reduktion des Abstandes von Auflager und Lasteinleitung wird das auftretende Moment reduziert. Bei gleicher Querkraft kann so ein Rollschubversagen der Querlagen im Bereich konstanter Querkraft zwischen Auflager und Lasteinleitungspunkt herbeigeführt werden. Da die maximale Schubspannung (bei rechteckigen Querschnitten) in halber Höhe auftritt, sollten dafür Brettsperrholzelemente verwendet werden, deren mittlere Schicht querorientiert ist. Dies ist beispielsweise bei 3- oder 7-schichtigen Platten der Fall, nicht jedoch bei 5-schichtigen.

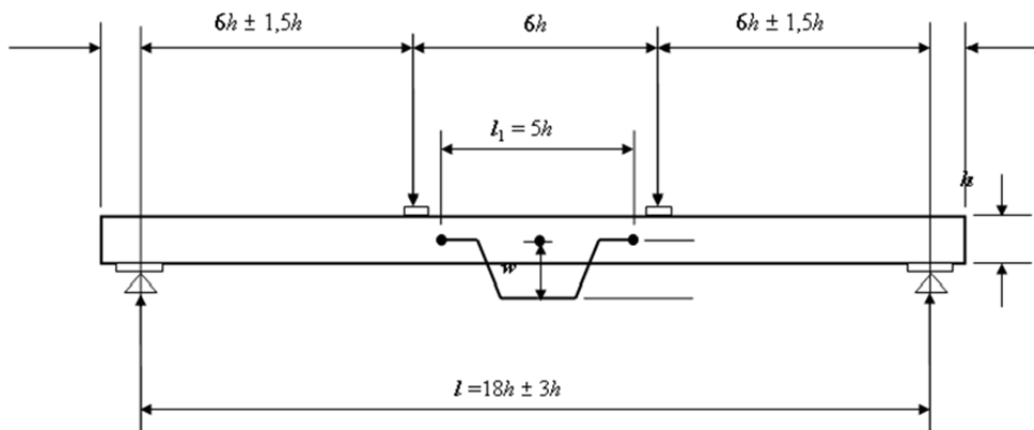


Abb. 1-59: Abmessungen des Vier-Punkt-Biegeversuchs [42]

Wegen des vergleichsweise hohen Material- und Arbeitseinsatzes zur Herstellung der Prüfkörper und der Notwendigkeit einer begleitenden FE-Analyse, zur Sicherstellung der der Auswertung zugrundeliegenden Schubspannungsverteilung, scheint der Aufwand im Vergleich zur Konfiguration nach Mestek [37] sehr hoch. Allerdings kann durch die Messung der lokalen Verformungen auch auf die Biegeeigenschaften geschlossen werden. Durch Bildmessung kann über die vorhandenen Schubspannungen sowie das Verzerrungsbild auf die Rollschubmoduln einzelner Bretter geschlossen und somit Aussagen über den Einfluss der in Abschnitt 1.3 diskutierten Parameter getroffen werden.

#### 1.4.2.4 Drei-Punkt-Biegeversuch nach Gehri

Gehri [48] schlägt vor, den Rollschubmodul durch Messung eines Schubfeldes an 5-schichtigen Trägern während eines 3-Punkt-Biegeversuchs zu ermitteln. Die notwendige Höhe des Messkreuzes wird durch drei querliegende Innenschichten möglich, es liegt also kein klassischer Brettsperrholzaufbau vor. Als Abmessungen gibt Gehri eine Spannweite von 1000 mm an, der Querschnitt besitzt eine Breite von 190 mm und eine Höhe von  $(5 \times 40 =) 200$  mm.

Die Messung des Schubfeldes ist in der ÖNORM EN 408 [42] geregelt und stellt eine einfache und zuverlässige Methode dar. Der brett- und schichtüberschreitende Messbereich führt allerdings zu einem gemittelten Ergebnis wodurch Informationen über den Einfluss von z.B. Jahrringlage, Brettgeometrie oder Dichte verloren gehen.

#### 1.4.3 Festlegung der Prüfkonfiguration und FE-Analyse

Um einzelne Parameter gezielt variieren zu können und so deren Einfluss auf die Rollschubeigenschaften isoliert zu betrachten soll das Gros der Versuche mit Einzelprüfkörpern durchgeführt werden. Wegen der zahlreichen Vorteile und akzeptablen Nachteile wird dazu die in Abschnitt 1.4.1.2 erläuterte Methode der Schubversuche nach ÖNORM EN 408 [42] gewählt. Als Laschenmaterial soll aber aus Gründen der einfacheren Prüfkörperfertigung vorwiegend Buchenholz Einsatz finden; dessen Eignung wurde durch Untersuchungen von Mestek [37] bestätigt. Die Breite der Prüfkörper wird mit 120 mm in Richtung der Schubbelastung gewählt. Durch die Länge normal dazu von 100 mm ergibt sich die belastete Scherfläche von  $12.000 \text{ mm}^2$ . Die Brettstärke beträgt 30 mm

wodurch sich ein  $b/d$ -Verhältnis von Vier ergibt. Der in der ÖNORM EN 408 [42] für Schubprüfungen längs zur Faser vorgegebene Winkel von  $14^\circ$  soll auch in dieser Studie eingehalten werden. Die Geometrie der Laschen zur Lasteinbringung ergibt sich durch die Forderung, dass die Kraftachse vertikal durch den geometrischen Mittelpunkt des Prüfkörpers verlaufen soll.

In Abb. 1-60 ist der Aufbau der Standardkonfiguration ersichtlich. Die zur Berechnung des Rollschubmoduls notwendige Verzerrung wird durch induktive Messung der Relativverschiebung der beiden Laschen ermittelt.

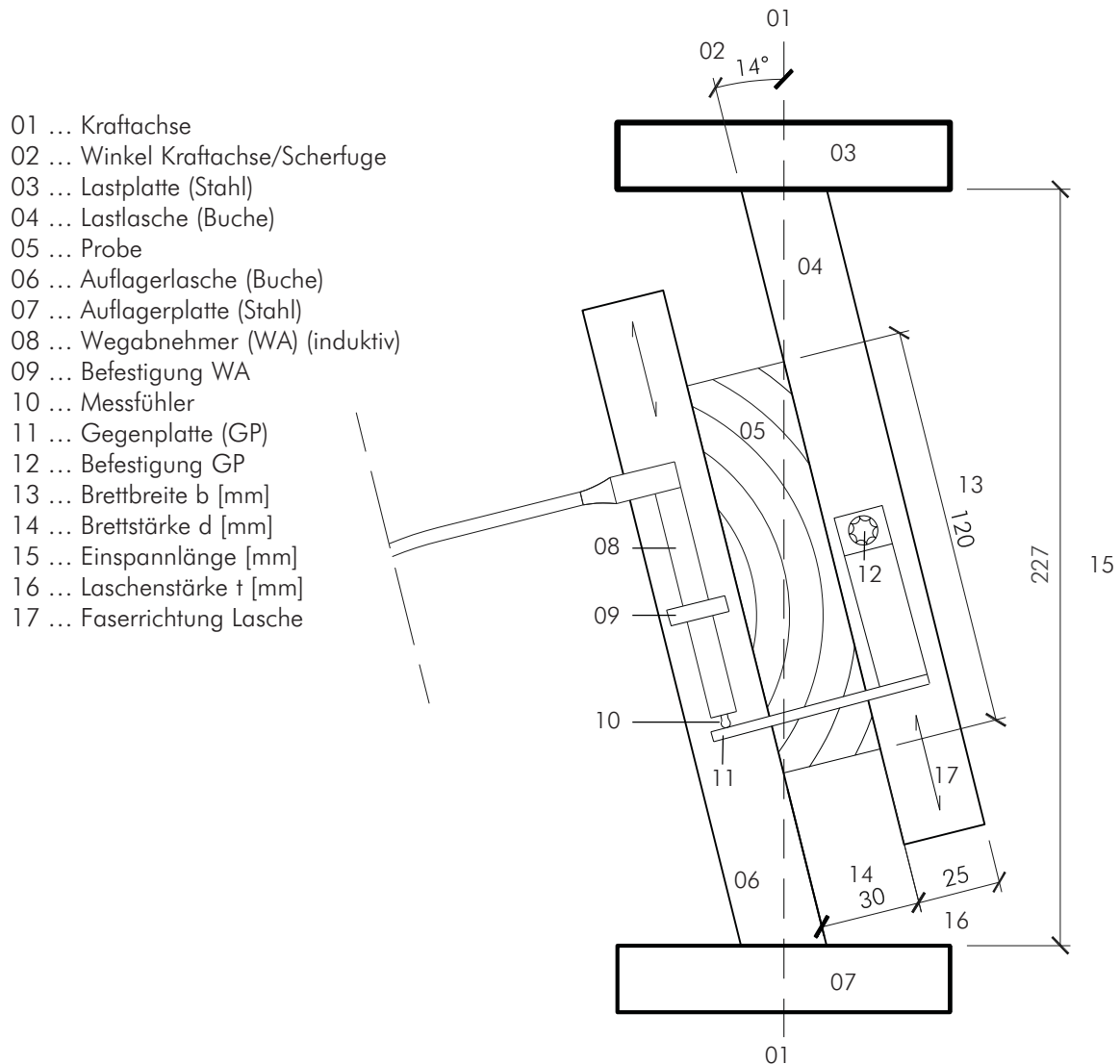


Abb. 1-60: Standardprüfkörper für die durchzuführende Studie, Länge = 100 mm, Maße in mm

Ergänzend zu den Einzelprüfkörpern sollen auch Brettsysteme geprüft werden, ebenfalls mit Versuchen in Anlehnung an [42] bzw. [37]. Nähere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 2.1.2.

Durch den planmäßigen Winkel zwischen Kraftachse und Schubfuge treten neben den gewünschten (Roll-)Schubspannungen, wie bereits in Abschnitt 1.4.1.2 erläutert, auch unerwünschte Spannungen normal dazu auf. Wegen der abweichenden Geometrie im Vergleich zu der von Mestek

[37] vorgeschlagenen Konfiguration kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der von ihm durchgeführten Analyse für diese Studie übernommen werden können.

Um Kenntnis über die Spannungsverteilung in der Probe zu erhalten wird dankenswerterweise von Dipl.-Ing. Gregor Silly, Mitarbeiter der *holz.bau forschungs gmbh*, eine Finite Element Analyse der Standardkonfiguration mit dem Programm ABAQUS [49] durchgeführt.

Es werden lineare 2D-Scheibenelemente des Typs CPS 4 verwendet, die Netzgröße beträgt  $1 \times 1 \text{ mm}$ . Für den Probekörper, bei dem es sich in der Referenzserie um Fichtenholz handeln soll, werden die Materialeigenschaften mit  $E_{90} = 370 \text{ N/mm}^2$  und  $G_{9090} = 69 \text{ N/mm}^2$  definiert. Als Laschenmaterialeigenschaften, hier soll Buchenholz Anwendung finden, werden  $E_0 = 17.000 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{90} = 700 \text{ N/mm}^2$  und  $G_{090} = 1.000 \text{ N/mm}^2$  festgelegt.

Zur Berechnung wird eine vertikale Kraft in der Höhe von 20 kN aufgebracht. Die Spannungen, die sich dabei theoretisch nach den in Abschnitt 2.3.4 vorgestellten Formeln einstellen, liegen bei  $\tau_R = -1,62 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $\sigma_{90} = -0,40 \text{ N/mm}^2$ .

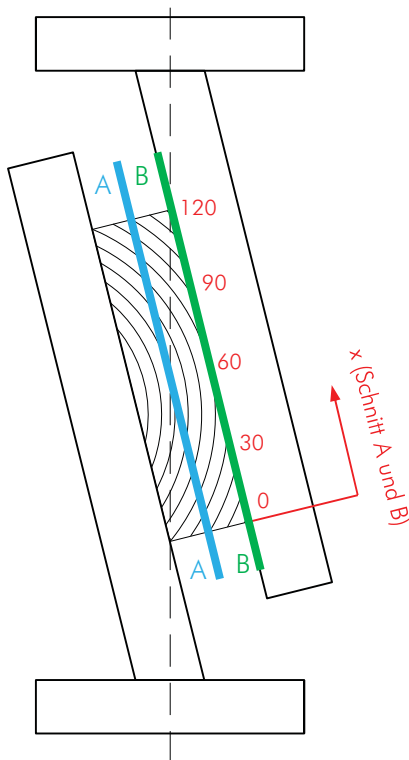


Abb. 1-61: Schnittführung zur Berechnung der Spannungen

Zur genaueren Untersuchung der Spannungsverläufe über die Brettbreite werden zusätzlich Schnitte durch die Probe geführt und die sich entlang dieser ergebenden Spannungen ermittelt. Neben einer Analyse der Spannungen auf Höhe der halben Brettstärke (Schnitt A – A), wie sie ebenfalls in [37] durchgeführt wurde, werden die Spannungen in der Probe auch nächst der Lastlasche (Schnitt B – B) numerisch untersucht (Abb. 1-61). Für jeden Schnitt werden dabei die (Roll-) Schubspannungen parallel zur Scherfuge ( $\tau_R$ ) wie auch die Spannungen normal dazu ( $\sigma_{90}$ ) ermittelt. Wegen der Symmetrie des Systems, sind die Ergebnisse für den Schnitt entlang der Lastlasche auch

für den Spannungsverlauf entlang der Auflagerlasche anwendbar, allerdings mit umgekehrter Richtung von  $x$  (Auflagerlasche oben = Lastlasche unten).

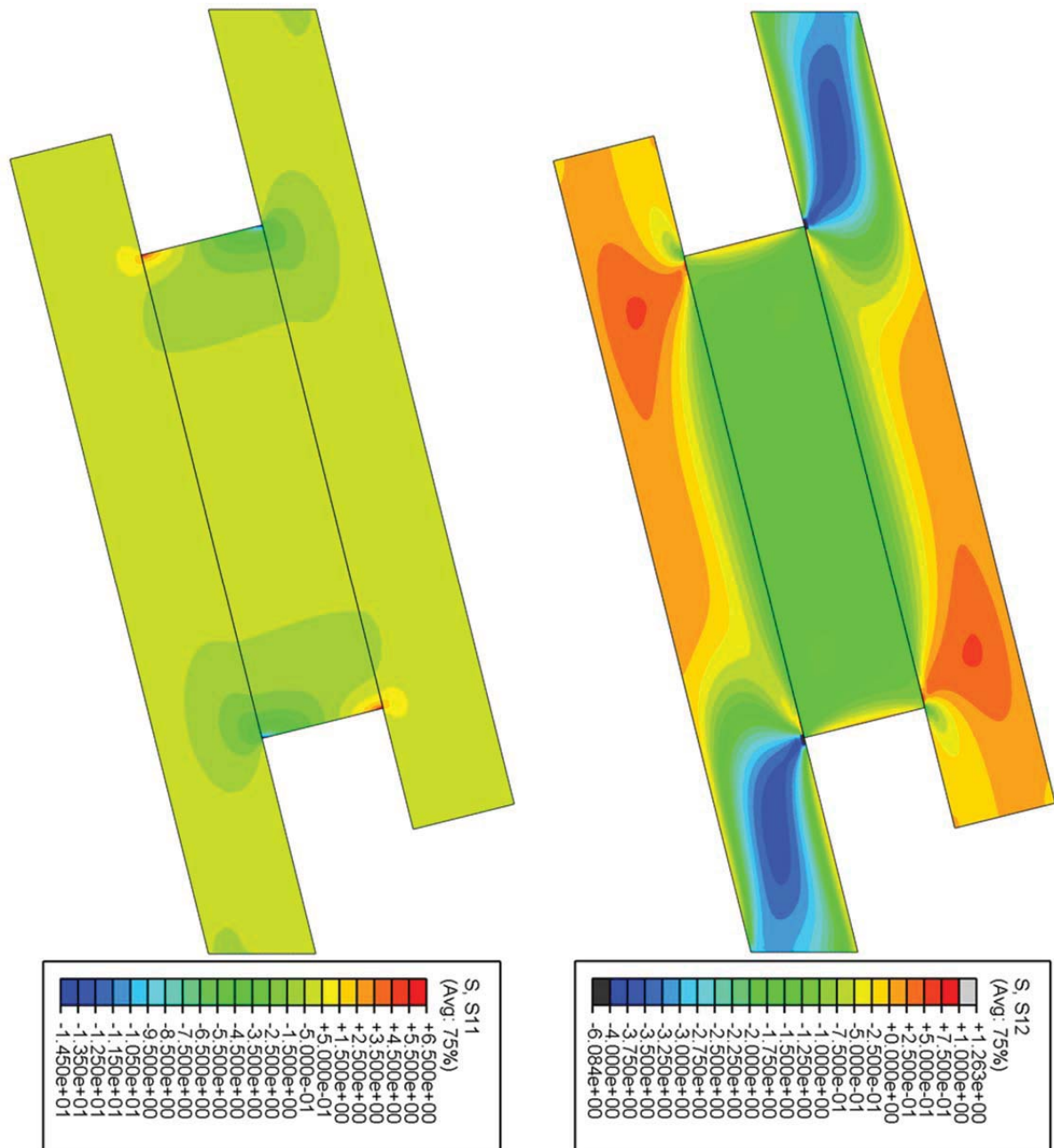


Abb. 1-62: Verteilung von Normal- ( $\sigma_{90}$ ; links) und Schubspannungen ( $\tau_{Ri}$ ; rechts)

Aus Abb. 1-62 (rechts) geht die über weite Bereiche der Probe gleichmäßige Verteilung der Schubspannung in der Höhe von rd. 1,5 bis 2,0 N/mm<sup>2</sup> hervor, am oberen und unteren Rand auf Höhe der halben Brettstärke müssen die Schubspannungen zu den Kanten hin abgebaut werden. Auch für die Normalspannungen (Abb. 1-62, links) ergeben sich überwiegend geringe und gleichförmig verteilte Werte über den Brettquerschnitt, allerdings werden lokale Spannungsspitzen in den Übergangsbereichen zwischen Lasche und Probekörper festgestellt (Abb. 1-63).

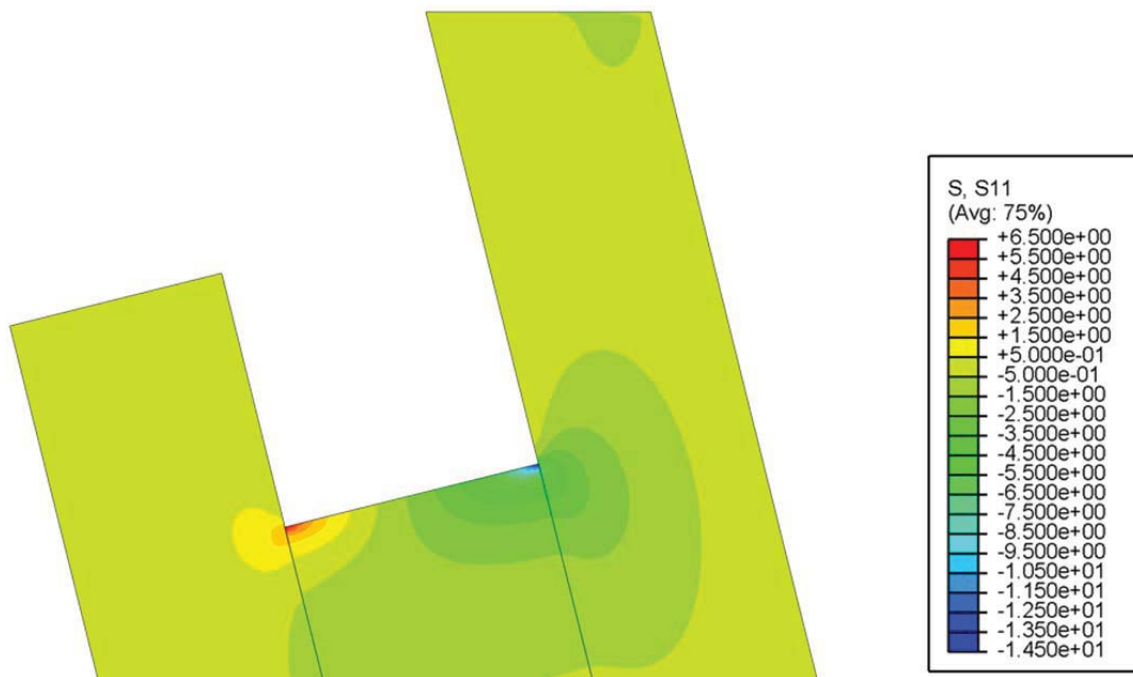


Abb. 1-63: Detail – lokale Normalspannungsspitzen  $\sigma_{90}$  in den Eckbereichen der Probe

Auf halber Breithöhe der Probe (Schnitt A – A) stellt sich eine nahezu konstante Schubspannung von rd.  $1,65 \text{ N/mm}^2$  ein, in den Randbereichen (nahe  $0 \text{ mm}$  = oberes Ende der Probe bzw. nahe  $120 \text{ mm}$  = unteres Ende der Probe) werden die Spannungen innerhalb von rd.  $10 \text{ mm}$  linear aufgebaut bzw. abgebaut (Abb. 1-64).

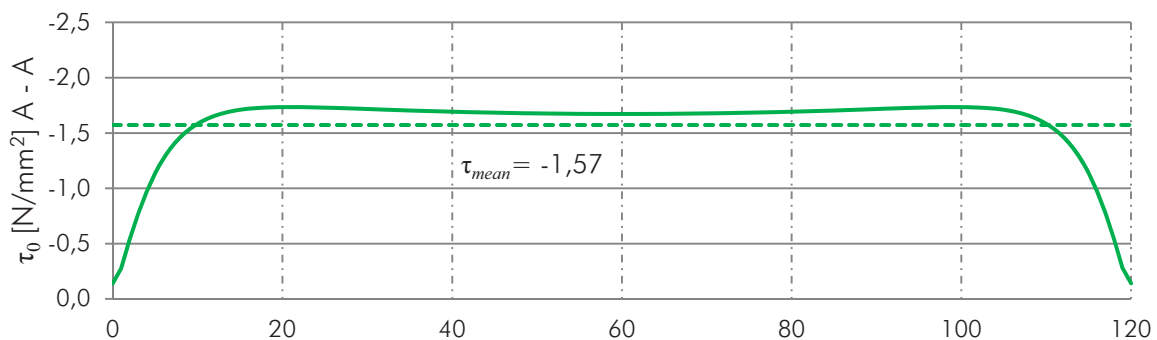


Abb. 1-64: Schubspannungsverlauf entlang Schnitt A – A

Über die gesamte Breite der Probe treten in Schnitt A – A Druckspannungen normal zur Scherfuge auf, in den Randbereichen erreichen diese bis zu  $1,7 \text{ N/mm}^2$ . Mit zunehmendem Abstand von den Rändern sinken sie gegen null (Abb. 1-65).



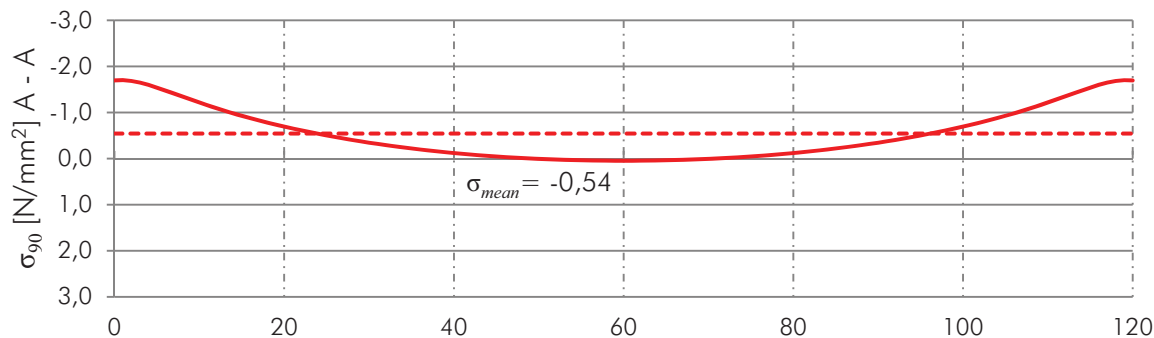


Abb. 1-65: Spannungsverlauf normal zur Scherfuge entlang Schnitt A – A

Die Schubspannungen in Klebefläche zwischen Probe und Lasche (Schnitt B – B) liegen über den Großteil der Brettbreite konstant auf einem Niveau von rd.  $1,6 \text{ N/mm}^2$ . Im Bereich des unbeanspruchten Laschenendes, am Übergang zur Probe ( $0 < x < 20 \text{ mm}$ ) bauen sich die Spannungen wie auch in Schnitt A – A kontinuierlich auf, im Bereich des beanspruchten Laschenendes, am Übergang zur Probe nehmen diese stark zu. Diese Spannungsspitze weist eine Höhe von rd.  $2,5 \text{ N/mm}^2$  bei einer Netzgröße von  $1 \times 1 \text{ mm}$ , auf (Abb. 1-66).

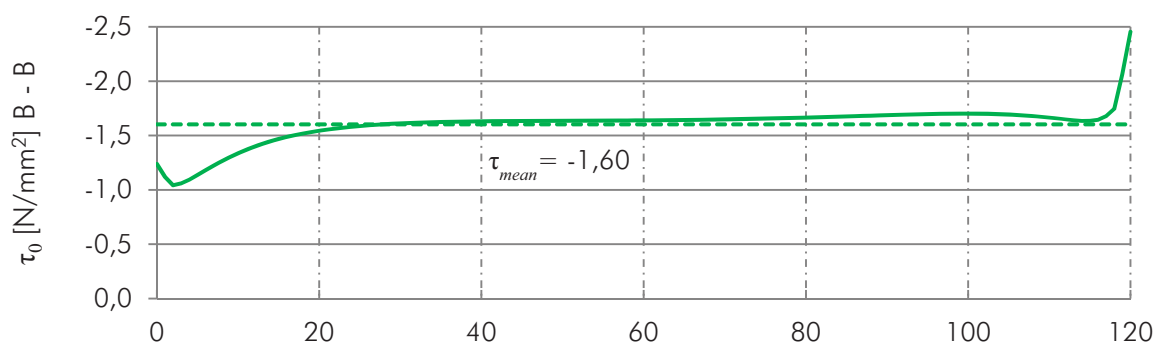


Abb. 1-66: Schubspannungsverlauf entlang Schnitt B – B

Die Verteilung der Querspannungen ist entlang von Schnitt B – B von jener entlang A – A deutlich verschieden: Im unteren Bereich treten lokal sehr hohe Zugspannungen auf, im Bereich von  $0 < x < 3 \text{ mm}$  liegen diese zwischen  $6$  und  $2 \text{ N/mm}^2$ . Wegen der Symmetrie des Systems werden sich diese Zugspannungen auch im oberen Bereich nahe der Auflagerlasche einstellen. Die Zugfestigkeit von Fichtenholz normal zur Faser liegt nach Kollmann [8] im Mittel bei  $2,7 \text{ N/mm}^2$  ( $= f_{t,90,12,mean}$ ), diese wird demnach – lokal sehr stark begrenzt – überschritten. Über  $85 \%$  der Probenbreite werden Spannungen normal zur Scherfuge zwischen  $-1$  und  $+1 \text{ N/mm}^2$  berechnet. Am oberen Ende der Probe ( $x > 100 \text{ mm}$ ) nehmen die Querdruckspannungen wiederum stark zu und steigen innerhalb der letzten  $5 \text{ mm}$  auf etwa  $6 \text{ N/mm}^2$  an (Abb. 1-67).

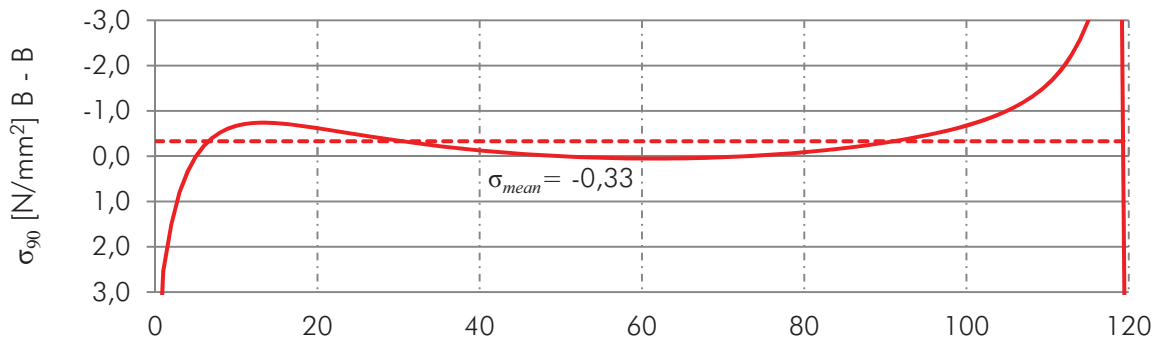


Abb. 1-67: Spannungsverlauf normal zur Scherfuge entlang Schnitt B – B

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der berechnete Verlauf der Schubspannung sowohl in Probenmitte als auch nahe den Laschen sehr gleichförmig und nahezu konstant ist. Auch das Niveau der Schubspannungen stimmt sehr gut mit jenem Wert überein, der mittels der später zur Anwendung kommenden Gleichung errechnet wurde ( $\tau_{R,est} / \tau_{R,FE,A} / \tau_{R,FE,B} = 1,62 / 1,57 / 1,60 \text{ N/mm}^2$ ).

Auch die Druck- bzw. Zugspannungen normal zur Schubfuge stellen sich über weite Bereiche der Probe gleichförmig ein. Die FE-Analyse zeigt allerdings, dass in lokal sehr stark begrenzten Bereichen im obersten bzw. untersten Teil der Probe nahe der Laschen erhöhte Querspannungen auftreten, die teilweise die Festigkeiten von Fichtenholz überschreiten.

## 2 MATERIAL UND METHODEN

Den Ausführungen in Abschnitt 1.3 zufolge zeichnen unterschiedlichste Einflussfaktoren für die mechanischen Eigenschaften von Holz verantwortlich. Um die qualitativen Auswirkungen der diskutierten Faktoren auf die Rollschubeigenschaften zu verifizieren und diese auch quantitativ erfassen zu können, ist ein in Art und Umfang geeignetes Prüfprogramm notwendig.

Im Folgenden wird das Ergebnis der durchgeführten Prüfplanung vorgestellt und dessen Umfang und Inhalt erläutert, begründet und auf eventuelle Probleme hingewiesen (Abschnitt 2.1). Die Herstellung der Prüfkörper wird anschließend, untergliedert in die einzelnen Arbeitsschritte, beschrieben (Abschnitt 2.2). Berechnungsschritte, die zur Ermittlung der Prüfdaten notwendig sind sowie die Vorgehensweise zur Umrechnung auf die Referenzholzfeuchte von  $u_{\text{ref}} = 12\%$  (Abschnitt 2.3) sind ebenso Teil dieses Kapitels wie Erläuterungen zum Ablauf der Prüfungen (Abschnitt 2.4).

### 2.1 Prüfplanung

---

Vor- und Nachteile unterschiedlicher Versuchskonfigurationen wurden in 1.4 ausführlich erläutert und die Entscheidung der Wahl einer stark an die in der ÖNROM EN 408 [42] geregelten Schubversuche anlehenden bzw. teilweise den Untersuchungen von Mestek [37] folgenden Methode sowie etwaige Abweichungen begründet.

Ziel der Prüfplanung ist es nun, ein Versuchsprogramm zu erarbeiten das es erlaubt, sämtliche interessierende Parameter isoliert betrachten zu können, Seriengrößen zu definieren, die statistische Aussagekraft besitzen und gleichzeitig den erforderlichen Material- und Arbeitsaufwand gering halten.

### 2.1.1 Prüfplan

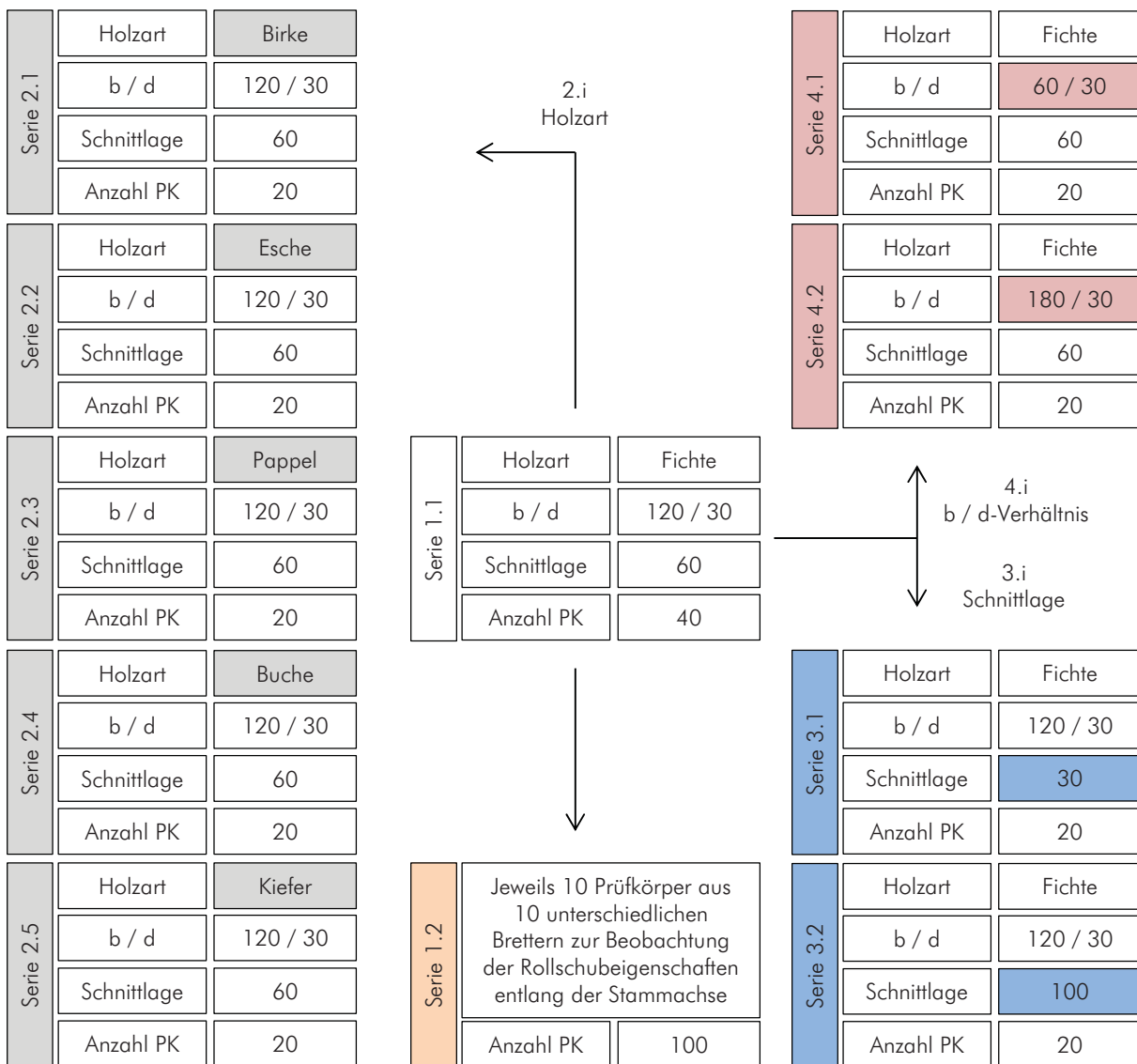


Abb. 2-1: Prüfprogramm Teil 1, geplante Einzelprüfungen

Die in Abb. 2-1 und Abb. 2-2 dargestellten Pläne sollen einen Überblick zu den durchzuführenden Prüfungen ermöglichen, weitere Erläuterungen zu diesen finden sich in Abschnitt 2.1.2.

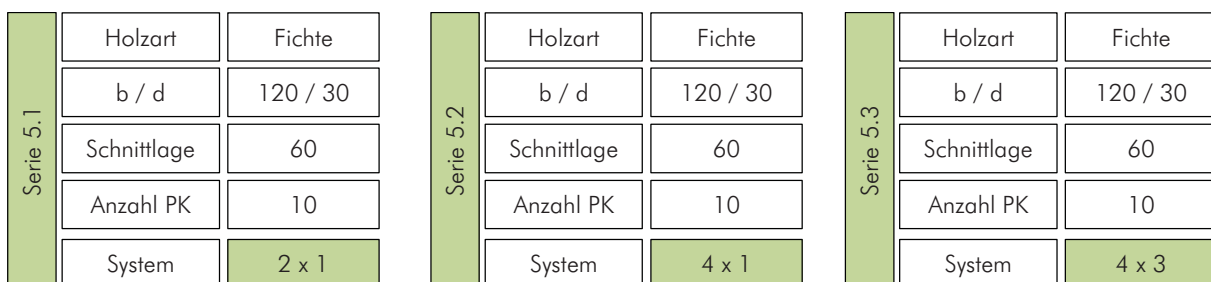


Abb. 2-2: Prüfprogramm Teil 2, geplante Systemprüfungen

### 2.1.2 Definition untersuchter Parameter, Serieneinteilung und Prüfumfang

Als Ergebnis einer ausführlichen Literaturrecherche, aus Gesprächen und eigenen Überlegungen ergibt sich der dargestellte Prüfplan, der in 14 Serien unterschiedlichen Umfangs die verschiedenen Parameter hinsichtlich deren Einfluss auf die Rollschubeigenschaften beleuchten soll.

Referenzserie 1.1 besitzt jene Eigenschaften, die in baupraktisch relevanten Produkten am häufigsten vorzufinden sind oder solche, die mittleren Werten entsprechen. Jede weitere Serie unterscheidet sich durch jeweils nur einen geänderten Parameter von dieser. Damit soll eine isolierte Betrachtung der Eigenschaften ermöglicht werden. Der Umfang der Referenzserie ist mit einem Soll von 40 Stück gegenüber den anderen Serien um den Faktor zwei größer, um eine statistisch solide Bezugsgröße zu erhalten.

Als veränderliche Parameter werden

- Holzart (Serien 2.i),
- Lage des Brettes im Stamm (Serien 3.i) und
- $b / d$ -Verhältnis des Brettes (Serien 4.i)

definiert.

Zusätzlich soll mithilfe zweier weiterer Serien untersucht werden, wie sich die Rollschubeigenschaften

- über die Länge eines Brettes (Serie 1.2) und
- in Mehrbrettssystemen (Serie 5.i)

verändern.

Neben diesen explizit definierten und variierten Eigenschaften können mit dem gewählten Prüfprogramm noch weitere Aspekte untersucht werden. Durch die Erfassung der Rohdichte jedes Prüfkörpers, der Aufnahme der Jahringdichte sowie sonstiger Auffälligkeiten wie Buchs, Harzgallen oder Ästen sollen auch Aussagen über die einzelnen Serien hinaus ermöglicht werden.

#### Variation der Holzart (Serie 2.i)

Als Referenzmaterial (Serie 1.1) wird aufgrund seiner großen baupraktischen Relevanz sowie der Tatsache, dass nahezu sämtliche Untersuchungen hinsichtlich Rollschubs mit dieser Holzart durchgeführt wurden, Fichte (*Picea abies*) gewählt. Zweite gewählte Weichholzart ist Kiefer (*Pinus Sylvestris* - Serie 2.5), neben den Zerstreutporen Birke (*Betula pendula* - Serie 2.1), wild gewachsener Zitterpappel (*Populus* spp. - Serie 2.3) aus der Umgebung von Preding (Steiermark) und Buche (*Fagus sylvatica* - Serie 2.4), wird auch der Ringporer Esche (*Fraxinus excelsior* - Serie 2.2) für die durchzuführende Studie als Material gewählt (Abb. 2-3 und Abb. 2-4). Der Umfang der Serien wird mit einem Soll von 20 Prüfkörpern definiert.

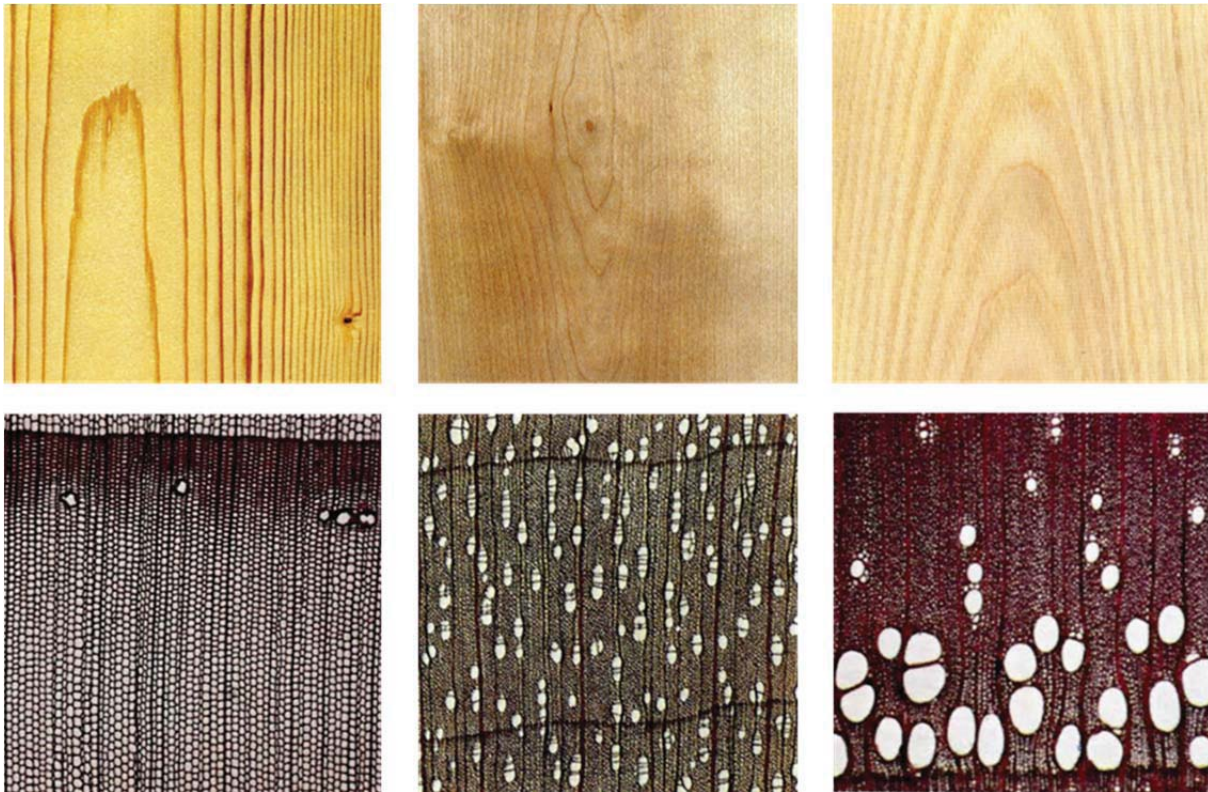


Abb. 2-3: Fichte, Birke und Esche (v.l.n.r.) im Tangentialschnitt (oben) und Mikroquerschnitt 1:15 [5]

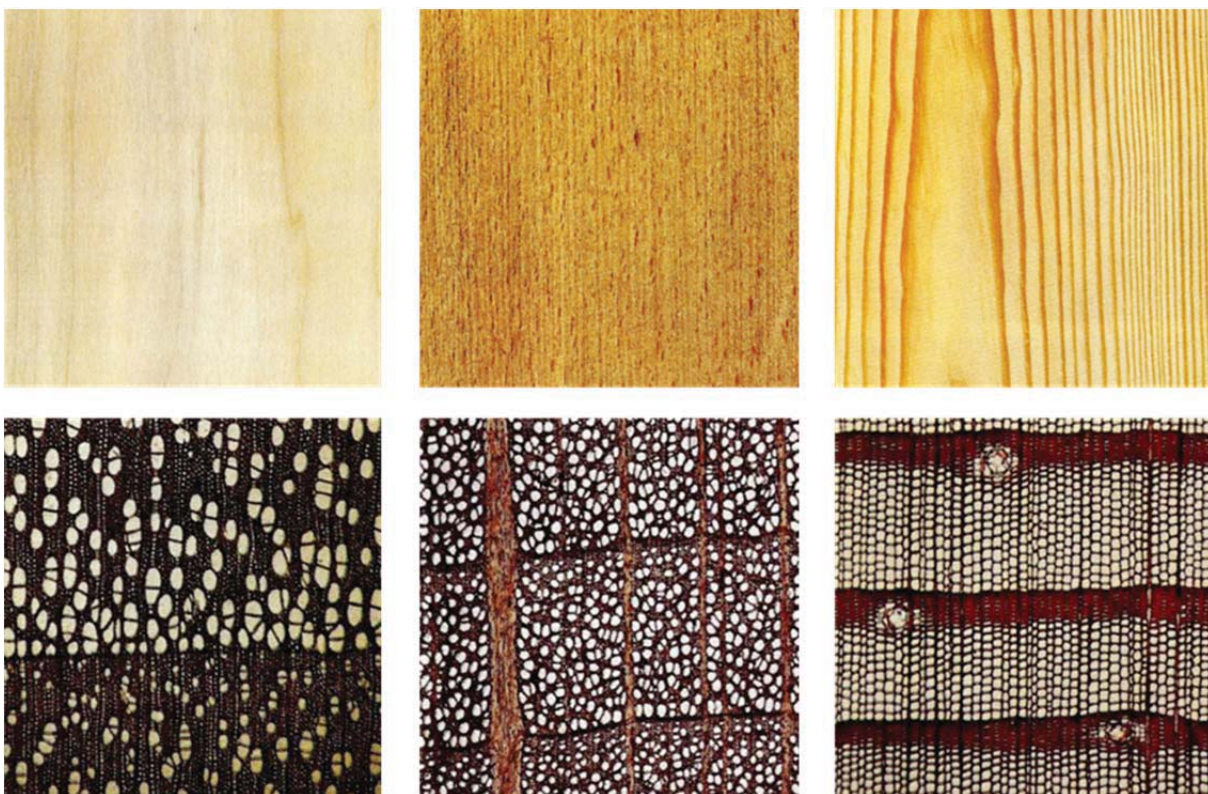


Abb. 2-4: Pappel, Buche und Kiefer (v.l.n.r.) im Tangentialschnitt (oben) und Mikroquerschnitt 1:15 [5]

Da wegen der geringen Stärke der vorhandenen sägerauen Buchen- und Eschenbretter keine plane Oberfläche durch Hobeln auf 30 mm sichergestellt werden kann, wird für diese beiden Holzarten (Serie 2.4 und 2.2) die Schichtstärke auf 27 mm reduziert.

### Variation der Lage des Brettes im Stamm (Serie 3.i)

Die Lage des Brettes im Stammquerschnitt lässt sich mit zwei Parametern definieren, nämlich dem radialen Abstand von der Stammachse und der Exzentrizität  $e$ . In dieser Prüfstudie sollen nur symmetrische Stammlagen ( $e = 0$  mm) planmäßig untersucht werden. Sehr wohl wird der Abstand von der Stammachse variiert.

Als Referenzlage (Serie 1.1) wird eine Stammlage mit 60 mm radialem Abstand des Brettmittelpunktes von der Stammachse gewählt, gleichbedeutend mit einem ausgewogenen Anteil an stehenden und liegenden Jahrringen im Querschnitt.

Darüber hinaus wird die Stammlage 20 mm (Serie 3.1) mit einem erhöhten Anteil an stehenden Jahrringen sowie die Stammlage 100 mm (Serie 3.2) mit größtenteils liegenden Jahrringen betrachtet (Abb. 2-5). Wie auch bei der Variation der Holzart soll der Serienumfang jeweils mindestens 20 Proben betragen.

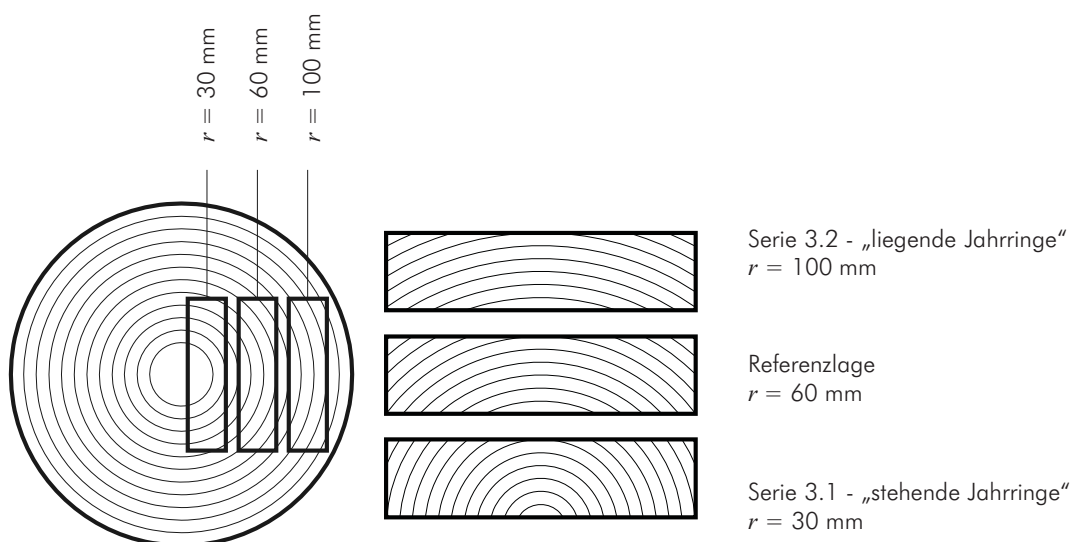


Abb. 2-5: In der Prüfstudie untersuchte Jahrringlagen

### Variation des $b / d$ -Verhältnisses des Brettes (Serie 4.i)

Das geometrische Verhältnis Brettbreite ( $b$ ) zu Brettstärke ( $d$ ) variiert in verschiedenen Produkten unterschiedlicher Brettsperrholzproduzenten. Ein als in der Größenordnung nicht unübliches  $b / d$ -Verhältnis von  $120 / 30$  mm = 4 wird für die Referenzserie definiert.

Weitere untersuchte  $b / d$ -Verhältnisse lauten auf zwei (Serie 4.1) und sechs (Serie 4.2). Erreicht werden diese Relationen unter Beibehaltung der Brettstärke durch Änderung der Brettbreite auf 60 bzw. 180 mm. Aufbau, Geometrie und Materialien sind in Abb. 2-6 dargestellt, wiederum werden 20 Stück je Serie vorgesehen.

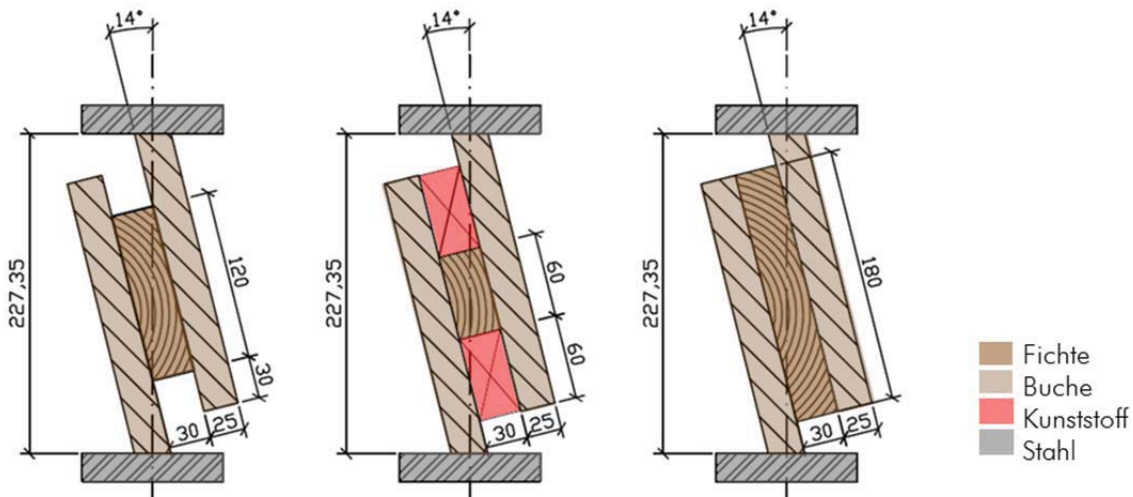


Abb. 2-6: Prüfkörper der Referenzserie, Serie 4.1 ( $b/d = 2$ ) und Serie 4.2 ( $b/d = 6$ ) (v.l.n.r.)

Das geprüfte Holz der Serien 4.i besitzt die selbe Lage im Stamm wie Referenzserie 1.1, bei Prüfkörpern der Serie 4.1 werden aufgrund des großen Überstandes der Lasteinbringungslaschen reibungsarme Kunststoffquader zur Stabilisierung angebracht.

### Änderung der Rollschubeigenschaften entlang eines Brettes (Serie 1.2)

Proben aus unterschiedlichen Brettern gleicher Holzart weisen aufgrund der verschiedenen klimatischen Bedingungen, denen das Lebewesen Baum während seines Wachstums ausgesetzt ist, aber auch wegen unterschiedlicher genetischer Voraussetzungen teils erhebliche Festigkeits- sowie Steifigkeitsunterschiede auf.

Dieser Unterschied soll mithilfe der Referenzserie (1.1) sowie sämtlichen anderen, mit Ausnahme auf Serie 1.2, bewusst Eingang in die Ermittlung statistisch aussagekräftiger Materialkennwerte finden. Jede Serie besteht deshalb ausschließlich aus Prüfkörpern unterschiedlicher Bretter, d.h. in einer Serie sind keine zwei Prüfkörper aus demselben Brett.

Um aber auch Informationen über die Entwicklung der Rollschubeigenschaften entlang des Brettes zu generieren, werden in Serie 1.2 je zehn Prüfkörper aus zehn Brettern gewonnen und mit Laufnummer versehen. Der Gesamtumfang der Serie beträgt demnach 100 Prüfkörper.



### Systemverhalten von auf Rollschub beanspruchten Brettern (5.i)

Mit diesen Serien soll das Systemverhalten von auf Rollschub beanspruchten Mehrbrett-Prüfkörpern untersucht werden. Die Einzelbretter, die in Material und Geometrie jener der Referenzklasse entsprechen, werden in paarweise paralleler (Serie 5.1), in Vierer-Gruppen paralleler (Serie 5.2) und in paralleler (4) – serieller (3) Anordnung (Serie 5.3) geprüft, wobei die Laschengeometrie entsprechend angepasst wird (Abb. 2-7).

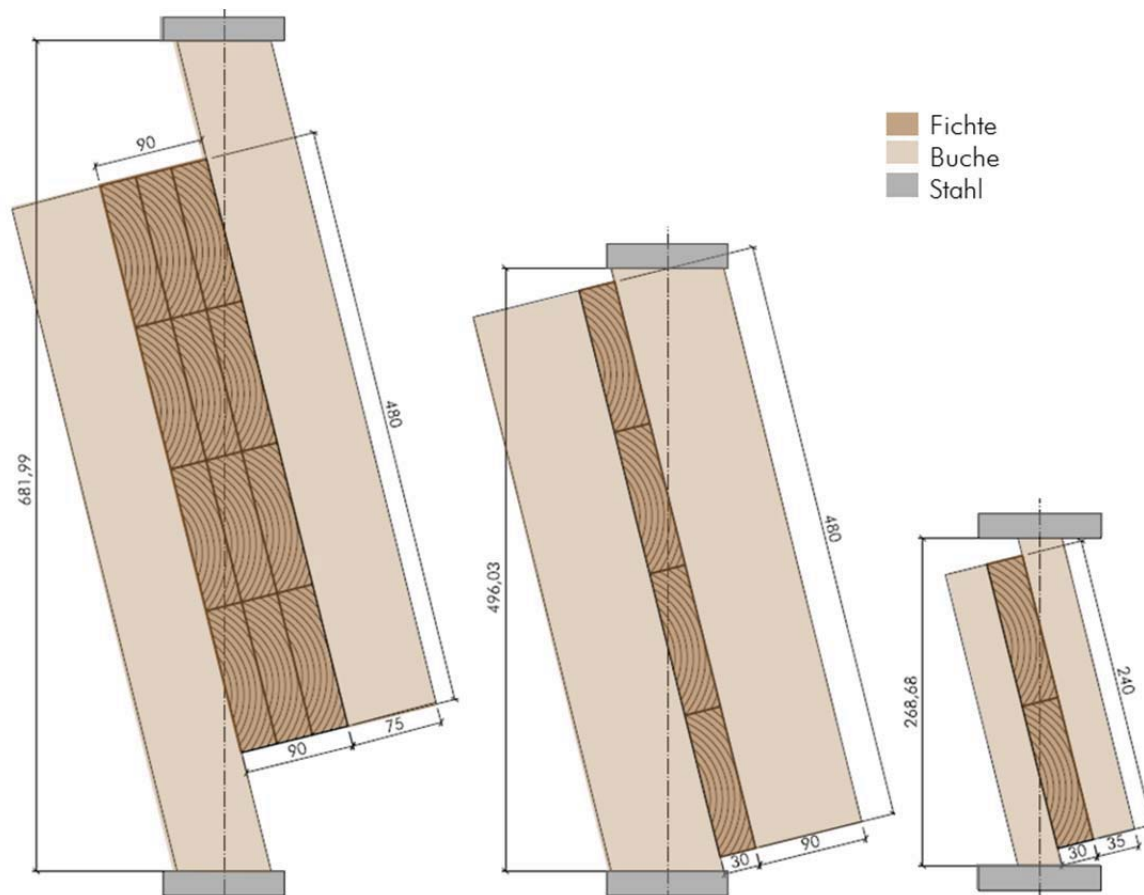


Abb. 2-7: Prüfkörper der Systemserien 5.3, 5.2 und 5.1 (v.l.n.r.)

Die geringere Anzahl von zehn Prüfkörpern je Serie ergibt sich aus der vermuteten geringeren Streuung im Vergleich zu den Einzelprüfkörpern, bedungen durch die Möglichkeit einer Spannungumlagerung vor dem Versagen der Einzelbretter.

## 2.2 Produktion der Prüfkörper

---

Lediglich bei den Fichtenbrettern ist aufgrund der Vielzahl an Serien, in der diese Holzart eingesetzt wird, die „Mehrfachverwendung“ ein und desselben Brettes möglich und im Sinne einer ökonomischen Materialnutzung erwünscht. Um möglichst geringen Verschnitt zu erhalten, wird unter Berücksichtigung der verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Serien sowie der Einplanung von Reserve vor der Bestellung ein Brettnutzungsprogramm erarbeitet, in welchem sämtliche Brettabschnitte bereits einer Serie zugeordnet werden.

Die gelieferten Bretter mit den Abmessungen  $L / B / H = 4.000 / 130$  mm bzw.  $190 / 35$  mm werden einer Sortierung, vor allem hinsichtlich der Lage im Stamm, unterzogen und für die Studie ungeeignete Ware aussortiert. Bei sämtlichen Holzarten, mit Ausnahme der Fichte, werden die geeignetsten 25 Bretter gewählt, um eine Reserve von jeweils fünf Stück je Serie zu erhalten und so möglichen Problemen bei der Prüfkörperherstellung oder der Versuchsdurchführung gegebenenfalls Rechnung tragen zu können.

### 2.2.1 Vorbereiten der Bretter

Aus den geeigneten Brettern werden, mit Ausnahme der Fichtenbretter, in einem ersten Schritt weitestgehend ast- und harzfreie Abschnitte von 500 mm Länge geschnitten. Um die Prüfkörper am Ende der Produktion samt Laschen exakt auf die gewünschte Breite bringen zu können, aber auch um den folgenden Arbeitsschritt, das Hobeln der Bretter, zu erleichtern, wird die „Zielbreite“ von 100 mm dabei deutlich überschritten.

Das angesprochene Hobeln der Bretter auf die gewünschte Stärke von 30 mm (bzw. 27 mm bei Buche und Esche) stellt den nächsten bzw. für die Fichtenhölzer ersten Schritt dar und erfolgt stufenweise beidseitig. Außerdem wird bei den immer noch 4 m langen Fichtenbrettern zusätzlich die Breite von 120 mm durch beidseitiges Hobeln herbeigeführt. Diese Breite von 120 mm, bei den Harthölzern Buche, Birke und Esche auch die Länge von 100 mm, da ein auf Maß schneiden wegen der Verklebung mit Stahllaschen nicht möglich ist, wird bei den anderen Holzarten per Kreis-sägeschnitt erreicht.

Die Prüfkörper der Holzarten Buche, Birke und Esche besitzen bereits die gewünschten Abmessungen. Die Fichtenbretter werden nun in rd. 140 mm lange Teile geschnitten und gemäß den Überlegungen hinsichtlich der Brettnutzung beschriftet und den unterschiedlichen Serien zugeordnet.

Da als nächster Schritt die Verklebung mit den Laschen aus Buche bzw. Stahl ansteht, werden an dieser Stelle Geometrie und Masse erfasst, um auf die Rohdichte schließen zu können, wobei jeweils zwei Maße je Seite aufgenommen und gemittelt werden.

Vor und zwischen sämtlichen Arbeitsschritten werden die Prüfkörper in einer Klimakammer bei einem Normklima von 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert, um bei den Versuchen selbst die gewünschte Holzfeuchtigkeit von rd. 12 % sicherzustellen.

### 2.2.2 Herstellen der Holzlaschen

Die Laschen für die Weichholzarten sollen aus Buche bestehen; lediglich sehr untergeordnet kommt Esche für die Serien 5.1 und 5.2 zum Einsatz.

Die Bretter werden auf eine Stärke von 25 mm gehobelt und auf eine Breite von 140 mm gebracht. Anschließend werden für die Einzelprüfkörper Stücke einer Länge von 220 mm geschnitten.

Da die Laschenstärke der Systemprüfkörper (Serie 5.i) die Dicke der vorhandenen Bretter übersteigt, werden dazu mehrere Bretter mit Weißleim zur notwendigen Stärke verklebt. Für Laschen der Serie 5.1 werden zuerst drei Bretter verklebt, anschließend horizontal halbiert und abschließend auf die gewünschte Stärke von 35 mm gehobelt. Die Laschen der Serie 5.2 bestehen aus vier ( $d = 90$  mm), jene der Serie 5.3 aus drei Schichten ( $d = 75$  mm).

### 2.2.3 Zusammenbau der Prüfkörper

#### Serien 1.1, 1.2, 2.3, 2.5, 3.1, 3.2, 4.1 und 4.2

Die vorbereiteten Fichten-, Kiefer- und Pappelholzstücke mit den Abmessungen 140 mm in Faserichtung, 120 mm normal zur Faser und 30 mm Stärke werden mit 140 mm breiten und 220 mm langen Buchenlaschen verklebt. Dabei wird eine Klebstoffmenge von ca.  $150 \text{ g/m}^2$  beidseitig auf das Prüfholz aufgebracht und zwischen die leicht angefeuchteten Laschen gelegt. In einer hydraulischen Presse unter einem Druck von  $0,8 \text{ N/mm}^2$  härtet der Klebstoff dann drei Stunden (Purbond HB 110 1K) bzw. eineinhalb Stunden (Purbond S 309) aus.

Im Anschluss werden die Prüfkörper mit der Kreissäge auf die endgültige Breite von 100 mm geschnitten und abschließend die überstehenden Laschen auf Länge und Winkel gebracht.

#### Serien 2.1, 2.2 und 2.4

Da die Prüfkraft bei den Harthölzern über Stahllaschen aufgebracht wird, ist eine Nachbearbeitung nach erfolgter Verklebung nicht mehr möglich. Die Stahllaschen werden händisch angeschliffen und unmittelbar vor dem Verkleben mit Alkohol gereinigt. Der Pressdruck während der Aushärtephase wird über Schraubzwingen aufgebracht, damit kann ein Verrutschen zwischen den Laschen und daraus resultierende Störungen in der Prüfkörpergeometrie vermieden werden.

#### Serie 5.1

Die Schmalseiten der beiden Elemente eines Prüfkörpers werden vorab mit Weißleim verklebt, die Aufbringung eines geringen Pressdruckes bzw. ein Sicherstellen gegen Verrutschen erfolgt dabei durch zwei seitlich aufgebrachte Klebebandstreifen.

Die weitere Vorgehensweise erfolgt analog zu Serie 1.1.

## Serie 5.2

Wie schon bei Serie 5.1 werden auch hier vorab die vier Elemente eines Prüfkörpers mit Weißleim schmalseitenverklebt. Da wegen der begrenzten Blattgröße der zur Verfügung stehenden Kreissäge der Gesamtprüfkörper nicht in voller Höhe auf Maß gebracht werden kann, werden die geprüften Elemente im Anschluss an das Verleimen bereits auf ihre endgültige Breite von 100 mm gebracht.

Die Laschen, die während der Verklebung mit dem Prüfholz noch eine Breite von 140 mm besitzen, werden erst im nächsten Schritt durch vier Schnitte auf etwa 102 mm Breite gebracht, um nicht das dazwischenliegende Holz zu beschädigen. Auch hier werden zuletzt die Laschenlänge und der Winkel passend geschnitten.

## Serie 5.3

Bei den mehrschichtigen Prüfkörpern der Serie 5.3 werden zuerst die einzelnen Stapel miteinander verklebt und diese anschließend auf ihre endgültige Form gebracht, ebenfalls wie bei Serie 5.2 aufgrund der begrenzten Kreissägeblattgröße.

Die weitere Vorgehensweise erfolgt analog zu jener bei Serie 5.2, lediglich die Schichtstärke unterscheidet ab diesem Punkt die Prüfkörper der beiden Serien.

## 2.3 Ermittlung der Prüfdaten

Mit Hilfe der erläuterten Prüfkfiguration im dargestellten Umfang sollen die gesuchten Materialkennwerte ermittelt werden. Daneben sind eine Reihe weiterer Werte zu ermitteln, um normgerechte und aussagekräftige Daten zu erhalten. Wegen der erhöhten Datenmenge werden zur Be- und Verarbeitung die Programme R [50] sowie Microsoft Excel [51] zu Hilfe genommen.

### 2.3.1 Holzfeuchte

Der Feuchtegehalt der Prüfkörper wird mittels Gl. (2-1) gemäß ÖNORM EN 13183-1 [52] nach dem Darrverfahren bestimmt.

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \text{Gl. (2-1)}$$

- $u$  ... Feuchtegehalt der Probe [%]  
 $m_1$  ... Probenmasse vor Trocknung [g]  
 $m_0$  ... Probenmasse im darrtrockenen Zustand [g]

Aufgrund der Verklebung der zu prüfenden Hölzer mit Buchenholz- bzw. Stahllaschen ist eine nachträgliche Bestimmung der Holzfeuchte des Prüfkörpers selbst nicht möglich. Ein vollständiges Ablösen des Prüfholzes von den Laschen durch Hitzeeintrag zur Zerstörung der Verklebung würde den tatsächlich bei Durchführung der Prüfungen vorhandenen Feuchtegehalt völlig verfälschen. Diese Herangehensweise wird daher ausgeschlossen. Das Entfernen der Laschen durch einen Kreissägeschnitt parallel zur Klebefuge wird aufgrund des damit einhergehenden Verlustes von Teilen des Querschnittes und der schwierigen Umsetzbarkeit bei bereits in mehrere Teilstücke gebrochenen Prüfkörpern ebenfalls als nicht zweckmäßig angesehen.

Es wird daher eine alternative, von der Norm abweichende Vorgehensweise gewählt: Aus dem gehobelten, ca. 500 mm langen Brettstück, das bereits die endgültigen Querschnittsmaße aufweist, wird neben dem eigentlichen Prüfkörper, der zur Durchführung der mechanischen Untersuchungen herangezogen wird, ein zweiter, direkt danebenliegender merkmalfreier Abschnitt von etwa 20 mm Breite gewonnen. Dieser dient ausschließlich der Ermittlung des Feuchtegehalts nach Durchführung der Prüfungen und erfährt stets dieselben klimatischen Bedingungen wie der eigentliche Prüfkörper.

### 2.3.2 Rohdichte

In einem ersten Schritt wird die Dichte der Prüfkörper bei vorhandener Holzfeuchte  $u$ , die sogenannte Normalrohndichte  $\rho_{u,r}$ , ermittelt. Gemäß ÖNORM ISO 3131 [53] kann dazu Gl. (2-2) herangezogen werden.

$$\rho_u = \frac{m_u}{a_u \cdot b_u \cdot l_u} = \frac{m_u}{V_u} \quad \text{Gl. (2-2)}$$

- $\rho_u$  ... Dichte der Probe bei Feuchtegehalt  $u$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m_u$  ... Probenmasse bei Feuchtegehalt  $u$  [kg]  
 $a_u$  ... Probenstärke bei Feuchtegehalt  $u$  [m]  
 $b_u$  ... Probenbreite bei Feuchtegehalt  $u$  [m]  
 $l_u$  ... Probenlänge bei Feuchtegehalt  $u$  [m]

Um Rohdichten von unterschiedlich gelagerten Hölzern besser vergleichbar zu machen wird diese auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % umgerechnet. Gemäß ÖNORM EN 384 [39] lässt sich  $\rho_{12}$  mit Hilfe Gl. (2-3) ermitteln.

$$\rho_{12} = \rho_u \cdot \left( 1 + (12 - u) \cdot \frac{0,5}{100} \right) \quad \text{Gl. (2-3)}$$

- $\rho_u$  ... Dichte der Probe bei Feuchtegehalt  $u$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{12}$  ... Dichte der Probe bei Feuchtegehalt 12 % [kg/m<sup>3</sup>]  
 $u$  ... Feuchtegehalt [%]

### 2.3.3 Jahrringlage

Mit Jahrringlineal und Rollmeter werden sämtliche Prüfkörper hinsichtlich ihrer Position im Stamm erfasst. Dabei wird eine mit beschrifteten Kurven unterschiedlicher Radien bedruckte, transparente Folie auf den Querschnitt aufgelegt und mit einer Präzision von 5 mm der Radius des den Brettmittelpunkt durchlaufenden Jahrrings aufgenommen. Die Lage jenes Punktes der Jahrringe, dessen Tangente parallel zur Breite des Brettes verläuft gibt Auskunft über die Symmetrie des Prüfkörpers. Beträgt die Exzentrizität 10 mm oder mehr, so wird diese erfasst.

### 2.3.4 Rollschubfestigkeit

Die Ermittlung der Rollschubfestigkeit erfolgt analog zu den Festlegungen in ÖNORM EN 408 [42] für die Ermittlung der Scherfestigkeit in Faserrichtung. Sie lässt sich in Abhängigkeit von maximaler Prüfkraft, Scherfläche und Einbauwinkel mit Gl. (2-4) ermitteln.

$$f_R = \frac{F_{\max} \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b} \quad \text{Gl. (2-4)}$$

- $f_R$  ... Rollschubfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $F_{\max}$  ... maximale Prüfkraft [N]  
 $l$  ... Länge der Scherfläche [mm]  
 $b$  ... Breite der Scherfläche [mm]

Dieser Wert stellt die Festigkeit bei der bei Durchführung der Prüfung vorhandenen Holzfeuchte dar. Um die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen, wird auch hier eine Umrechnung auf den Referenzfeuchtegehalt von 12 % durchgeführt.

In der ÖNORM EN 384 [39] ist eine Anpassung der Festigkeit bei Abweichung der Holzfeuchte von 12 % lediglich für die Druckfestigkeit parallel zur Faser in der Höhe von 3 % je Feuchteprozent

vorgesehen (siehe 1.3.5). Weisen Proben eine niedrigere Holzfeuchte auf, so ist die Festigkeit zu verringern. Eine Anpassung in der Höhe von 3 % je Feuchteprozent wird in dieser Arbeit auch für die Rollschubfestigkeit vorgenommen, der feuchtebereinigte Wert wird mittels Gl. (2-5) ermittelt.

$$f_{R,12} = f_{R,u} \cdot \left[ 1 - (12 - u) \cdot \frac{3}{100} \right] \quad \text{Gl. (2-5)}$$

$f_{R,12}$  ... Rollschubfestigkeit bei 12 % Feuchtegehalt [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_{R,u}$  ... Rollschubfestigkeit bei Feuchtegehalt  $u$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 $u$  ... Feuchtegehalt [%]

### 2.3.5 Rollschubmodul

Der Rollschubmodul ergibt sich aus Gl. (2-6) als Quotient aus Schubspannung  $\tau_R$  und Verzerrung  $\gamma_R$ .

$$G_R = \frac{\tau_R}{\gamma_R} = \frac{\frac{F \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b}}{\frac{w_{//}}{d}} = \frac{F \cdot \cos 14^\circ \cdot d}{l \cdot b \cdot w_{//}} \quad \text{Gl. (2-6)}$$

$G_R$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\tau_R$  ... Rollschubspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\gamma_R$  ... Verzerrungswinkel [-]  
 $F$  ... Prüfkraft [N]  
 $l$  ... Länge der Scherfläche [mm]  
 $b$  ... Breite der Scherfläche [mm]  
 $d$  ... Brettstärke [mm]  
 $w_{//}$  ... Verschiebung parallel zur Scherfuge [mm]

Laut Untersuchungen von Neuhaus [35] besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Rollschubmodul (siehe 1.3.5) für den Bereich  $3\% \leq u \leq 18\%$ . Die ermittelte Steigung der Regressionsgerade beträgt dabei -1,85. Es wird deshalb eine Korrektur in der Höhe von 2 % je Feuchteprozent mittels Gl. (2-7) durchgeführt.

$$G_{R,12} = G_{R,u} \cdot \left[ 1 - (12 - u) \cdot \frac{2}{100} \right] \quad \text{Gl. (2-7)}$$

$G_{R,12}$  ... Rollschubmodul bei 12 % Feuchtegehalt [N/mm<sup>2</sup>]  
 $G_{R,u}$  ... Rollschubmodul bei Feuchtegehalt  $u$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 $u$  ... Feuchtegehalt [%]

## 2.4 Durchführung der Prüfungen

Aufgrund der erwarteten unterschiedlich hohen Festigkeiten (siehe Abschnitt 1) der verschiedenen Holzarten werden zum einen Buchenholz- zum anderen Stahllaschen zur Lastaufbringung eingesetzt. Der Ablauf der Prüfungen unterscheidet sich in beiden Fällen nur in wenigen Handgriffen, die jeweils erwähnt werden.

### 2.4.1 Ablauf der Prüfungen

Vor Einbau des Prüfkörpers in die Prüfmaschine wird der Prüfkörper seitlich (d.h. auf der Querschnittsfläche) beschriftet, um eine spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu erleichtern. Die Halterungen der Wegabnehmer sowie der Gegenplatten, an denen der Messfühler später anliegt, werden an vorher angezeichneter Position angebracht, wobei bereits auf die spätere „Einbauorientierung“ geachtet wird: Um eventuelle Schwachstellen der Prüfkongfiguration ausschließen oder zumindest erkennen zu können werden jeweils die Hälfte der Prüfkörper mit der rechten Seite nach unten („n-Orientierung“) bzw. nach oben („u-Orientierung“) eingebaut (Abb. 2-9). Bei Prüfkörpern mit Stahllasche werden die Wegabnehmerhalterungen direkt mithilfe der vorhandenen Gewindegänge der Laschen fixiert.



Abb. 2-8: Befestigung der Wegsensoren an Holz bzw. Stahllaschen

Die Anordnung der Wegsensoren beidseitig des Prüfkörpers erfolgt derart, dass jeweils die Konterplatten an der der Lasteinbringung dienenden oberen Lasche angebracht werden. Damit wird erreicht, dass sich die Spitze des induktiven Wegabnehmers aus dem Schaft herausbewegt und bei größerer als angenommener Verformung der Wegabnehmer nicht gedrückt und eventuell beschädigt wird (Abb. 2-8).





Abb. 2-9: Prüfkörper rechte Seite unten („n“; links) und rechte Seite oben („u“; rechts)

Der Prüfkörper wird in der Maschine platziert; angebrachte Leithölzchen helfen dabei, diesen zentrisch in Achse der Prüfkraft zu positionieren, um den Eintrag ungewollter Zusatzmomente zu vermeiden. Aufgrund der spitz zulaufenden Enden der Stahllaschen können hier Last- und Widerlagerplatten mit Einkerbung zur Lagesicherung und exakten Positionierung verwendet werden, lediglich ein Leithölzchen zur Einpassung in im Grundriss orthogonaler Richtung ist notwendig.

Nachdem der Prüfkörper platziert und die Wegabnehmer angebracht wurden, wird eine Vorkraft in der Höhe von 200 N aufgebracht. Dies soll dazu dienen, der sphärisch gelagerten Lastplatte (Abb. 2-10) die Möglichkeit zu geben, vollflächig auf der Lastlasche aufzuliegen und so einen über die gesamte Prüfkörperbreite gleichmäßigen Lasteintrag zu gewährleisten. Nach Erreichen der Vorkraft wird dieses Kugelgelenk bestmöglich über Reibverbund gesperrt und die Prüfung mit konstanter Geschwindigkeit weggesteuert fortgesetzt.



Abb. 2-10: Sphärisch gelagerte Platte zur Lastaufbringung

Die gewählte Prüfgeschwindigkeit, mit der sich die Lastplatte nach unten bewegt, differiert dabei zwischen den unterschiedlichen Serien. ÖNORM EN 408 [42] sieht vor, dass die Höchstlast innerhalb von  $300 \pm 120$  Sekunden erreicht wird. Über Abschätzung von Festigkeit und Steifigkeit im

Rahmen der Prüfvorbereitung kann die maximal auftretende Verschiebung abgeschätzt werden. Diese wird durch 300 Sekunden geteilt und die so errechnete Geschwindigkeit als erster Startwert bei den Prüfungen eingestellt; gegebenenfalls wird nach einigen wenigen Prüfungen nachjustiert.

Tab. 2-1: Prüfgeschwindigkeit, Kraft bei Abnahme der Wegsensoren und mittlere Dauer bis zur Erreichung der tatsächlichen Maximalkraft

Serie	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	5.3
$v$ [mm/min]	0,7	0,6	0,6	0,5	0,8	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,7
$0,5 F_{est}$ [kN]	10	10	20	30	18	30	10	10	10	3	17	20	40	25
$t_{F,max,mean}$ [s]	213	-	264	303	262	267	382	274	405	266	296	227	239	203

Nach Erreichen von 50 % der geschätzten Höchstlast werden die Wegabnehmer vom Prüfkörper entfernt. Dies ist einerseits notwendig, um diese präzisen Messgeräte nicht zu beschädigen, andererseits ist das Kraft-Verformungsverhalten ab dieser Kraft für die durchzuführende Studie und die gewünschten Kennwerte nur von nachrangigem Interesse.

Besonders in diesem zweiten Abschnitt der Prüfung kommt es zu serienspezifischen aber auch individuell bei einzelnen Prüfkörpern auftretender Rissbildung, die ebenso wie Einbauorientierung, Prüfgeschwindigkeit und sonstige Ereignisse während der Versuchsdurchführung protokolliert werden.

Während jeder Prüfung werden mit einer Frequenz von 5 Hz folgende Parameter aufgezeichnet:

- Prüfzeit [s]
- Standardkraft [N]
- Traversenweg (vertikal) [mm]
- Wegabnehmer 1 und 2 [mm] (bis  $0,5 \cdot F_{est}$ )

## 2.4.2 Ermittlung des Rollschubmoduls

Ziel dieser Arbeit ist im Wesentlichen, für unterschiedliche Holzarten und -Eigenschaften die Kennwerte für Festigkeit und Steifigkeit unter Rollschubbelastung zu ermitteln. Während sich die Rollschubfestigkeit einfach als Quotient aus der maximaler Prüfkraft umgerechnet auf die Orientierung der Schubfuge und der belasteten Scherfläche berechnen lässt, ändert sich das Spannungs-Verzerrungsverhalten je nach Lastniveau.

ÖNORM EN 789 [54] regelt für Scherversuche in Platten- und Scheibenebene die Berechnung des Schubmoduls. Dabei ist die Last-Verformungskurve aufzuzeichnen und für den Bereich zwischen 10 und 40 % der Höchstlast eine Regressionsanalyse durchzuführen. Besonders in diesem Bereich ist die Kenntnis von Steifigkeiten in der Regel von besonderem Interesse, werden doch Berechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (engl. Serviceability Limit State, SLS) bei etwa diesem Lastniveau durchgeführt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Versuche, insbesondere, wenn die Kraftänderung [dN] in einem Diagramm dem mittleren Weg [mm] der Wegabnehmer gegenübergestellt wird, ist das

nichtlineare Last-Verformungsverhalten über weite Teile der Prüfung erkennbar (Abb. 2-11). Da die Kraftänderung [dN] die – mit dem Faktor der Scherfläche multiplizierte – erste Ableitung der Schubspannung  $\tau$  darstellt, entspricht ein konstanter Verlauf in dieser Darstellung einem linearen Verlauf im dazugehörigen Last-Verformungsdiagramm.

Es soll exemplarisch die Vorgehensweise anhand des Prüfkörpers 11-09 (Referenzserie 1.1, Prüfkörper 09) gezeigt werden: In Abb. 2-11 wird der Kraftunterschied der Messpunkte (MP)  $i$  und  $(i - 1)$  mit dem jeweiligen Weg aufgetragen. Der gemäß [42] bei der Berechnung des Schubmoduls zu betrachtende Bereich von 10 % der maximalen Prüfkraft  $F_{max}$  bis 40 % dieser Kraft bzw. bis zum Entfernen der Wegsensoren wird durch die strichlierte, graue, Linie gekennzeichnet. Abschnitte nicht konstanter Kraftänderung fallen in diesen Bereich, besonders auffällig stellt sich bei sämtlichen Prüfkörpern eine leichte Senke bei einer Prüfkraft von umgerechnet rd. 5 kN ein. Im Rahmen einer regelmäßigen Kontrolle durch einen Vertreter der Herstellerfirma der Prüfmaschine konnte eine leichte Ungenauigkeit der Kraftmessdose in diesem Bereich in zulässiger Höhe von unter 1 % bestätigt werden.

Um diese Bereiche trotzdem aussparen zu können und zur Ermittlung des Rollschubmoduls einen möglichst linearen Bereich von  $\tau / \gamma$  zu wählen, wurden zur automatisierten Identifizierung eines solchen Abschnittes drei Bedingungen formuliert:

1. Grundbedingung: Der Mittelwert der Kraftänderung aus den Messpunkten  $(i - 5)$  bis  $(i + 5)$  darf sich um nicht mehr als eine definierte Größe vom Mittelwert aus den Messpunkten  $((i - 6) - 5)$  bis  $((i - 6) + 5)$  unterscheiden. Auf Grund der oszillierenden Messwerte (Rauschen) ist eine Mittelung notwendig. Die Begrenzung der Differenz der beiden angegebenen Werte soll Bereiche größerer Steigung eliminieren.
2. Startbedingung: Um nur ein „Plateau“ zur Berechnung von  $G_R$  heranzuziehen, soll der gewählte Bereich erst nach Überschreiten der Kraftänderung von einem prozentuellen Anteil der maximalen Kraftänderung (z.B. 90 %) beginnen.
3. Endbedingung: Der gewählte Bereich endet dort, wo 1. oder 2. nicht mehr erfüllt werden, spätestens aber bei Erreichen jener Prüfkraft, bei der die Wegsensoren entfernt werden.

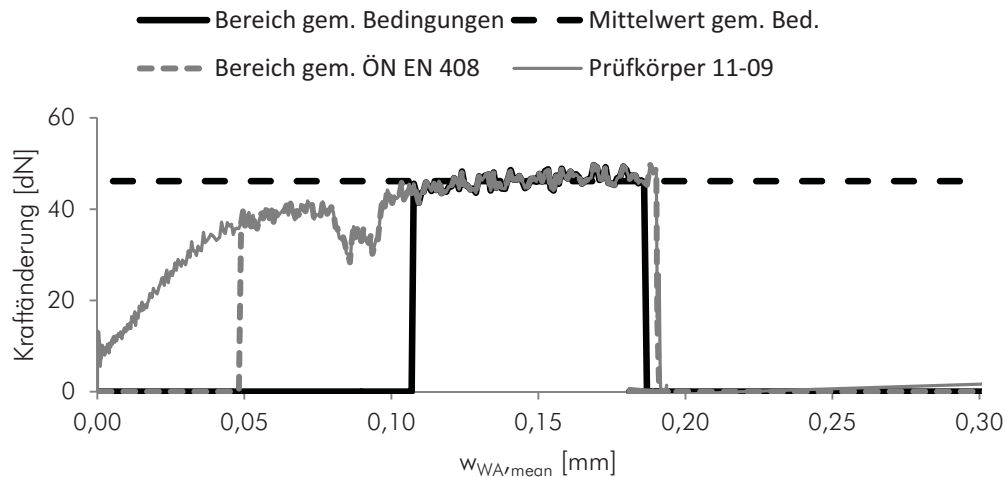


Abb. 2-11: Kraftänderung vs. Weg, Prüfkörper 11-09

Der horizontale Balken gibt den Mittelwert der Kraftänderung im gewählten Bereich an und dient der Kontrolle dieses. Durch die formulierten Bedingungen lässt sich sehr rasch ein geeigneter Bereich zur Auswertung des Rollschubmoduls finden.

Nachdem die Bereiche zur Auswertung sowohl nach [42] als auch gemäß den formulierten Bedingungen gefunden sind, kann die eigentliche Berechnung des Rollschubmoduls durchgeführt werden. Dazu wird die Rollschubspannung der Schubverzerrung im jeweiligen Abschnitt gegenübergestellt und eine einfache lineare Regressionsanalyse durchgeführt (Abb. 2-12).

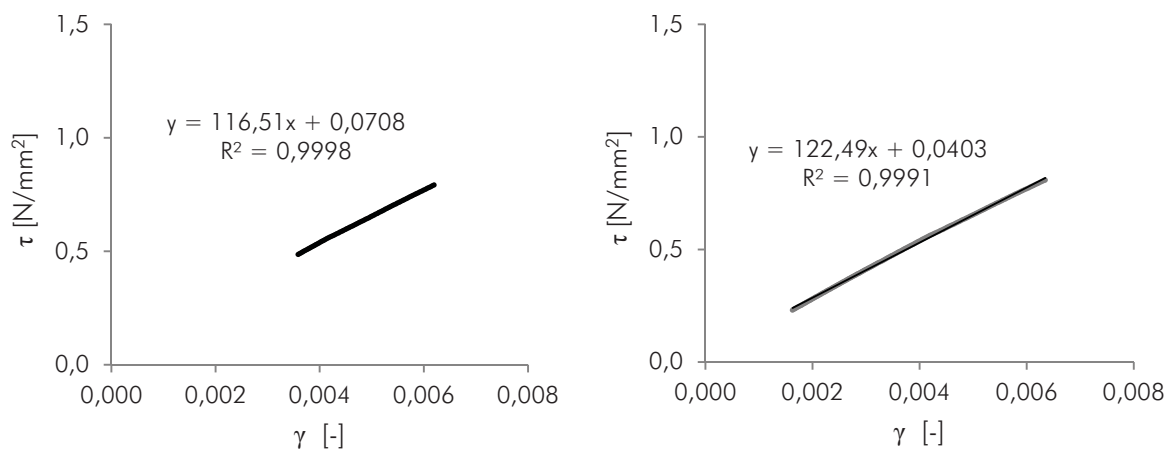


Abb. 2-12:  $\tau / \gamma$ -Beziehung im Bereich nach den Bedingungen (links) und gemäß [42] (rechts)

Beide Methoden der Schubmodulermittlung ergeben ausreichend hohe Korrelationen der Ausgleichsgeraden von über 0,99 bei sämtlichen Prüfkörpern. Die sich ergebende Differenz in der Größe des Moduls liegt in der Regel bei unter 5 % und nur selten zwischen 5 und 10 %, wobei der nach ÖNORM EN 408 [42] berechnete Wert durchwegs größer ist.

## 2.5 Methodik der Auswertung

Nach erfolgter Detektion und Elimination von Ausreißern werden in Abschnitt 3 und 4 die Versuchsergebnisse dargestellt und diskutiert. Die dabei verwendeten Abkürzungen bzw. Kurzbezeichnungen, die den ermittelten Kennwerten zugrundeliegenden statistischen Methoden sowie die angewandten Signifikanztests werden in den folgenden Abschnitten 2.5.1 bis 2.5.4 kurz beschrieben.

### 2.5.1 Verwendete Abkürzungen

Um eine einfache, kompakte Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, ist die Verwendung einiger Abkürzungen unumgänglich. Für die weiteren Abschnitte sind dabei relevant:

$\rho_{12}$	... Dichte der Probe bei einer Referenz-Holzfeuchtigkeit von 12 % [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$r$	... Radius bzw. Abstand des Brettmittelpunktes von der Stammachse [mm]
$f_{R,12}$	... Rollschubfestigkeit bei einer Referenz-Holzfeuchtigkeit von 12 % [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$G_{R,12}$	... Rollschubmodul bei einer Referenz-Holzfeuchtigkeit von 12 %, gem. den Bedingungen [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$G_{R,12,EN}$	... Rollschubmodul bei einer Referenz-Holzfeuchtigkeit von 12 %, im Bereich nach [42] [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$n$	... Anzahl der Prüfkörper [-]
min	... Minimalwert des jeweiligen Kennwertes
mean	... arithmetisches Mittel des jeweiligen Kennwertes
med	... Median des jeweiligen Kennwertes
max	... Maximalwert des jeweiligen Kennwertes
CoV	... Variationskoeffizient ( $= s / \bar{x}$ für Stichproben) [%]
$q_{05}$	... 5 %-Fraktilwert bei Standardnormalverteilung der empirischen Daten gemäß Rangstatistik
$q_{05,LN}$	... 5 %-Fraktilwert unter der Annahme einer Log-Normalverteilung

### 2.5.2 Detektion und Elimination von Ausreißern

Anhand der grafischen Darstellung der ermittelten Kennwerte in Box-Plots, können von der Masse der Realisierung abweichende Proben einfach erkannt werden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden diese analysiert und gegebenenfalls von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Es wird dabei zwischen technologischen und statistischen Ausreißern unterschieden.

Gehen herausragende Festigkeiten bzw. Steifigkeiten einher mit sonstigen, vom Mittel stark abweichenden, Materialeigenschaften (insbesondere Rohdichte und abweichende Jahrringlage) oder sind nach Versuchsdurchführung an der Probe auffällige Holzmerkmale (Harzgallen, Äste, starker Buchs, ...) feststellbar, so wird die betreffende Probe als technologischer Ausreißer für die Ermittlung der statistischen Kenngrößen Rollschubfestigkeit und/oder -modul ausgeschlossen. Dies gilt allgemein für alle Proben, auch wenn ihre Kennwerte nicht deutlich von der Masse der Realisierungen verschieden sind.

Sind außerordentliche Werte nicht technologisch begründbar, so wird unter Berücksichtigung des Stichprobenumfanges, der Streuung der sonstigen Proben sowie der absoluten und relativen Abweichung von Mittel und Median, ermittelt an Stichproben mit und ohne der betreffenden Probe-körper, der betreffende Prüfkörper gegebenenfalls ausgeschlossen. Dies soll allerdings nur in äußerst geringem Maße erfolgen, um die natürliche Streuung der Materialeigenschaften wirklichkeitsnah zu erfassen und widerzugeben.

### 2.5.3 Verteilungs- und Regressionsfunktionen

Brandner beschreibt in [55], dass die Eigenschaften sämtlicher Materialien einer gewissen Streuung unterliegen, speziell für natürliche Materialien, wie beispielsweise Holz, lassen sich höhere Variationen feststellen (Tab. 2-2). Die somit jederzeitig verfügbare Vielfalt wird in [55] als „... Schlüssel zur Evolution ...“ bezeichnet.

Tab. 2-2: Streuung unterschiedlicher Materialeigenschaften

Materialeigenschaft	Bezeichnung	CoV
Fließgrenze von Baustahl	$f_y$	7 %
Zugfestigkeit von Baustahl	$f_u$	4 %
Biegefestigkeit von Bauholz	$f_m$	25 %
E-Modul von Bauholz	$E_{m,0}$	13 %
Zugfestigkeit von Bauholz in Faserrichtung	$f_{t,0}$	30 %

Zur Beschreibung von Verteilungen stehen unterschiedliche statistische Modelle zur Verfügung, es gilt für die jeweilige Aufgabe geeignete auszuwählen.

Wegen der weiten Verbreitung und häufigen Anwendung wird in dieser Studie die Normalverteilung (ND ... Normal Distribution) herangezogen. Die Dichtefunktion wird dabei durch Gl. (2-8) beschrieben.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], X \in \mathbb{R} \quad \text{Gl. (2-8)}$$

Wegen des Definitionsbereiches der ND ( $-\infty$  bis  $+\infty$ ) ist diese zur Beschreibung von Verteilungen von mechanischen Eigenschaften, die ausschließlich positive Werte aufweisen können, theoretisch nicht zielführend anwendbar. Deshalb wird neben der ND auch die logarithmische Normalverteilung (LND) verwendet. Diese ist nur für den positiven Bereich definiert, die Dichteverteilung wird durch Gl. (2-9) beschrieben.

$$f_Y(y) = \frac{1}{y \cdot \sigma_X \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\ln(y) - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] \quad \text{Gl. (2-9)}$$

Nach [55] ist der Unterschied zwischen den beiden Verteilungsformen vernachlässigbar, wenn die Streuung der Parameter gering ist (CoV  $\approx$  15 bis 20 %) und die Werte deutlich im positiven Bereich liegen.

Bei der Gegenüberstellung zweier log-normalverteilter Parameter, wie dies etwa Rohdichte  $\rho_{12}$ , Rollschubmodul  $G_R$  und Rollschubfestigkeit  $f_R$  sind, und der Durchführung einer Regressionsanalyse, ist korrekterweise eine Potenzfunktion zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zu wählen.

Wegen der häufigen Anwendung, unter anderem in einigen in Abschnitt 1.3 und 1.4 vorgestellten Arbeiten, wird zu Vergleichszwecken auch eine einfache lineare Regressionsanalyse durchgeführt.

### 2.5.4 Signifikanztests

In Abschnitt 1.3 werden zahlreiche potentielle Einflussfaktoren auf die Rollschubeigenschaften angeführt. Als Ziel dieser Arbeit sollen Aussagen über festgestellte Änderungen der Eigenschaften bei geänderten Parametern formuliert werden. Dazu ist die Durchführung von Signifikanztests notwendig.

Durch den Zweistichproben t-Test (t-Test) wird überprüft, ob die Mittelwerte zweier Stichproben, als Schätzer von Erwartungswerten von Grundgesamtheiten, derselben Grundgesamtheit entstammen. Jeweils eine Serie wird dabei mit der Referenzserie 1.1 verglichen, zusätzlich werden die Tests mit den Serien gleicher Parameteränderung (Serie  $j.1$  mit Serie  $j.2$ ) durchgeführt. Der Anwendung des t-Tests unterliegt die Annahme normalverteilter Daten.

Als parameterfreier, statistischer Test wird darüber hinaus zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung von zwei Medianen (wiederum Vergleich Serie  $j.i$  mit Serie 1.1 und Vergleich Serie  $j.1$  mit  $j.2$ ) der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test verwendet. Dieser Test basiert auf der Rangstatistik und der Annahme symmetrisch verteilter Daten.

Die zu prüfende Nullhypothese ( $H_0$ ) ist dabei, dass die Lageparameter der beiden betrachteten Serien der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Als Signifikanzniveau wird  $\alpha = 5\%$  definiert. Ist der errechnete  $p$ -Wert (realisierte Signifikanz)  $\leq \alpha$ , so wird die Nullhypothese verworfen.

Die Signifikanztests werden mit Hilfe des Programmes R [50] durchgeführt.

### 3 PRÜFUNGEN UND ERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Prüfungen im Überblick und nach Serien getrennt dargestellt, Besonderheiten und Probleme, die während der Prüfung auftraten diskutiert sowie der Ausschluss von Prüfkörpern aus den Ergebnislisten argumentiert.

#### 3.1 Überblick der ermittelten Rollschubeigenschaften

Anhand von Box-Plots soll eine kurze Gegenüberstellung der Ergebnisse für sämtliche Serien hinsichtlich der festgestellten Rohdichten (Abb. 3-1), Rollschubfestigkeiten (Abb. 3-2) und den Rollschubmoduln, ermittelt nach den formulierten Bedingungen (Abb. 3-3) bzw. gemäß ÖNORM EN 408 [42] (Abb. 3-4), erfolgen. Sämtliche Werte wurden bereits einer Feuchtekorrektur unterzogen (siehe Abschnitt 2.3.1).

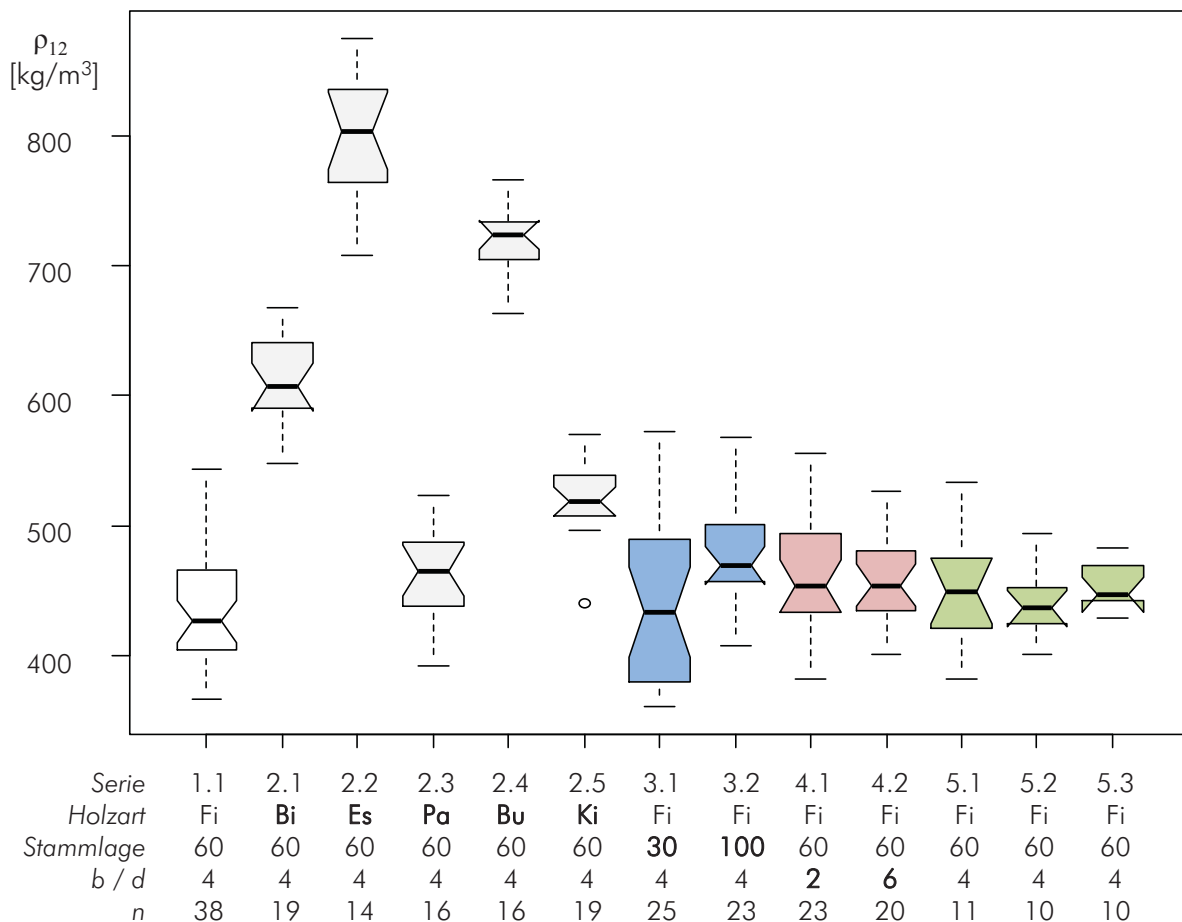


Abb. 3-1: Verteilung der Rohdichte sämtlicher Serien

Von Kollmann [8] angegebene Werte für mittlere Rohdichten (bzw. die Abweichung in dieser Studie davon) sind für Fichte (über alle Serien) 463 kg/m<sup>3</sup> (- 2 %), für Birke 640 kg/m<sup>3</sup> (- 4 %), für Esche 680 kg/m<sup>3</sup> (+ 17 %), für Pappel 384 kg/m<sup>3</sup> (+ 21 %), für Buche 709 kg/m<sup>3</sup> (+ 2 %) und für Kiefer 512 kg/m<sup>3</sup> (+ 2 %). Die Holzarten Esche und Pappel weisen also überdurchschnittliche mittlere Rohdichten auf. Da es sich um eine Zitterpappel handelt, die nicht einer Plantagenwirtschaft ent-



stammt, sind höhere Rohdichten, als beispielsweise bei schnellwachsenden Hybridpflanzen zur thermischen Verwertung, plausibel.

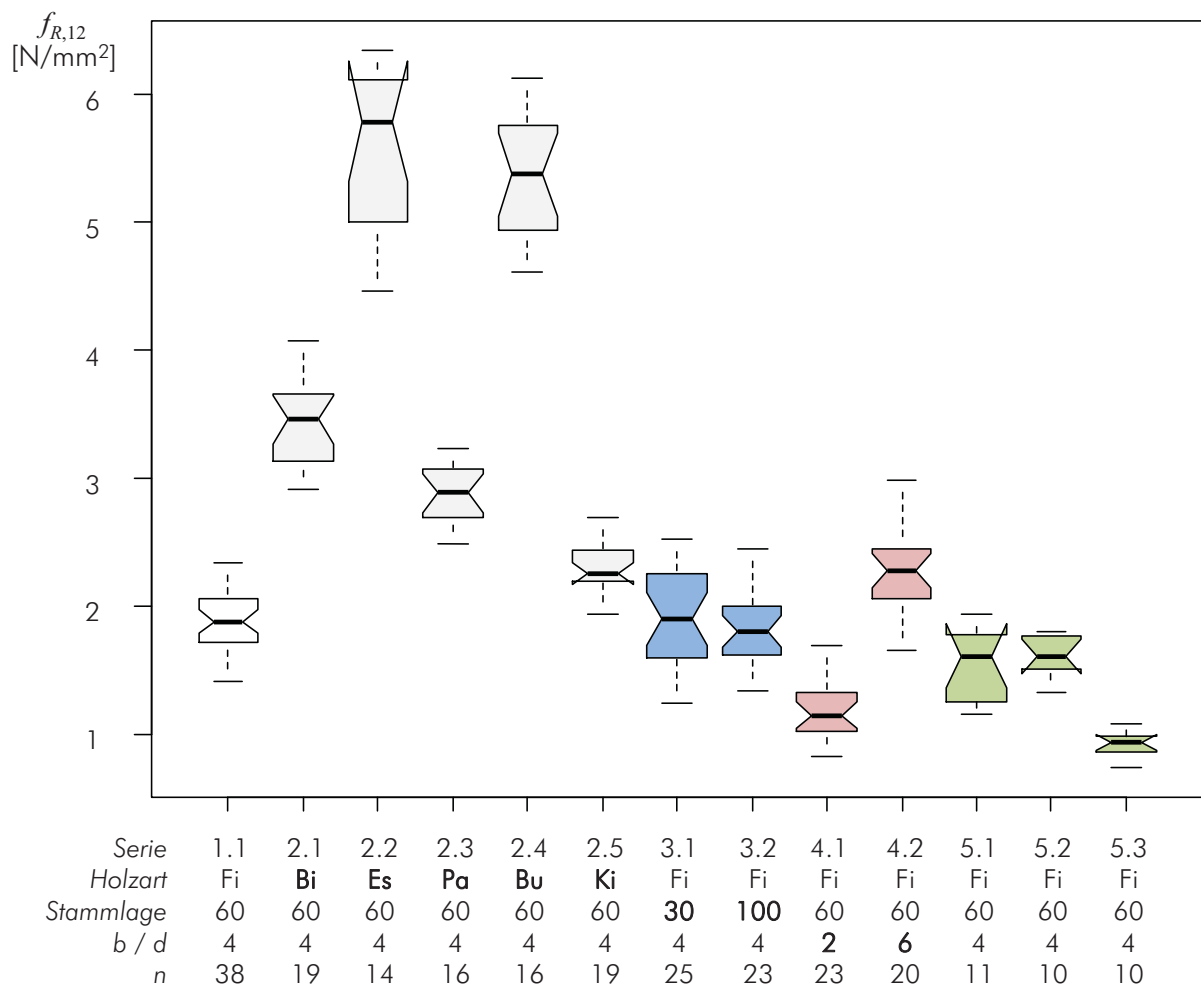


Abb. 3-2: Verteilung der Rollschubfestigkeiten sämtlicher Serien

Die ermittelten Rollschubfestigkeiten variieren stark, vor allem Eschen- und Buchenholz weisen vergleichsweise hohe Werte auf. Eine vertiefende Analyse der Ergebnisse für die untersuchten Holzarten findet sich in Abschnitt 4.1.

Für unterschiedliche Jahrringlagen ist aus Abb. 3-2 keine starke Differenz der Festigkeiten ablesbar, in Abschnitt 4.3 erfolgt eine Diskussion dieses Einflusses.

Wiederum deutlich wird der starke Unterschied der Festigkeiten bei geändertem  $b / d$ -Verhältnis, je breiter das Brett, desto höher die ermittelten Festigkeiten. In Abschnitt 4.4 wird darauf näher eingegangen.

Interessant auch die Festigkeiten für unterschiedliche Serien: Während die Serien 5.1 und 5.2 ähnliche Werte wie das Einzelbrett aufweisen, liegen jene der Serie 5.3 deutlich darunter. In Abschnitt 4.5 wird der Effekt von serieller und paralleler Systemwirkung analysiert.

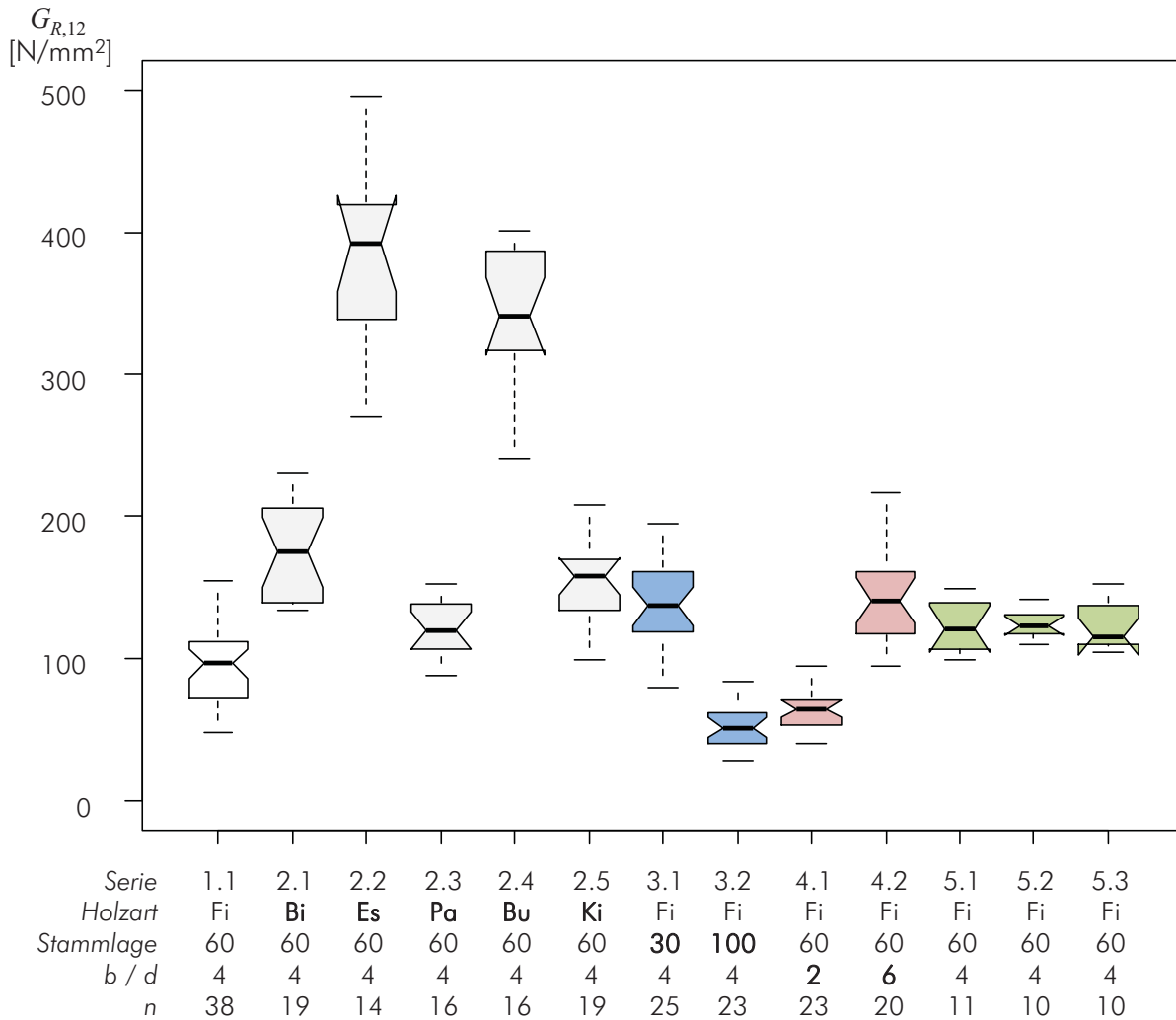


Abb. 3-3: Verteilung der Rollschubmoduln sämtlicher Serien, ermittelt gemäß den formulierten Bedingungen

In Abb. 3-3 wird die Verteilung der Rollschubmoduln aller Serien, ermittelt nach den in Abschnitt 2.4.2 definierten Kriterien, einander gegenübergestellt.

Das unterschiedliche Niveau der Moduln für verschiedene Serien ist augenscheinlich, auf den Einfluss der Holzart, der Jahrringlage, des  $b / d$ -Verhältnisses sowie der Systembildung wird in Abschnitt 4 eingegangen.

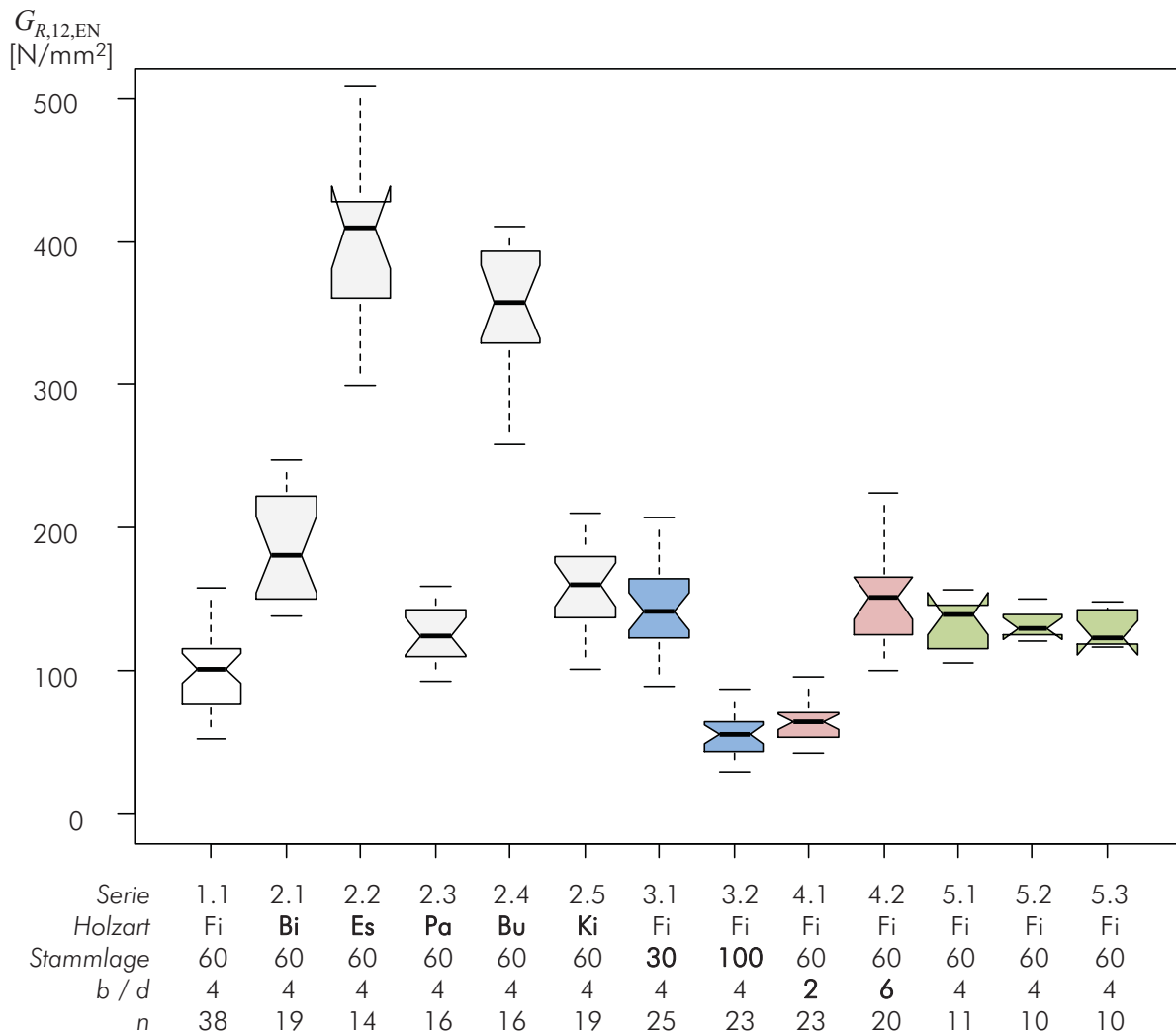


Abb. 3-4: Verteilung der Rollschubmoduln sämtlicher Serien, ermittelt gemäß ÖNORM EN 408 [42]

ÖNORM EN 408 [42] definiert den Bereich zwischen 10 und 40 % der geschätzten Maximallast zur Ermittlung der Schubmoduln. Die Verteilung der nach dieser Vorgabe berechneten Rollschubmoduln ist in Abb. 3-4 dargestellt.

Diese Ergebnisse sind im Vergleich zu Abb. 3-3 durchwegs etwas höher, der Unterschied der Mittelwerte liegt zwischen 2 und 6 %.

## 3.2 Serienspezifische Ergebnisse

### Serie 1.1 – Referenzserie

Die als Referenz dienende Serie 1.1 hatte zu Beginn einen Umfang von 41 Prüfkörpern. Davon wurden drei im weiteren Verlauf ausgeschieden, da ihre Stammlage zu weit von der Sollposition abwich. Weitere zwei wurden als statistische Ausreißer hinsichtlich Rohdichte und Rollschubmodul identifiziert und ausgeschlossen.

Tab. 3-1: Ergebnisse Serie 1.1

		n	min	mean	med	max	cov	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	36	367	439	427	544	11 %	375	366
$r$	[mm]	36	45	58	60	70	11 %	45	47
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	36	1,41	1,88	1,88	2,34	13 %	1,51	1,51
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	36	48	95	97	155	29 %	55	58
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	36	52	100	102	158	27 %	61	63

Bei zahlreichen Prüfungen der Serie 1.1 kam es aufgrund der planmäßigen Querbelastung, bedingt durch den Winkel zwischen Scherfläche und Krafrichtung, zu Rissbildungen im Randbereich deutlich vor Erreichen der Höchstlast. Bei Prüfkörpern, die mit der rechten Seite nach unten eingebaut wurden („n-Orientierung“) traten diese Risse nahe der Auflagerlasche im oberen Bereich auf (Abb. 3-5), bei umgekehrt eingebauten Prüfkörpern bildete sich oftmals ein Riss nahe der Lastlasche im unteren Bereich aus (Abb. 3-6).

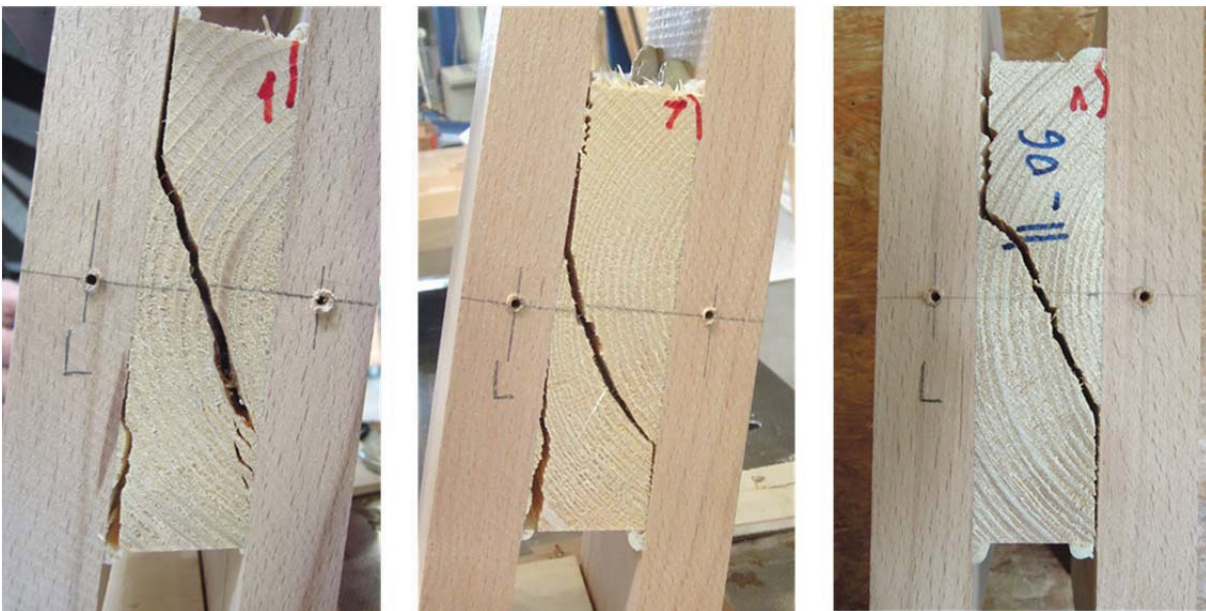


Abb. 3-5: Primäre Rissbildung im oberen Bereich nahe der Auflagerlasche bei „n“-Prüfkörpern

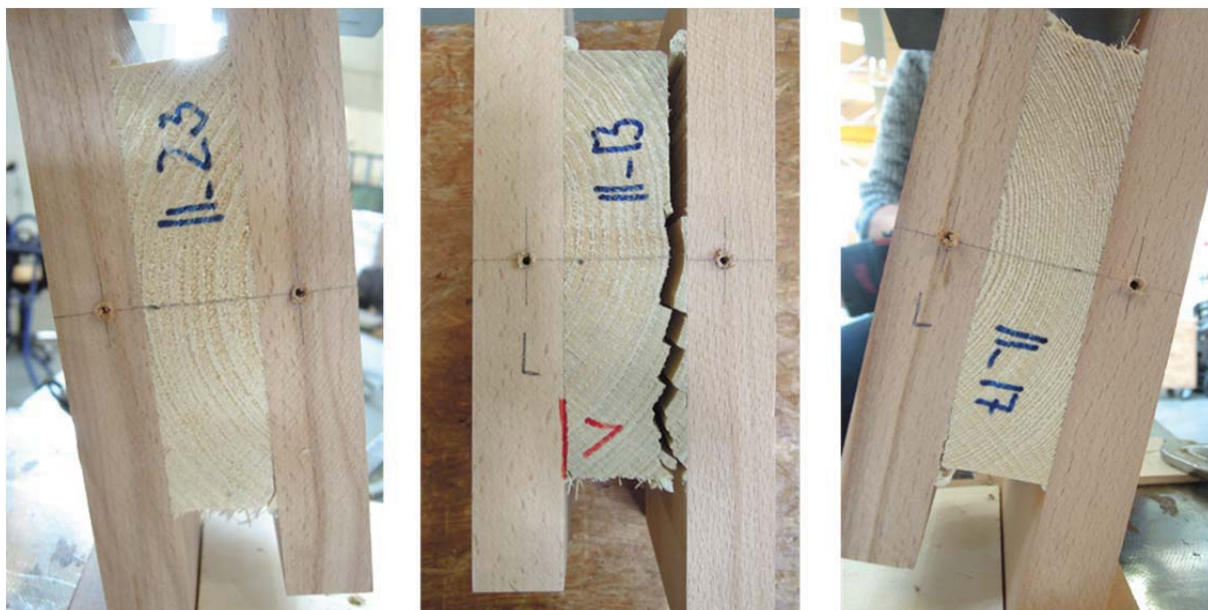


Abb. 3-6: Primäre Rissbildung im oberen Bereich nahe der Auflagerlasche bei „u“-Prüfkörpern

Wie durch die in Abschnitt 1.4.3 vorgestellte Finite Elemente Analyse festgestellt wird, treten in diesen Bereichen lokal stark begrenzt erhöhte Querzugspannungen auf. Dieses Verhalten war bei rund 60 % der Prüfkörper zu beobachten, da die Rissbildung aber stets deutlich nach Erreichen von 50 % der geschätzten Höchstlast und der damit verbundenen Abnahme der Wegabnehmer einsetzte, kann ein Einfluss auf den ermittelten Rollschubmodul weitgehend ausgeschlossen werden.

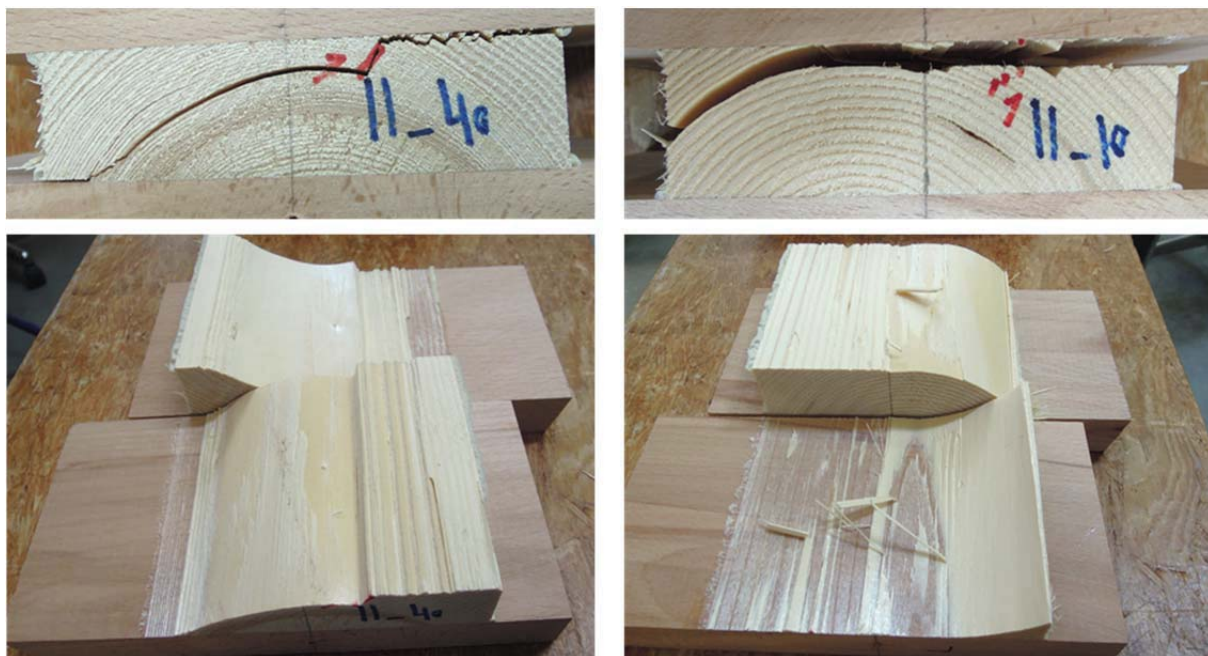


Abb. 3-7: Rollschubversagen entlang weniger Jahrringe

Der Bruchverlauf gestaltete sich durchwegs unabhängig vom ersten Riss im äußeren Laschenbereich. Von der rechten Seite ausgehend bildete sich bei etwa der Hälfte der Prüfungen ein Riss, der sich entlang eines Jahrrings oder sägezahnförmig über einige Jahrringe hinweg bis zur gegenüber-

liegenden Lasche fortpflanzte, um dann entlang dieser Lasche zum kompletten Versagen des Prüfkörpers zu führen (Abb. 3-7).

Die andere Hälfte der Prüfkörper versagte durch einen Z-förmigen Bruch, der erst entlang der Auflagerlasche, dann unter einem Winkel von rd.  $45^\circ$  quer durch den Prüfkörper und dann weiter entlang der Lastlasche verlief (Abb. 3-8).

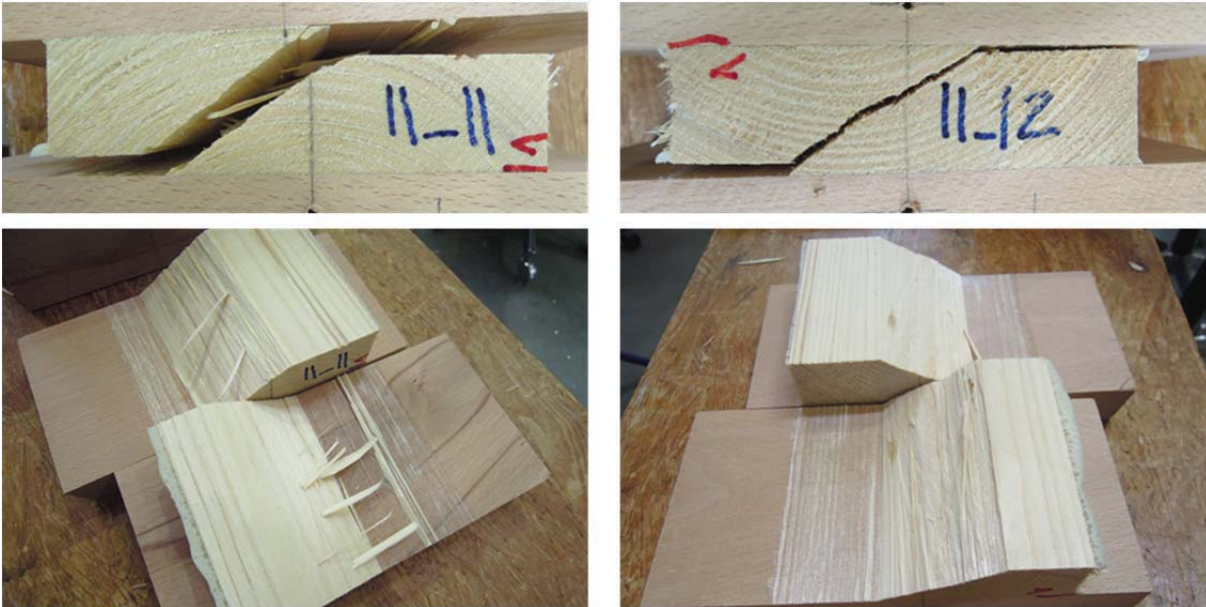


Abb. 3-8: Bruch unter  $45^\circ$

Die Verklebung der Prüfhölzer mit den Laschen erweist sich in dieser Serie als ausreichend Tragfähig und geeignet; bei sämtlichen Prüfkörpern verläuft der Bruch durch den Prüfling hindurch. Klebeflächen, an denen entlang der zum Versagen führende Riss verläuft, weisen ausreichende Holzfaserrückstände auf (Abb. 3-9).



Abb. 3-9: Klebefläche nach Versagen mit ausreichenden Faserrückständen

## Serie 1.2

Da Serie 1.2 zur Untersuchung der Rollschubeigenschaften entlang des Brettes konzipiert wurde und Holzart, Jahrringlage und  $b/d$ -Verhältnis ident mit jener der Referenzserie 1.1 sind, werden auch sehr ähnliche Rissbilder und Versagensformen beobachtet.

Aus zehn Brettern wurden jeweils zehn Prüfkörper hergestellt und mit einer Laufnummer versehen. Die Streuung der Rohdichte innerhalb des Brettes liegt zwischen  $CoV = 1\%$  und  $4\%$  und damit deutlich unter jener der Referenzserie (Tab. 3-2). Die mittlere Rohdichte aller Bretter der Serie 1.2 (global) unterscheidet sich mit  $442\text{ kg/m}^3$  um weniger als  $1\%$  von jener der Serie 1.1.

Tab. 3-2: Rohdichte der Serie 1.2 vs. Referenzserie 1.1

Brett	n	min	mean	median	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
S 1.1	36	367	439	427	544	11 %	375	366
52	10	534	550	550	569	2 %	535	533
55	10	419	439	440	466	4 %	421	414
63	10	361	379	377	408	4 %	362	356
65	10	436	454	454	473	3 %	439	434
76	10	512	534	535	546	2 %	517	515
89	10	452	468	464	498	3 %	452	445
98	10	465	475	475	487	1 %	465	464
117	10	442	455	451	471	2 %	444	437
186	10	444	465	471	494	4 %	445	439
189	10	357	383	386	394	3 %	364	364

Da in einigen wenigen Prüfkörpern der Serie 1.2 nach Versuchsdurchführung Harzgallen in der Bruchfläche festgestellt wurden, konnte nicht für alle Bretter der volle Umfang von zehn Proben für die Auswertung der Rollschubfestigkeit herangezogen werden.

Vor allem die ähnlich starke Streuung der Festigkeiten innerhalb der Bretter wie in Serie 1.1 mit  $CoV$  zwischen  $6\%$  und  $15\%$  (Serie 1.1:  $13\%$ ) ist auffällig, in Abschnitt 4.6 wird näher darauf eingegangen.

Tab. 3-3: Rollschubfestigkeiten der Serie 1.2 vs. Referenzserie 1.1

Brett	n	min	mean	median	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
S 1.1	36	1,41	1,88	1,88	2,34	13 %	1,51	1,51
52	9	1,94	2,37	2,35	2,82	12 %	1,98	1,94
55	9	1,79	1,90	1,86	2,15	7 %	1,79	1,70
63	8	1,62	1,77	1,82	1,90	6 %	1,63	1,60
65	10	1,43	1,69	1,64	2,11	13 %	1,47	1,36
76	8	1,67	2,04	1,99	2,58	15 %	1,72	1,57
89	9	2,15	2,38	2,32	2,69	9 %	2,16	2,04
98	10	1,53	1,87	1,86	2,18	13 %	1,57	1,50
117	10	1,44	1,64	1,65	1,83	9 %	1,45	1,42
186	9	1,61	1,81	1,82	1,96	7 %	1,61	1,61
189	10	1,31	1,57	1,55	1,71	8 %	1,37	1,37



Das sehr unterschiedliche Niveau der Rollschubmoduln in der Referenzserie, hier wurde ein CoV von 29 % festgestellt, wird innerhalb einzelner Bretter nicht beobachtet: Mit CoV zwischen 6 und 15 % in Serie 1.2 variieren die Moduln wesentlich weniger stark.

Tab. 3-4: Rollschubmoduln der Serie 1.2 vs. Referenzserie 1.1

Brett	n	min	mean	median	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
S 1.1	36	48	95	97	155	29 %	55	58
52	10	152	186	184	234	15 %	156	145
55	10	121	134	138	144	6 %	121	121
63	10	71	91	91	108	12 %	75	74
65	9	100	109	105	125	7 %	101	96
76	10	121	142	140	174	12 %	121	115
89	10	97	118	121	132	9 %	100	102
98	10	141	154	153	174	7 %	142	138
117	9	61	72	67	84	13 %	61	57
186	10	107	133	137	154	10 %	112	111
189	9	77	99	100	112	12 %	82	81

## Serie 2.1 – Birke

Von den 22 erstellten Prüfkörpern wurden drei wegen unpassender Jahrringlagen ausgeschlossen.

Tab. 3-5: Ergebnisse der Serie 2.1

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	19	548	612	607	668	6 %	566	557
$r$	[mm]	19	40	57	60	80	23 %	40	38
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	2,92	3,45	3,46	4,07	10 %	2,95	2,91
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	18	134	179	175	231	20 %	135	128
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	18	138	188	181	247	19 %	141	135

Bei den verbleibenden 19 Prüfkörpern waren im Wesentlichen zwei unterschiedliche Bruchformen zu beobachten: Zum einen verlief der Bruch relativ geradlinig entlang einer der beiden Laschen, und zwar immer entlang jener, der die rechte Seite zugewandt war (Abb. 3-10). Dies war bei 13 Prüfkörpern der Fall. Bei den restlichen sechs Prüfkörpern verlief der Bruch Z-förmig erst entlang der Lastlasche, durch den Prüfkörper unter einem Winkel von rund 45° und wieder entlang der Auflagerlasche (Abb. 3-11).

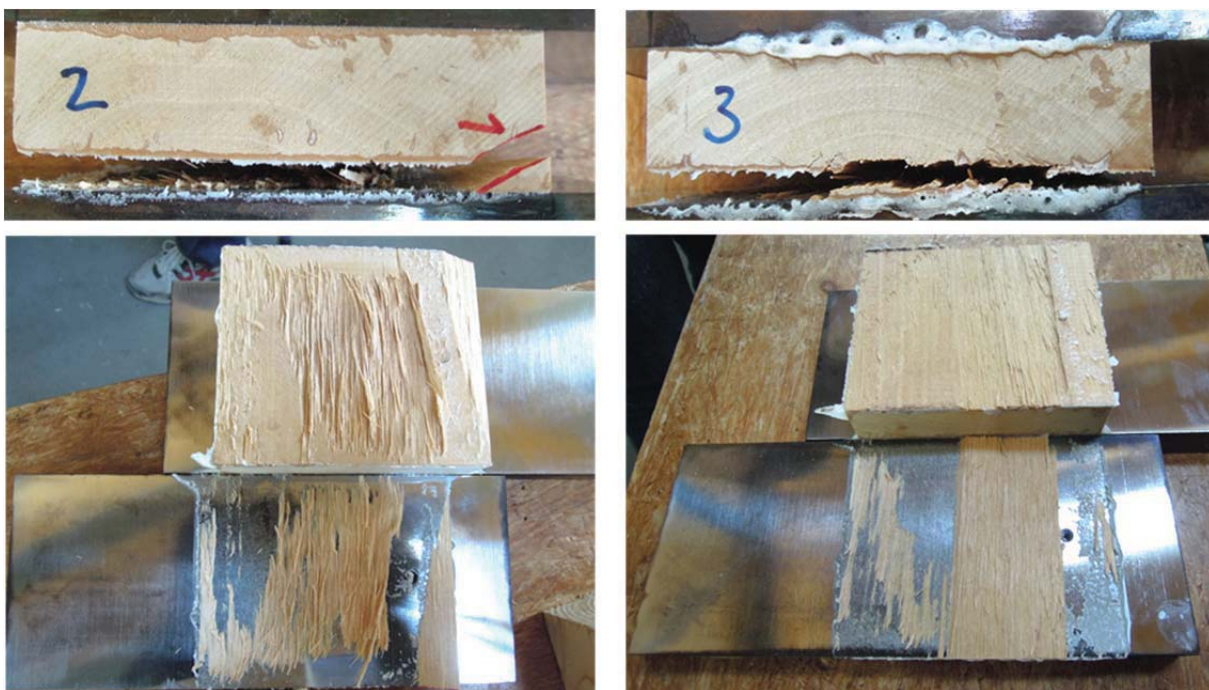


Abb. 3-10: Bruch entlang der Lasche auf der rechten Seite bei Birkenprüfkörpern

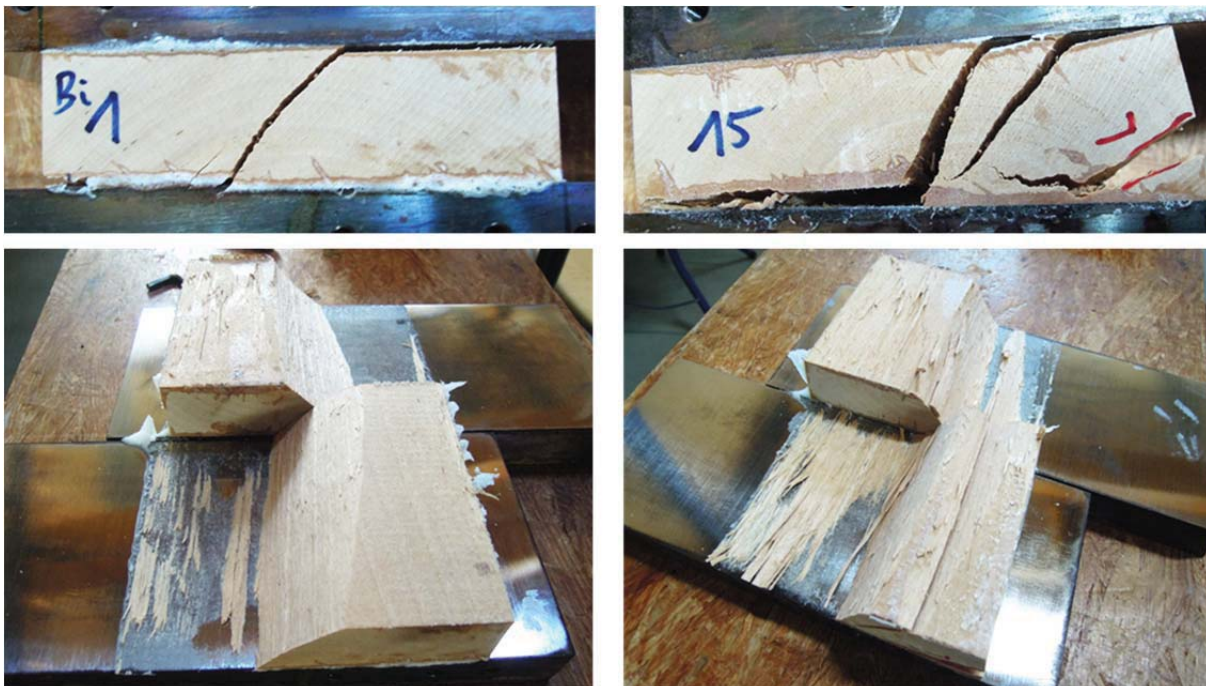


Abb. 3-11: Bruch mit Z-förmigem Verlauf unter 45° bei Birkenprüfkörpern

Wie bereits bei Versuchen der Serie 1.1 und 1.2 beobachtet, traten auch bei Birkenprüfkörpern Risse im oberen bzw. unteren Laschenbereich auf. Bei elf Prüfkörpern konnte dies beobachtet werden, wobei auch hier stets davon unabhängige Versagen eintraten.

Die Verklebung der Prüfkörper mit den Stahllaschen kann als grenzwertig aber noch ausreichend angesehen werden. Bei sechs von 19 Prüfkörpern (Abb. 3-12) waren nach Durchführung der Prüfungen weniger als 50 % der Klebefläche mit Holzfasern bedeckt.

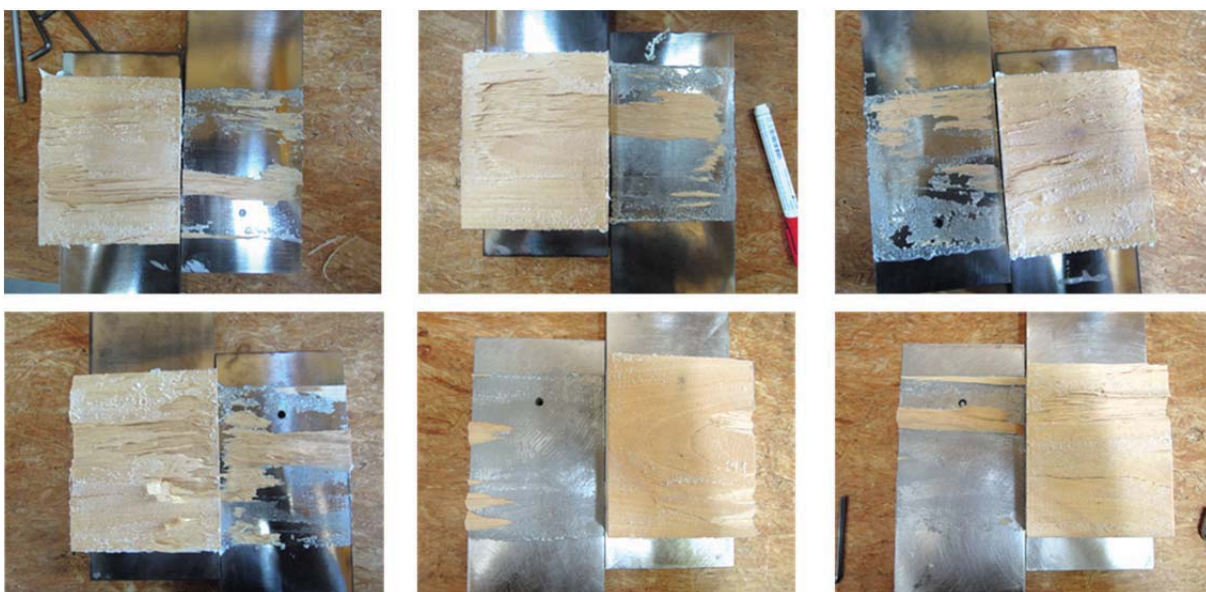


Abb. 3-12: Birkenprüfkörper mit grenzwertiger Verklebung

## Serie 2.2 – Esche

Lediglich 14 der ursprünglich 22 Prüfkörper konnten zur Auswertung herangezogen werden. Dies ist dem Umstand zu schulden, dass bereits im Haus vorhandenes Material zur Anwendung kam und die engen Grenzen hinsichtlich der Jahrringlage letztendlich zum Ausschluss von acht Prüfkörpern führte.

Tab. 3-6: Ergebnisse der Serie 2.2

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	14	708	798	804	875	6 %	725	720
$r$	[mm]	14	40	60	60	80	18 %	43	43
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	14	4,46	5,57	5,79	6,35	12 %	4,47	4,54
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	14	270	381	392	495	16 %	288	290
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	14	299	401	410	508	14 %	323	316

Mit Ausnahme von zwei Prüfkörpern, deren Bruch entlang der der rechten Seite zugewandten Lasche verlief, traten in dieser Serie ausschließlich Rollschubbrüche entlang eines einzigen Jahrringes auf (Abb. 3-13).



Abb. 3-13: Versagen von Esche-Prüfkörper entlang eines Jahrringes

Lediglich bei einem nicht zur Auswertung herangezogenen Prüfkörper konnte innerhalb dieser Serie ein Aufreißen im äußeren Bereich nahe der Laschen beobachtet werden.

Aufgrund der beobachteten Versagensformen kann die Verklebung als geeignet und ausreichend tragfähig bezeichnet werden.

### Serie 2.3 – Pappel

Auch hier wurde durch das Eliminieren unpassender Jahringlagen die Anzahl der Prüfkörper wesentlich reduziert, schlussendlich gelangten 16 von ursprünglich 24 Prüfkörpern zur Auswertung.

Tab. 3-7: Ergebnisse der Serie 2.3

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,IN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	16	393	463	466	523	7 %	416	409
$r$	[mm]	16	40	57	58	75	20 %	40	40
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	16	2,49	2,88	2,89	3,23	8 %	2,53	2,51
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	15	88	122	120	153	16 %	96	93
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	15	93	127	124	159	15 %	101	98

Davon versagten vier durch geradlinige Brüche entlang einer der beiden Laschen (Abb. 3-14). Im Gegensatz zu den bisherigen Serien verliefen diese allerdings nicht ausschließlich entlang der der rechten Seite zugewandten Lasche. Bei sechs Prüfkörpern traten Z-förmige Brüche (Lastlasche – 45° durch Prüfkörper – Auflagerlasche) auf (Abb. 3-15), die restlichen Prüfkörper versagten durch Rollschubbrüche entlang einem oder mehrerer Jahringe mit teilweise größeren Sprüngen zwischen diesen (Abb. 3-16).



Abb. 3-14: Bruch von Pappelprüfkörpern entlang einer Lasche

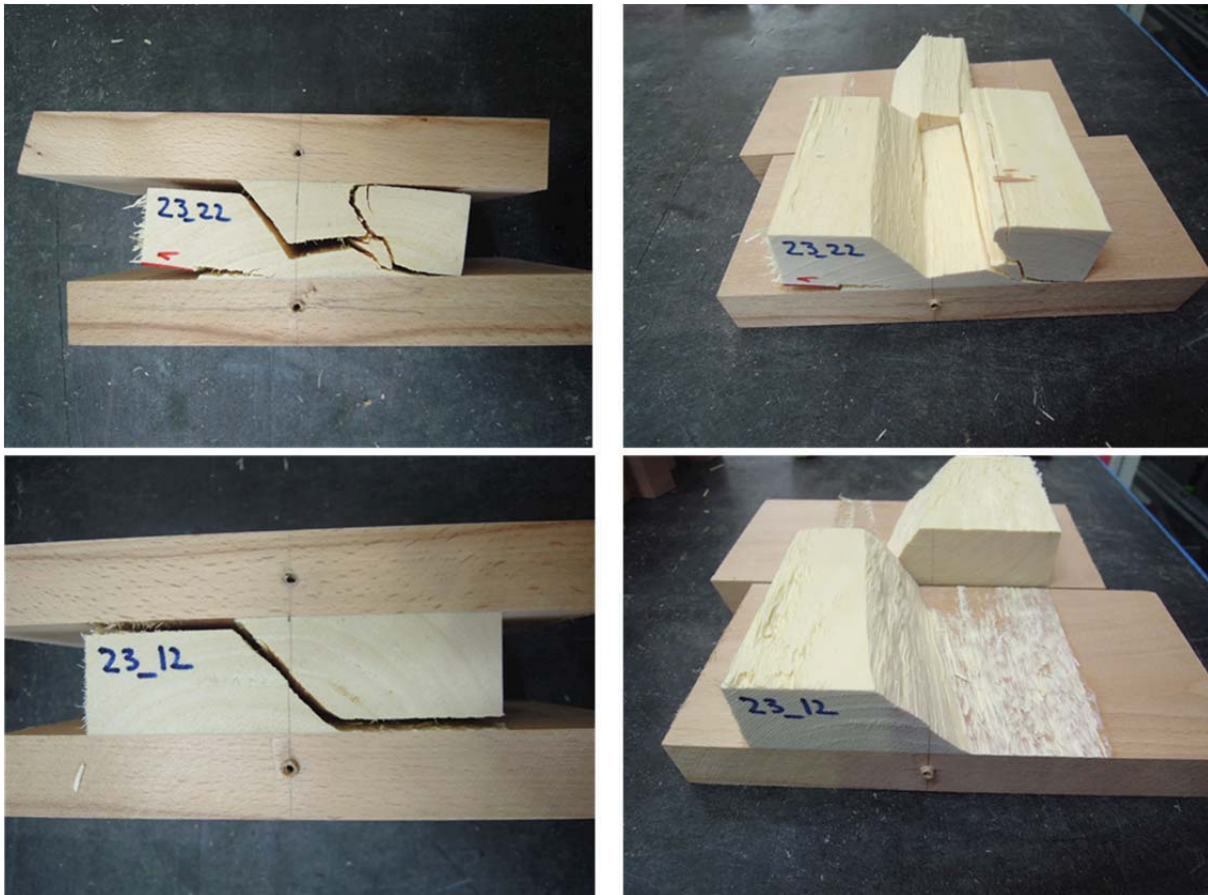


Abb. 3-15: Bruch mit Z-Verlauf, 45° durch Pappelprüfkörper

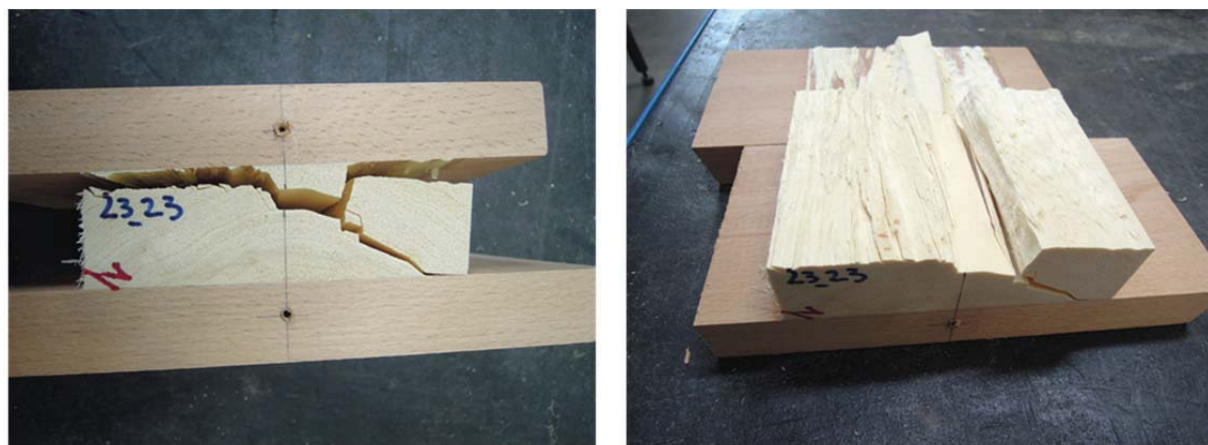


Abb. 3-16: Rollschubbruch entlang weniger Jahrringe bei Pappelprüfkörper

In dieser Serie war die Rissbildung nahe der Auflagerlasche unten bzw. nahe der Lastlasche oben am häufigsten zu beobachten. In 13 von 16 Fällen traten lokal stark begrenzte Risse in diesen Bereichen auf; wiederum konnte aber kein Zusammenhang zum letztendlichen Versagensrissbild festgestellt werden. Die Verklebung scheint für diese Serie ausreichende Tragfähigkeit zu besitzen; bei keinem der Prüfkörper konnten größere faserfreie Bereiche festgestellt werden.

### Serie 2.4 – Buche

Wie auch bei der Esche wurde das Buchenholz für diese Serie nicht mit den Serienvorgaben hinsichtlich Jahrringlage etc. geordert, sondern bereits vorhandenes Material verwendet. So konnten nur 16 von ursprünglich 22 Prüfkörpern mit den Anforderungen entsprechenden Eigenschaften hergestellt, geprüft und ausgewertet werden.

Tab. 3-8: Ergebnisse der Serie 2.4

		n	min	mean	med	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	16	663	720	724	766	4 %	671	676
$r$	[mm]	16	40	65	70	85	23 %	44	43
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	16	4,61	5,37	5,38	6,13	9 %	4,67	4,64
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	16	241	344	341	401	12 %	284	279
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	16	258	357	358	410	12 %	299	293

Die dominierende Versagensform war in dieser Serie Rollschubbruch entlang einzelner Jahrringe begleitet mit davon ausgehenden Rissen in radialer Richtung (Abb. 3-17). Zehn der 16 Prüfkörper wiesen dieses Bruchbild auf. Bei drei Prüfkörpern trat ein Z-förmiger Bruch (Lastlasche – 45° durch Prüfkörper – Auflagerlasche) auf (Abb. 3-18), die restlichen drei Prüfkörper versagten entlang der der rechten Seite zugewandten Lasche (Abb. 3-19).



Abb. 3-17: Rollschubbruch entlang Jahrring bei Buchenprüfkörper

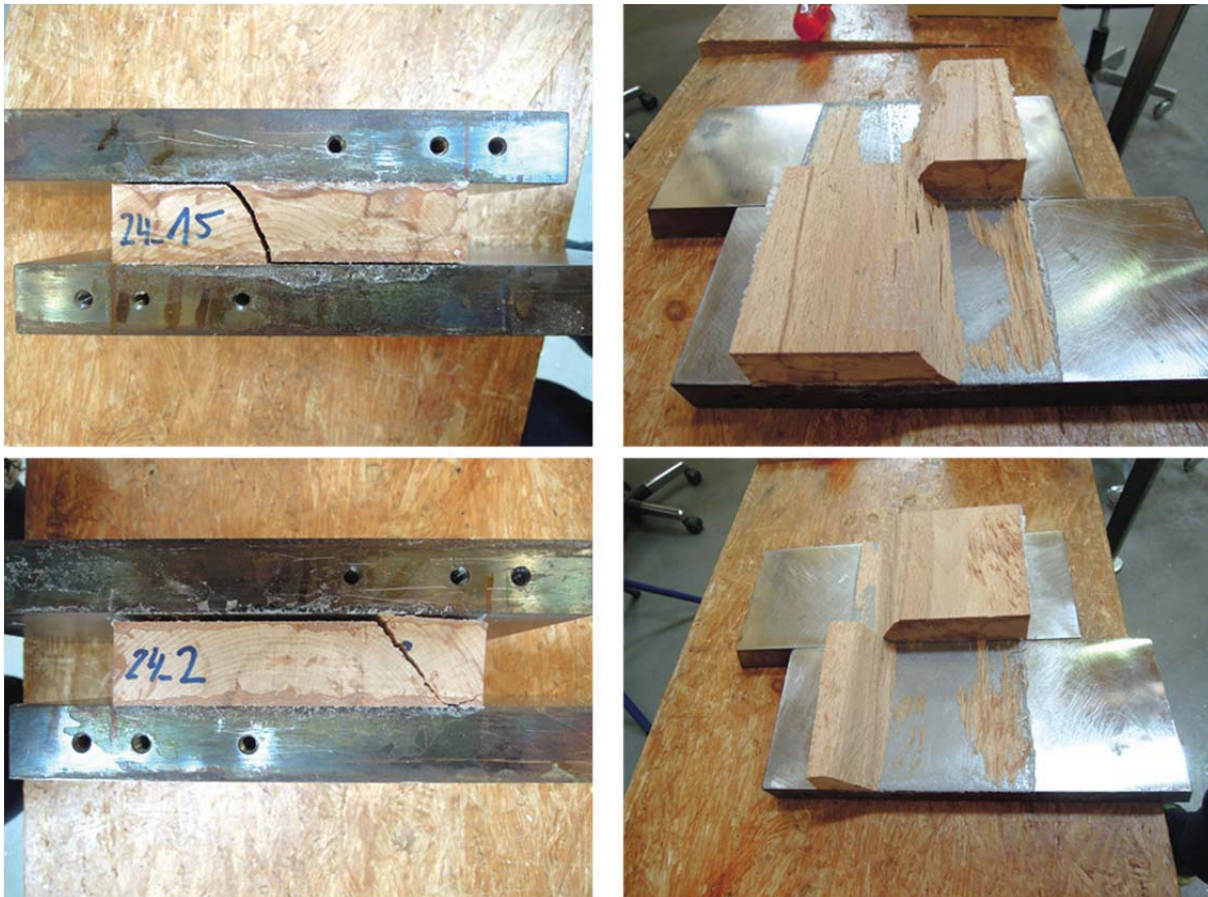


Abb. 3-18: Bruch mit Z-Verlauf bei Buchenprüfkörper

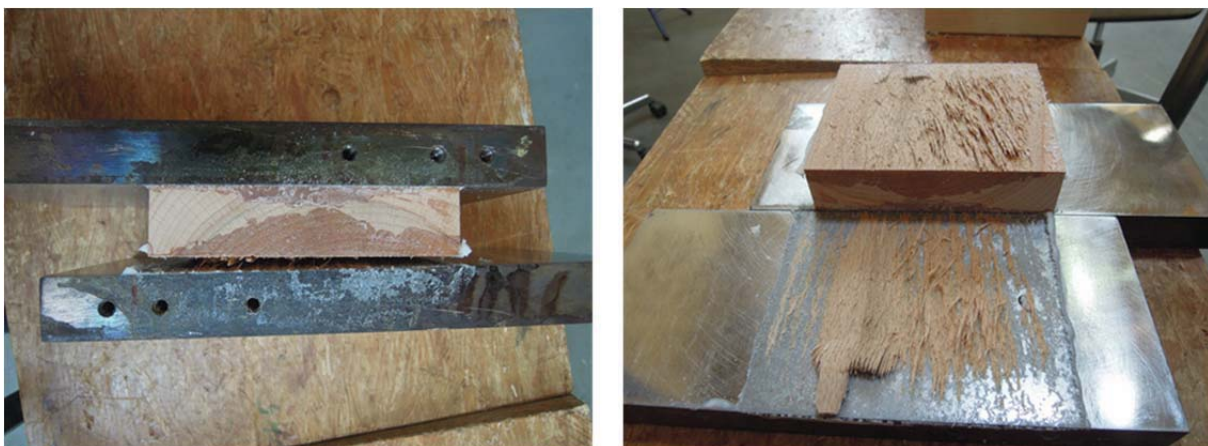


Abb. 3-19: Bruch entlang einer Lasche bei Buchenprüfkörper

Die Verklebung der zur Auswertung gelangten Prüfkörper war ausreichend tragfähig. Darauf weisen die Bruchbilder sowie die Tatsache, dass lediglich bei einer der drei entlang der Laschen versagten Prüfkörper weniger als 50 % der Klebefläche mit Holzfasern bedeckt waren, hin.

Nur bei einem Prüfkörper wurde ein Riss nahe der Lasche im Randbereich beobachtet.



### Serie 2.5 – Kiefer

Vier Prüfkörper mussten wegen zu geringem Radius (Stammlage) ausgeschlossen werden, somit verblieben 19 für die Auswertung.

Tab. 3-9: Ergebnisse der Serie 2.5

		n	min	mean	med	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	19	441	521	519	570	5 %	491	476
$r$	[mm]	19	40	59	60	80	20 %	40	42
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	1,94	2,29	2,26	2,69	10 %	1,96	1,95
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	99	154	158	208	20 %	113	110
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	101	158	160	210	19 %	114	114

Dominierendes Bruchverhalten stellte Rollschubversagen entlang der Jahrringe dar. Bei sämtlichen Prüfkörpern verlief der zum Bruch führende Riss zumindest teilweise entlang eines Jahrringes.

Bei neun der Prüfkörpern gestaltete sich das Bruchbild wie folgt: Auf der rechten Seite beginnend verläuft der Riss zunächst entlang eines Jahrringes, um sich dann sägezahnförmig im Winkel von rd. 45° in Richtung der gegenüberliegenden Lasche fortzupflanzen (Abb. 3-20).



Abb. 3-20: Bruch mit Z-Verlauf, sägezahnförmig entlang von Jahrringen bei Kiefernprüfkörper

In den restlichen Fällen verläuft der Riss weitestgehend entlang einiger weniger Jahrringe bzw. entlang der die Jahrringe begrenzenden Lasche (Abb. 3-21).

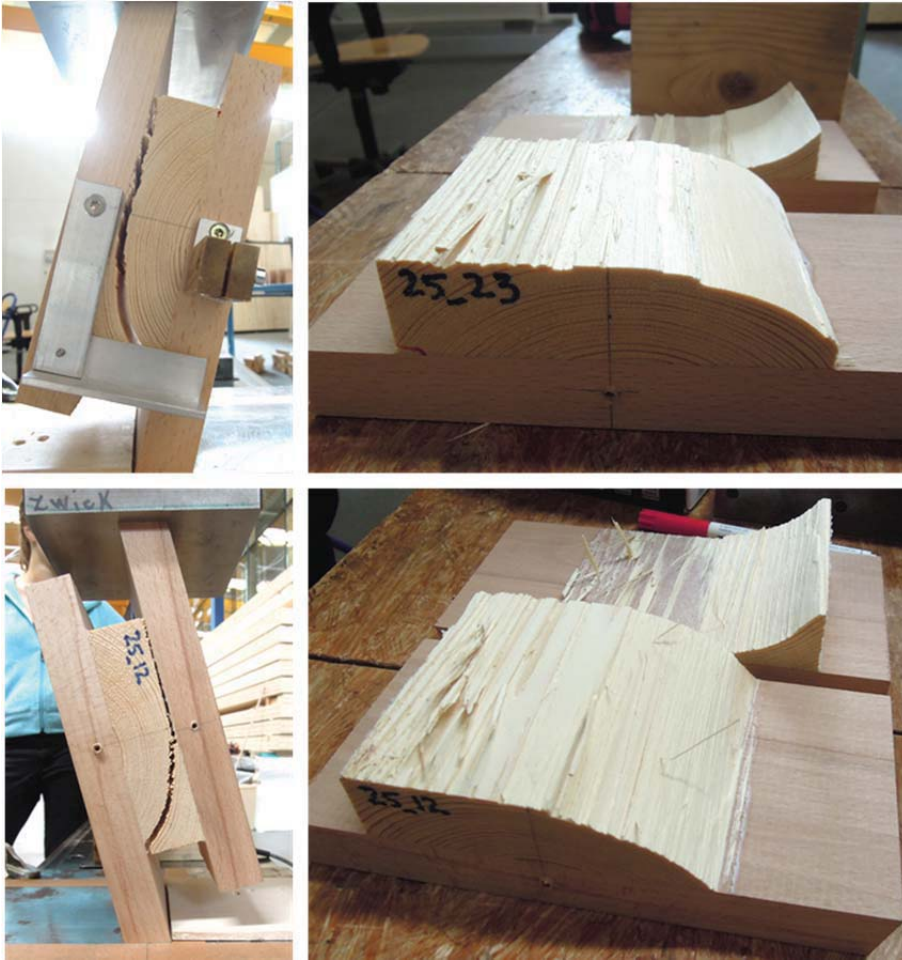


Abb. 3-21: Rollschubbruch entlang weniger Jahrringe bei Kiefernprüfkörper

Bei nahezu allen Prüfkörpern war deutlich vor dem Versagenseintritt, wie auch schon bei anderen Serien, eine Rissbildung im oberen Bereich nahe der Auflagerlasche bzw. im unteren Bereich nahe der Lastlasche zu beobachten.

Serie 3.1 – Schnittlage  $r = 30$  mm

Tab. 3-10: Ergebnisse der Serie 3.1

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	25	361	442	434	573	14 %	363	346
$r$	[mm]	25	20	31	30	40	18 %	25	23
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	25	1,24	1,88	1,90	2,53	22 %	1,28	1,30
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	24	80	139	137	195	20 %	98	98
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	24	89	143	142	207	19 %	106	103

Das Gros der Prüfkörper dieser Serie wies eine Kombination aus Rollschubversagen entlang der Jahrringe und Bruch unter einem Winkel von 45° auf. Dabei verlief der Riss meist für mehrere Zentimeter entlang eines inneren Jahrrings nahe der Lasche auf der rechten Seite, um sich dann sägezahnförmig Richtung gegenüberliegender Lasche fortzupflanzen (Abb. 3-22). Dabei war zu beobachten, dass je weiter außen der bruchinduzierende Riss entlang eines Jahrrings begann, die Tendenz zur Ausbildung eines weiteren Bruchverlaufes unter 45° Winkel stark sank und der Prüfkörper alleinig entlang eines Jahrrings bzw. der begrenzenden Lasche versagte (Abb. 3-23).

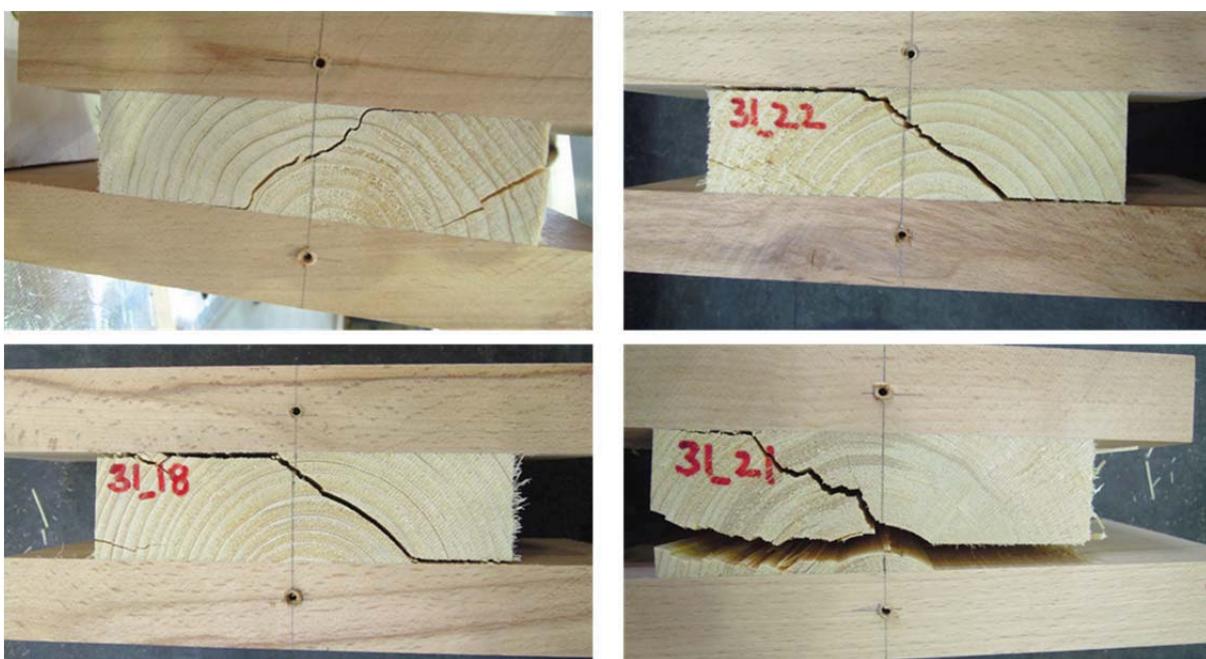


Abb. 3-22: Kombiniertes Versagen entlang der Jahrringe und unter 45°

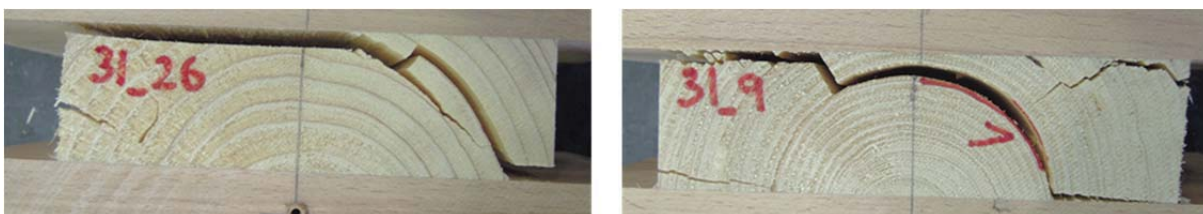


Abb. 3-23: Bruch entlang äußerer Jahrringe bzw. der diese begrenzenden Lasche

### Serie 3.2 – Schnittlage $r = 100$ mm

Mit Ausnahme von zwei Prüfkörpern traten bei sämtlichen Versuchen Rollschubversagen entlang eines oder weniger Jahrringe auf.

Tab. 3-11: Ergebnisse der Serie 3.2

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	23	408	480	470	568	9 %	417	415
$r$	[mm]	23	90	98	95	110	7 %	90	88
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	23	1,34	1,84	1,80	2,45	16 %	1,42	1,40
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	22	28	53	52	84	27 %	32	33
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	22	30	56	56	87	26 %	36	35

Zumeist waren Jahrringe der äußeren Bereiche mit größeren Radien betroffen; ein typisches Versagensbild weist der in Abb. 3-24 dargestellte Prüfkörper 32-16 auf. Bemerkenswert war zudem die äußerst glatte Bruchfläche, entlang derer die Prüfkörper versagten (Abb. 3-25).



Abb. 3-24: Häufige Versagensform in Serie 3.2



Abb. 3-25: Glatte Bruchfläche entlang der Jahrringe im Übergangsbereich von Früh- und Spätholz in Serie 3.2

Serie 4.1 –  $b / d = 2$ 

Wegen der geringen Brettbreite wurden in dieser Serie reibungsarme Kunststoffquader zur Stabilisierung eingesetzt (Abb. 3-26).

Tab. 3-12: Ergebnisse der Serie 4.1

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	23	382	459	454	556	11 %	393	384
$r$	[mm]	23	45	59	60	80	15 %	46	45
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	23	0,83	1,16	1,15	1,70	20 %	0,83	0,82
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	22	41	65	65	95	21 %	48	45
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	22	43	65	65	96	21 %	49	45

Rund zwei Drittel der Prüfkörper dieser Serie versagten durch Rollschubbrüche entlang von Jahrringen meist größeren Radius (Abb. 3-27). Bei den restlichen Prüfkörpern trat ein Versagen entlang einer der beiden Laschen auf, wobei der Bruch hier niemals glatt war, sondern durch häufige Sprünge über mehrere Jahrringe in den Prüfkörper hinein ein sägezahnförmiger Verlauf des Rissbildes entstand.

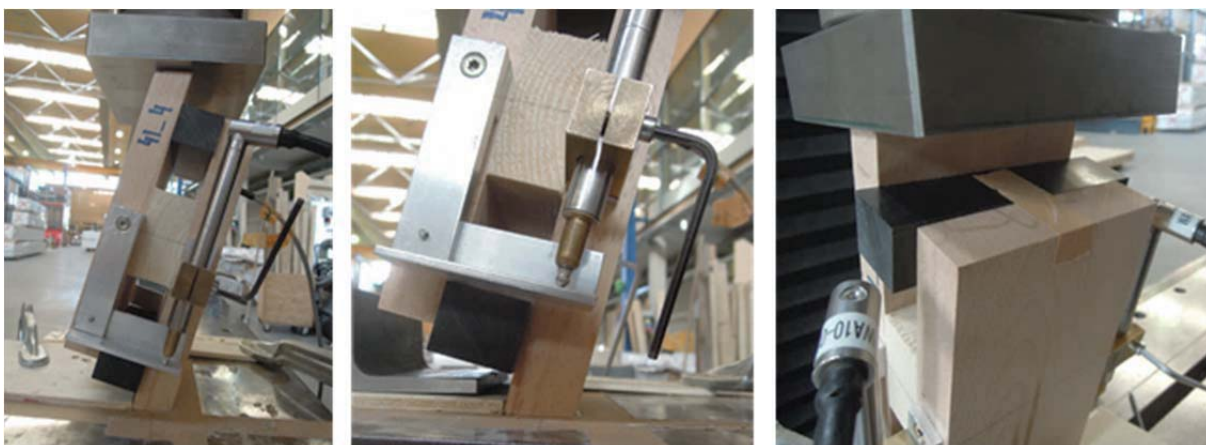


Abb. 3-26: Kunststoffquader zur Stabilisierung in Serie 4.1

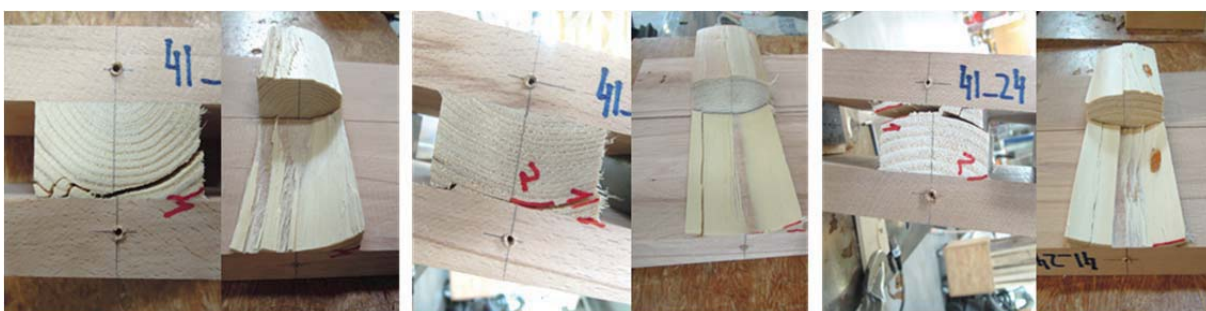


Abb. 3-27: Versagen auf Rollschub, Primärrisse (1,2) in Laschennähe oben und unten

Wie schon in anderen Serien, traten auch in dieser vermehrt Risse im oberen und unteren Bereich nahe der Lasche auf. Bis auf wenige Ausnahmen verlief der Bruch allerdings nicht durch diese Primärrisse.

### Serie 4.2 – $b / d = 6$

Etwa zwei Drittel der Prüfkörper dieser Serie versagten durch Rollschubbruch entlang der Jahrringe in Kombination mit einem Schubbruch unter  $45^\circ$  (Abb. 3-28). Das restliche Drittel wies reine Rollschubbrüche entlang eines Jahrringes auf (Abb. 3-29).

Tab. 3-13: Ergebnisse der Serie 4.2

		n	min	mean	med	max	CoV	$q_{05}$	$q_{05,LN}$
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	20	401	459	455	527	8 %	412	404
$r$	[mm]	20	45	60	60	80	15 %	45	46
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	20	1,66	2,28	2,28	2,99	14 %	1,91	1,80
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	95	141	141	217	22 %	96	96
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19	100	148	151	224	21 %	106	103

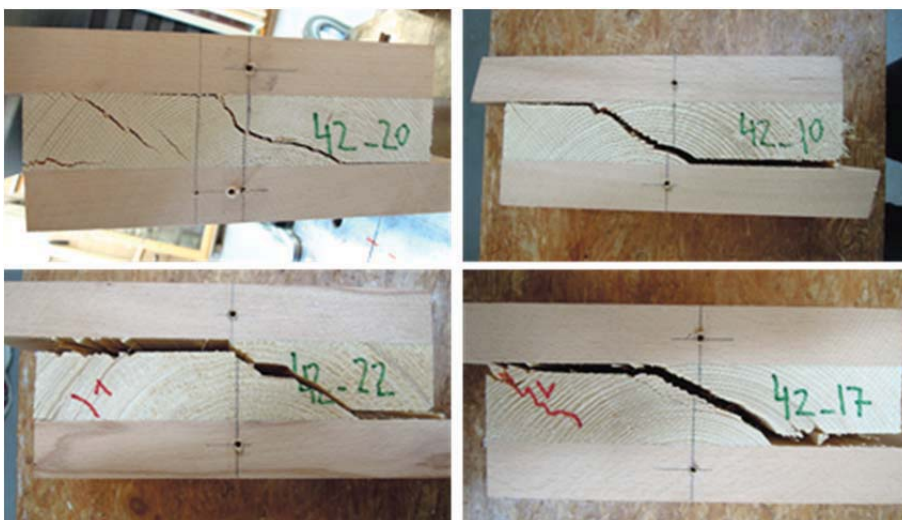


Abb. 3-28: Kombiniertes Versagen entlang eines Jahrringes und unter  $45^\circ$  in Serie 4.2

Auch in dieser Serie traten bei zahlreichen Prüfkörpern Risse nahe der Auflagerlasche oben bzw. nahe der Lastlasche unten auf, immer auf der jeweils rechten Seite.



Abb. 3-29: Reines Rollschubversagen entlang der Jahrringe in Serie 4.2

## Serie 5.1 – 2 x 1

Wegen der geringen Prüfkörperanzahl je Serie von zehn Stück wurden sämtliche Prüfkörper mit der rechten Seite nach unten („n-Orientierung“) eingebaut. Ein eventuell vorhandener systembedingter Unterschied durch die Einbauorientierung konnte durch die Beobachtungen in den Einzelversuchen nicht festgestellt werden.

Tab. 3-14: Ergebnisse der Serie 5.1

		n	min	mean	med	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	11	383	450	450	533	9 %	393	384
$r$	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	11	1,16	1,54	1,61	1,94	20 %	1,17	1,09
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	11	99	124	121	149	15 %	102	96
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	11	106	132	140	157	14 %	109	105

Aufgrund der parallelen Schaltung – d.h. bei ungleicher Steifigkeit der Bretter, die auch durch Risse bedingt sein kann, besteht die Möglichkeit der Lastumlagerung vom weicheren auf das steifere Brett – konnte in dieser Serie erstmals eine ausgeprägte Rissbildung vor Versagenseintritt beobachtet werden (Abb. 3-30). Zahlreiche Risse, hauptsächlich in radialer Richtung, aber auch entlang der Jahrringe, traten während den Prüfungen auf. Der Bruchverlauf gestaltete sich oftmals unabhängig von diesen (Abb. 3-31, mit markierten Primärrissen).



Abb. 3-30: Aufbau, Rissbildung und Versagen eines Prüfkörpers der Serie 5.1

Mehrheitlich trat das Versagen durch Rollschubbrüche in beiden Brettern ein, wobei sich der Riss „kamelbuckelartig“ fortpflanzte: Meist für einige Zentimeter entlang der der rechten Seite (= Richtung Kern orientierte Seite) zugewandten Lasche, dann entlang eines Jahrrings durch den ersten Prüfkörper, wieder entlang derselben Lasche, entlang eines Jahrrings durch den zweiten Prüfkörper und gegebenenfalls entlang der gegenüberliegenden Lasche bis zum Ende der Probe (Abb. 3-31).

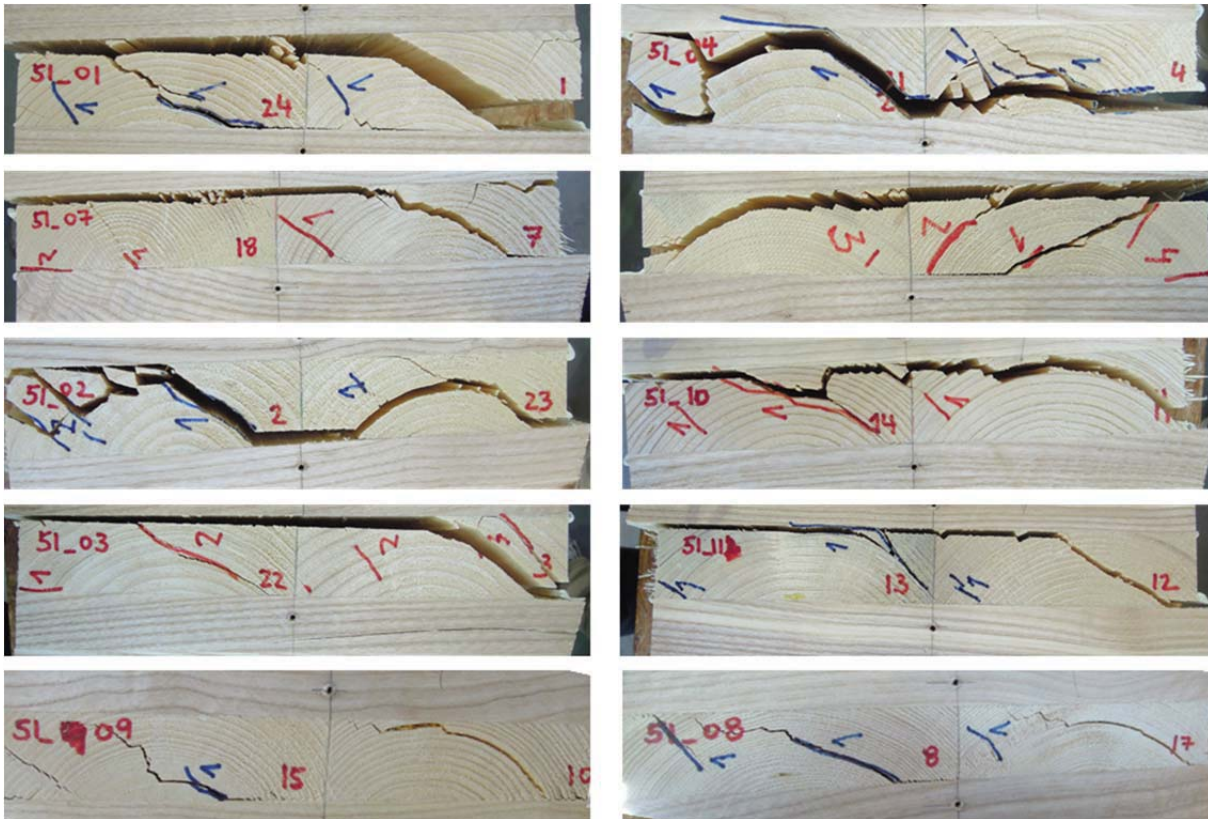


Abb. 3-31: Rissbild und Bruchverlauf sämtlicher Prüfkörper der Serie 5.1

Durch die konfigurationsbedingten lokalen Zugspannungsspitzen traten auch in dieser Serie bei einigen Prüfkörpern Risse nahe der Auflagerlasche im oberen Bereich der Probe auf (Abb. 3-30, rechtes Bild, Markierung 4). Wie aus Abb. 3-31 ersichtlich ist, verläuft der Bruch in sämtlichen betroffenen Proben davon unabhängig.

Die Verklebung erweist sich auch für diese Anordnung als ausreichend tragfähig: Sofern der Bruchverlauf entlang der Laschen führt, sind diese stets mit ausreichend Holzfaserrückständen bedeckt, um hiervon ausgehen zu können.



## Serie 5.2 – 4 x 1

Aus den Prüfdaten lässt sich kein Einfluss auf die Ergebnisse durch die teilweise Verwendung von Eschenholz als Laschenmaterial erkennen.

Tab. 3-15: Ergebnisse der Serie 5.2

		n	min	mean	med	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,IN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	10	402	441	437	494	6%	408	399
$r$	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	1,33	1,62	1,61	1,81	10%	1,38	1,36
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	110	125	123	142	8%	113	109
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	121	133	130	150	7%	123	118

Durch die parallele Anordnung von vier Brettern lässt sich, wie bereits in Serie 5.1, auch in Serie 5.2 eine verstärkte Rissbildung, teilweise deutlich vor Versagenseintritt, beobachten. Erklärt wird diese durch unterschiedliche Steifigkeiten und Festigkeiten der einzelnen Bretter: Durch die Risse erfolgt eine teilweise Lastumlagerung von vormals steiferen Bereichen hoher Beanspruchung auf Bereiche ursprünglich geringerer Steifigkeit.

Ähnlich der Serie 5.1 führen größtenteils Rollschubbrüche entlang jeweils einzelner Jahrringe jedes Brettes zum Versagen des Prüfkörpers.



Abb. 3-32: Aufbau, Rissbildung und Versagen eines Prüfkörpers der Serie 5.2

Die aus den Einzelversuchen bekannte systembedingte Rissbildung nahe der Auflagerlasche im oberen Bereich ist bei sämtlichen Prüfkörpern dieser Serie in unterschiedlicher Ausprägung ebenfalls zu beobachten. Wiederum zeigen die Bruchverläufe, dass die globale Tragfähigkeit von diesen unabhängig ist (Abb. 3-33).

Die Verklebung wird aufgrund der beobachteten Versagensformen, es können Bruchverläufe innerhalb der Proben erreicht werden, als ausreichend tragfähig angesehen. Bei drei von zehn Prüfkörpern ist die Klebefläche allerdings zu weniger als 50 % mit Holzfaserrückständen bedeckt (siehe auch Abb. 3-32, rechts).

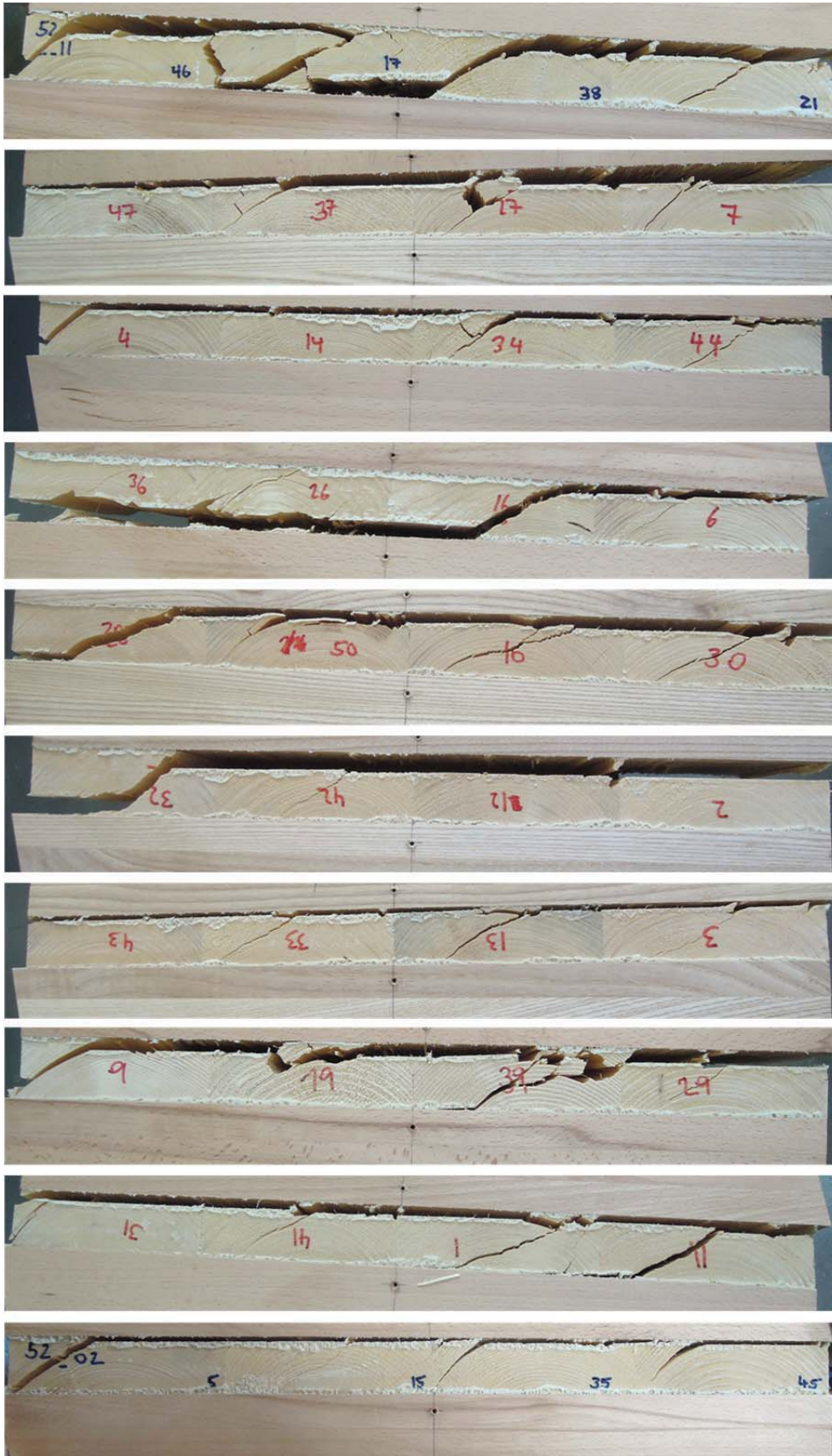


Abb. 3-33: Rissbilder und Bruchverlauf Serie 5.2

## Serie 5.3 – 4 x 3

Wie auch in Serie 5.1 und 5.2 werden aufgrund des geringen Prüfumfanges in Serie 5.3 sämtliche Prüfkörper mit „n-Orientierung“ eingebaut (Abb. 3-34).

Tab. 3-16: Ergebnisse der Serie 5.3

		n	min	mean	med	max	CoV	q <sub>05</sub>	q <sub>05,LN</sub>
$\rho_{12}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	10	429	453	447	483	4%	434	425
$r$	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$f_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	0,74	0,92	0,94	1,08	12%	0,75	0,75
$G_{R,12}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	105	123	116	152	14%	107	98
$G_{R,12,EN}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	10	117	130	124	148	10%	117	109

Über die Bretter aller Lagen verteilt wird eine ausgeprägte Rissbildung vor Versagenseintritt beobachtet. Es ist dabei insbesondere festzustellen, dass Risse, die ihren Ursprung in einem einzelnen Brett haben, sich durch benachbarte Bretter fortpflanzen.

Primärrisse nahe der Auflagerlasche im oberen Bereich (siehe Abschnitt 1.4.3) können auch in dieser Serie bei einigen Prüfkörpern beobachtet werden. Erneut ist die weitere Rissbildung sowie das Bruchversagen davon unabhängig (Abb. 3-35).

Das Versagensbild weist darauf hin, dass sämtliche Bretter an der Lastabtragung in ähnlichem Ausmaß beteiligt sind, durchschnittlich weisen jeweils acht der zwölf Bretter je Prüfkörper Risse auf oder liegen im Bruchverlauf (Abb. 3-35).



Abb. 3-34: Aufbau, Rissbildung und Versagen eines Prüfkörpers der Serie 5.3

Auch die Verklebung kann für diese Serie als geeignet erachtet werden, sind doch kaum Brüche entlang der Lasche festzustellen und sämtliche Klebeflächen mit ausreichend Holzfaserrückständen bedeckt.

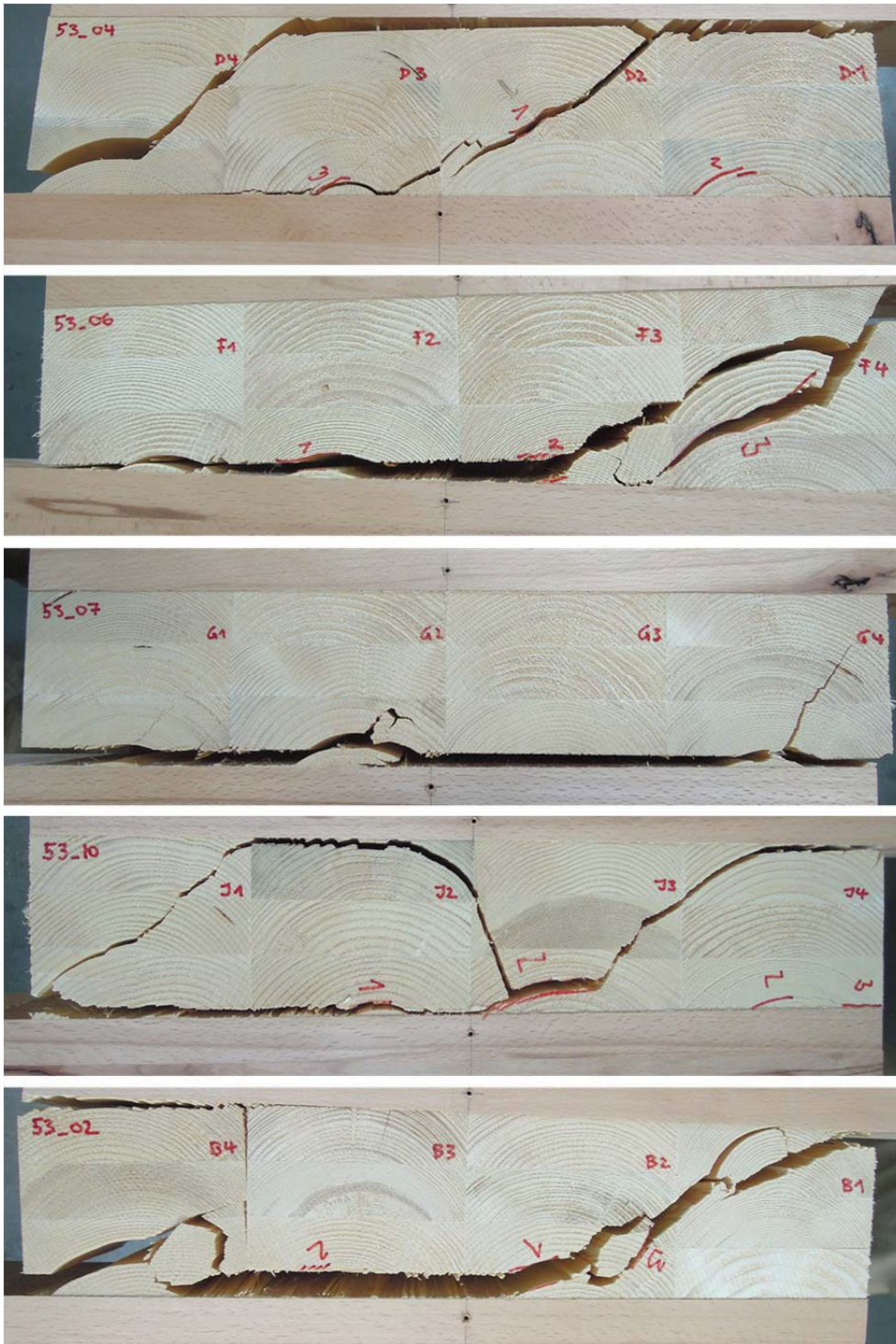


Abb. 3-35: Bruchverläufe der Prüfkörper aus Serie 5.3, Teil 1

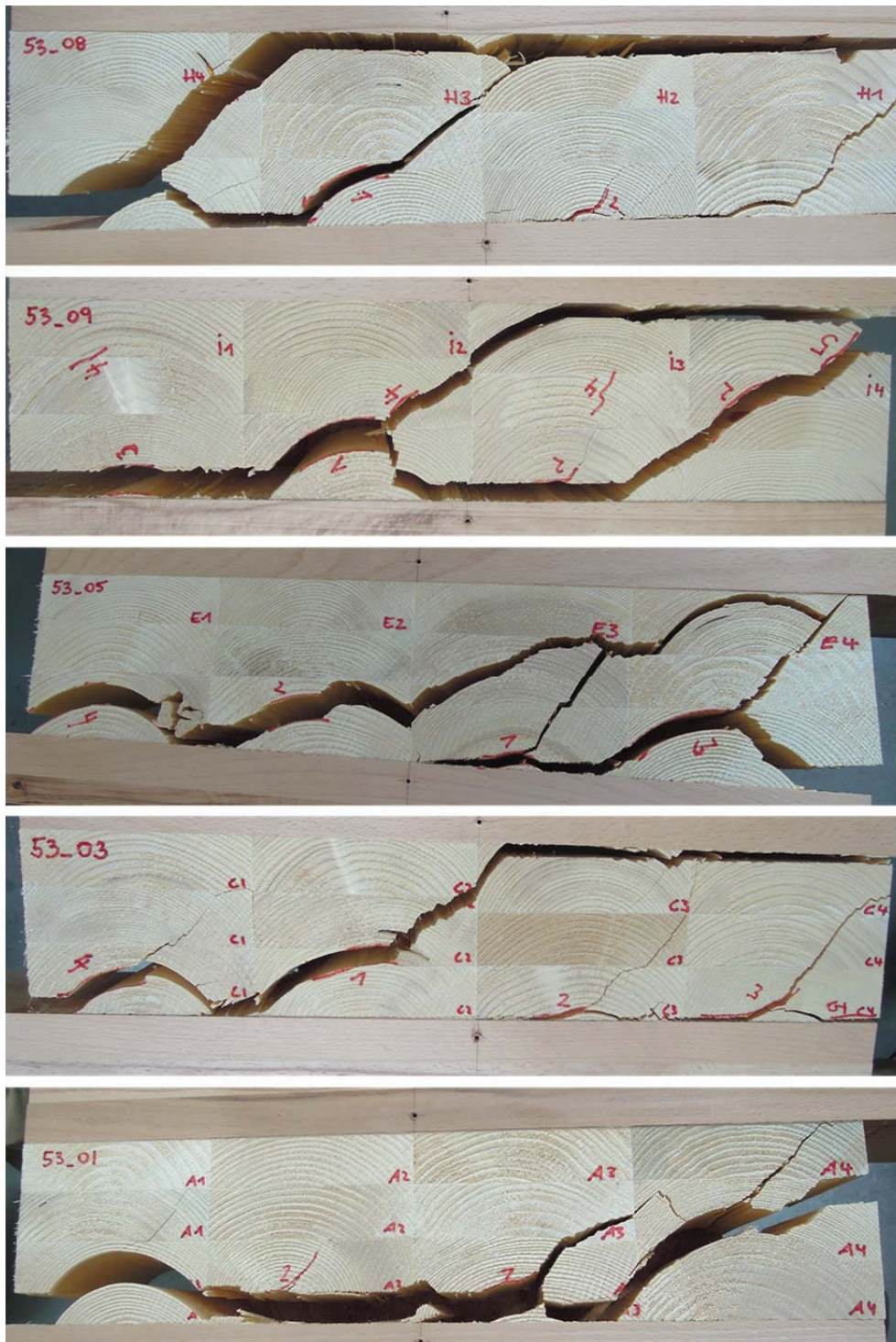


Abb. 3-36: Bruchverläufe der Prüfkörper aus Serie 5.3, Teil 2

## 4 DISKUSSION

In diesem Kapitel sollen die aus den Materialprüfungen gewonnenen und in Abschnitt 3 angeführten Daten einander vergleichend gegenübergestellt und der Einfluss der untersuchten Parameter auf die Rollschubeigenschaften diskutiert werden.

### 4.1 Rollschubeigenschaften unterschiedlicher Holzarten

Für die untersuchten Holzarten Fichte, Kiefer, Birke, Esche, Pappel und Buche ergaben sich gemäß Erwartungen erhebliche Unterschiede sowohl betreffend die Rollschubfestigkeit (Abb. 4-1) als auch die -moduln (Abb. 4-2).

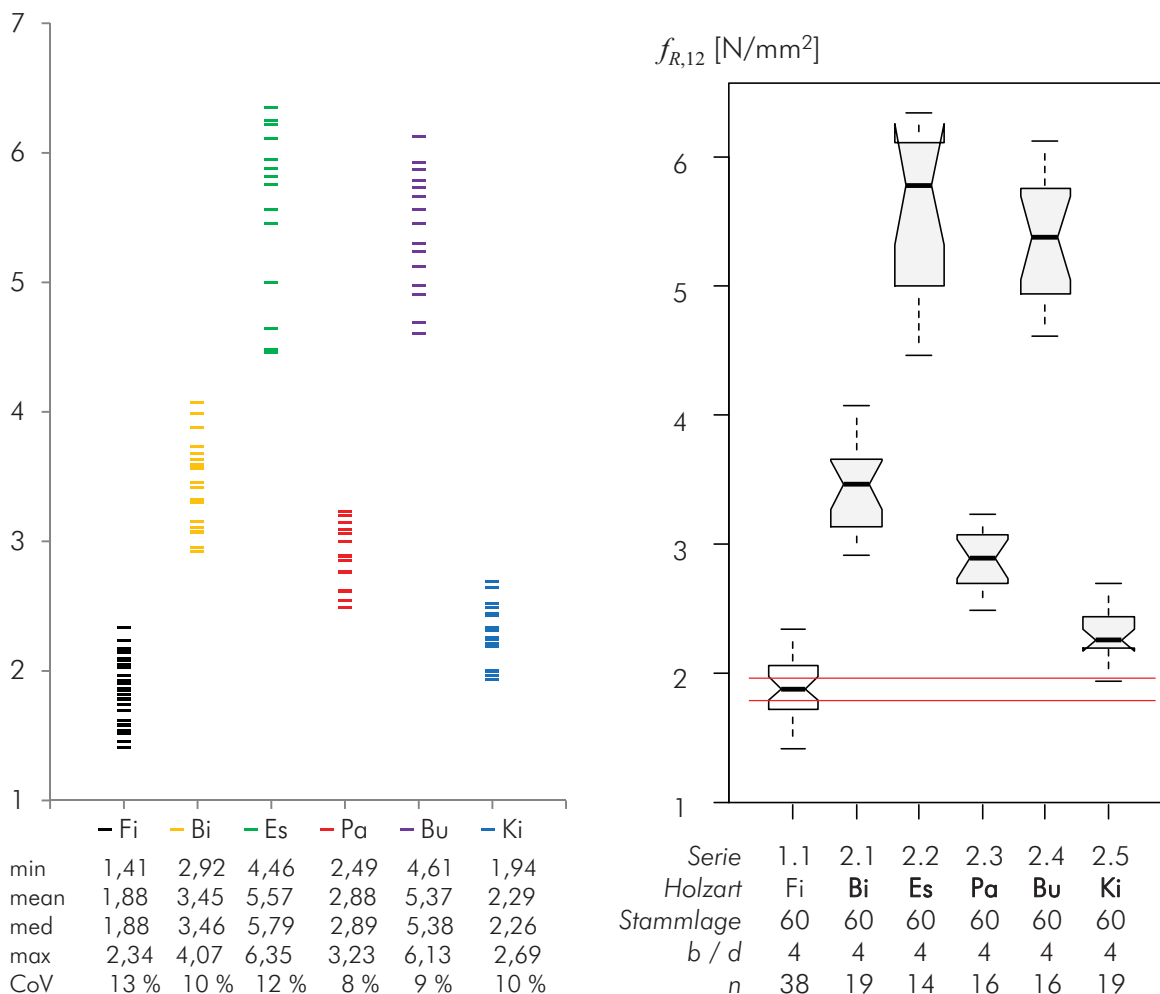


Abb. 4-1: Rollschubfestigkeiten der untersuchten Holzarten, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Das Bruchversagen unter Rollschubbeanspruchung erweist sich bei beiden Nadelhölzern als sehr ähnlich: Aufgrund des Dichteunterschiedes und der damit einhergehenden Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften von Früh- und Spätholz verläuft der zum Versagen führende Riss meist entlang eines bzw. entlang weniger Jahrringe. Dem zwar kürzeren Weg – bei homogenem isotropen Material gleichbedeutend mit geringerer aufzuwendender Bruchenergie – diagonal durch den Prüfkörper, stehen erhöhte materialseitige Widerstände bei Durchdringung der Spätholzzone ge-

genüber. Bereits geringste Störungen des Spätholzes führen allerdings dazu, dass der Riss um einige Jahrringe nach außen wandert.

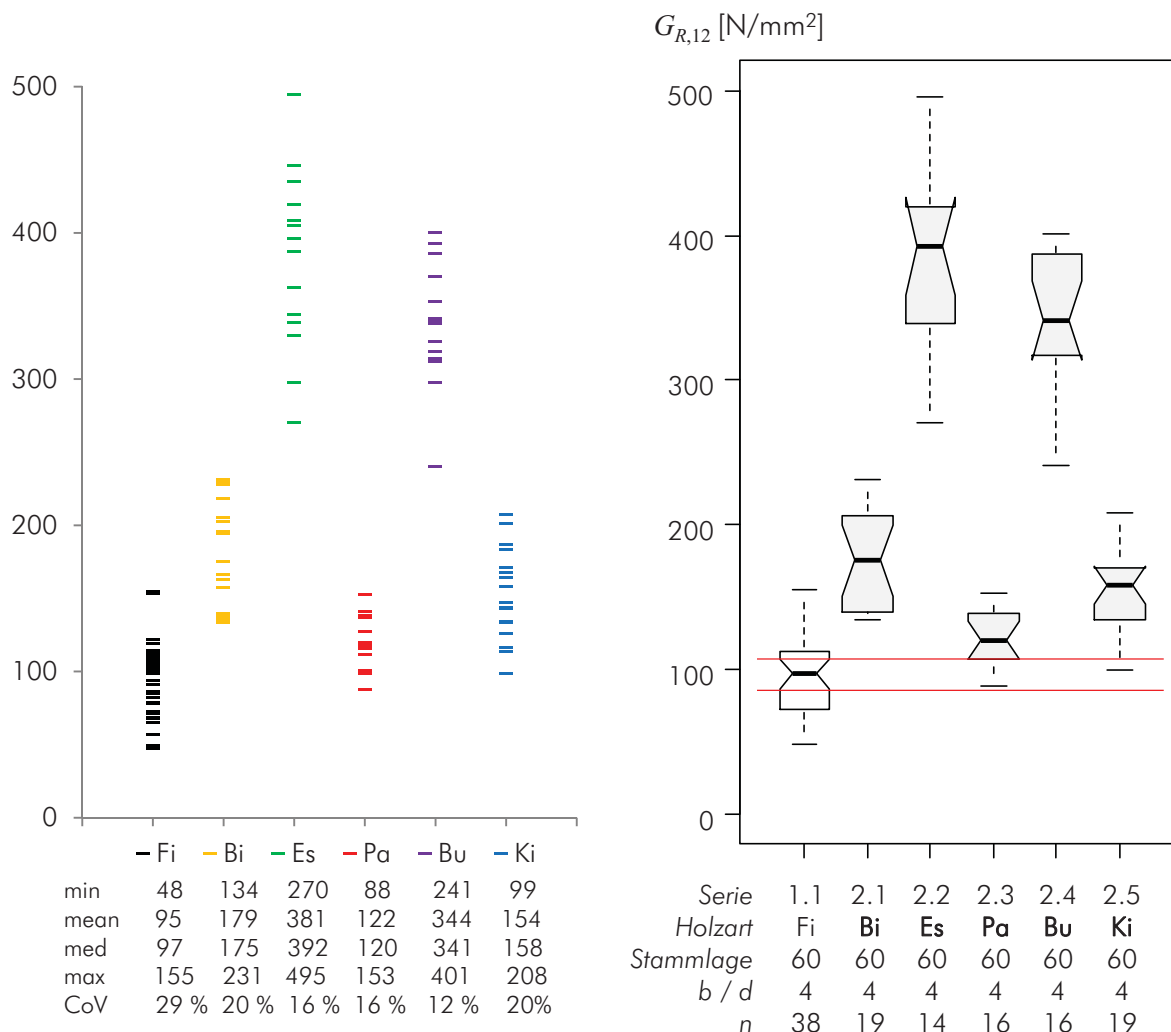


Abb. 4-2: Rollschubmodul der untersuchten Holzarten, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Das Bruchverhalten von Ring- und Zerstreuporern ist stark unterschiedlich. Bei Prüfkörpern der Birkenserie 2.1, einem Holz mit zerstreuter Anordnung der Tracheen, verläuft der Bruch ausschließlich diagonal, annähernd unter einem Winkel von 45° durch den Prüfkörper hindurch. Rollschubbrüche entlang der Jahrringe können nicht beobachtet werden. Zurückzuführen ist dies auf den relativ geringen Unterschied in der Rollschubfestigkeit von Früh- und Spätholz.

Die Holzarten Pappel und Buche, ebenfalls Zerstreuporer, weisen teils Brüche mit Z-förmigen Verlauf, daneben aber auch zahlreiche Rollschubbrüche entlang der Jahrringe auf. Esche weist als Vertreter der Ringporer in der Frühholzzone erhöhte Anteile an weitleumigen makroporen Gefäßzellen mit geringer Dichte und Festigkeit auf. Das beobachtete Bruchverhalten – reine Rollschubbrüche entlang eines Jahrringes – zeigt, dass auch die Rollschubfestigkeit der Frühholzzone bedeutend geringer als jene der Spätholzzone ist.

In Tab. 4-1 sind die wichtigsten mechanischen Eigenschaften der untersuchten Holzarten aufgeführt, die Werte entstammen [8] bzw. dieser Studie und stellen mittlere Werte dar.

Tab. 4-1: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Holzarten

	Serie	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
	Holzart	Fichte	Birke	Esche	Pappel	Buche	Kiefer
$\rho_{15,\text{mean}}^{1)}$	kg/m <sup>3</sup>	470	650	690	390	720	520
$E_{0,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	11.000	16.500	13.400	8.800	16.000	12.000
$E_{90,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	550	800	1.100	-	1.500	460
$G_{090,12,\text{mean}}^{3)}$	N/mm <sup>2</sup>	625	1065	750	-	1360	680
$G_{9090,12,\text{mean}}^{2)}$	N/mm <sup>2</sup>	<b>95</b>	<b>179</b>	<b>381</b>	<b>122</b>	<b>344</b>	<b>154</b>
$f_{t,0,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	90,0	137,0	165,0	77,0	135,0	104,0
$f_{t,90,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	2,7	7,0	7,0	-	7,0	3,0
$f_{c,0,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	50,0	51,0	52,0	35,0	62,0	55,0
$f_{c,90,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	5,8	-	11,0	-	9,5	7,7
$f_{m,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	72,0	147,0	120,0	65,0	123,0	100,0
$f_{v,0,12,\text{mean}}^{1)}$	N/mm <sup>2</sup>	6,7	12,0	12,8	5,0	8,0	10,0
$f_{v,90,12,\text{mean}}^{2)}$	N/mm <sup>2</sup>	<b>1,9</b>	<b>3,5</b>	<b>5,6</b>	<b>2,9</b>	<b>5,4</b>	<b>2,3</b>

<sup>1)</sup>.. aus [8] <sup>2)</sup>.. aus dieser Arbeit <sup>3)</sup>... aus [56] gemittelt ( $G_{LR}$  und  $G_{RT}$ )

Werden die mechanischen Eigenschaften der Holzarten aus Tab. 4-1 auf jene der Referenzholzart Fichte bezogen lässt sich erkennen, unter welchen Belastungen diese vergleichsweise besonders günstige Eigenschaften aufweisen (Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Relationen der mechanischen Eigenschaften bezogen auf Fichtenholz

Serie	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Holzart	Fichte	Birke	Esche	Pappel	Buche	Kiefer
$\rho_{15,i}/\rho_{15,\text{Fi}}$	1,0	1,4	1,5	0,8	1,5	1,1
$E_{0,i}/E_{0,\text{Fi}}$	1,0	1,5	1,2	0,8	1,5	1,1
$E_{90,i}/E_{90,\text{Fi}}$	1,0	1,5	2,0	-	2,7	0,8
$G_{090,i}/G_{090,\text{Fi}}$	1,0	1,7	1,2	-	2,2	1,1
$G_{9090,i}/G_{9090,\text{Fi}}$	<b>1,0</b>	<b>1,9</b>	<b>4,0</b>	<b>1,3</b>	<b>3,6</b>	<b>1,6</b>
$f_{t,0,i}/f_{t,0,\text{Fi}}$	1,0	1,5	1,8	0,9	1,5	1,2
$f_{t,90,i}/f_{t,90,\text{Fi}}$	1,0	2,6	2,6	-	2,6	1,1
$f_{c,0,i}/f_{c,0,\text{Fi}}$	1,0	1,0	1,0	0,7	1,2	1,1
$f_{c,90,i}/f_{c,90,\text{Fi}}$	1,0	-	1,9	-	1,6	1,3
$f_{m,i}/f_{m,\text{Fi}}$	1,0	2,0	1,7	0,9	1,7	1,4
$f_{v,0,i}/f_{v,0,\text{Fi}}$	1,0	1,8	1,9	0,7	1,2	1,5
$f_{v,90,i}/f_{v,90,\text{Fi}}$	<b>1,0</b>	<b>1,8</b>	<b>3,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,9</b>	<b>1,2</b>

Das Verhältnis  $G_{9090} / G_{090}$  liegt bei Fichte (0,15), Birke (0,17), Buche (0,25) und Kiefer (0,23) auf sehr ähnlichem Niveau, lediglich Esche (0,50) sticht in diesem Vergleich deutlich hervor.



Birke (Serie 2.1) besitzt im Vergleich zu Fichte bei den bekannten Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften um rd. 50 bis 100 % höhere Werte, lediglich die Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung liegt mit 2,6-fachen Werten deutlich darüber.

Der in dieser Studie ermittelte Rollschubmodul von Birkenholz liegt bei selber Jahrringlage und  $b/d$ -Verhältnis ähnlich den anderen Eigenschaften rd. 90 % über jenem von Fichte. Das festgestellte Verhältnis der Rollschubfestigkeiten ist mit 1,8 ident mit jenem der Schubfestigkeiten  $f_{v,0}$ . Die Verhältnisse passen somit sehr gut in das allgemeine Bild des Kenngrößenvergleichs.

Als einziger untersuchter Vertreter der Laubhölzer mit ringporiger Anordnung der Gefäßzellen weist Esche (Serie 2.2) vergleichsweise deutlich erhöhte Relationen bei den Rollschubeigenschaften auf: Bei bekannten Festigkeiten und Steifigkeiten, die weitestgehend jenen von Birke, also 50 bis 100 % über Fichtenniveau liegend, entsprechen, ragen Rollschubfestigkeit mit 3- und -modul mit 4-fachen Werten deutlich heraus.

Pappel (Serie 2.3) weist durchwegs mechanische Kennwerte auf, die bei rd. 80 % von Fichte liegen. Die ermittelten Rollschubeigenschaften übersteigen allerdings jene von Fichte um 30 % (Rollschubmodul) bzw. 50 % (Rollschubfestigkeit). Ein Einsatz dieser Holzart mit nur unwesentlich höherem Eigengewicht als die Fichte aber ökonomisch und günstigeren Holzart in den Querlagen von Brettsperrholz scheint also durchaus interessant und zweckmäßig. Wang et al. [17] bestätigen in ihrer 2014 präsentierten Machbarkeitsstudie die Eignung von Pappelholz zur Verwendung in Brettsperrholzprodukten. Vor allem der Einsatz in Querlagen wird durch die durchgeführten Biegeversuche an 3-schichtigen BSP-Elementen als zweckmäßig festgestellt.

Die Materialeigenschaften von Buche (Serie 2.4) entsprechen weitestgehend jenen von Esche: um 50 bis 100 % höhere Werte im Vergleich zur Fichte. Die Rollschubfestigkeiten von 3-facher und -modul von 4-facher Höhe heben sich wiederum davon ab.

Das zweite untersuchte Nadelholz, Kiefer (Serie 2.5), besitzt im Allgemeinen rd. 10 bis 30 % höhere Eigenschaften. Die Rollschubfestigkeit liegt mit 20 % Erhöhung im Vergleich zu Fichte gut zwischen diesen Grenzen. Ein um 60 % höherer Rollschubmodul ragt hingegen deutlich heraus. Aus den erstellten Box-Plots (Abb. 4-1 und Abb. 4-2) ist das unterschiedliche Niveau der Rollschubeigenschaften der untersuchten Holzarten deutlich ersichtlich. Sämtliche Holzarten unterscheiden sich im Mittelwert bzw. Median hoch signifikant von der Referenzholzart Fichte (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests für den Vergleich der Mittelwerte und Mediane von Rollschubfestigkeit und -modul der untersuchten Holzarten ( $p$ -Werte,  $\alpha = 5\%$ )

		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
T-Test	$f_{R,1.1,mean}$	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	$f_{R,1.1,mean}$	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
T-Test	$G_{R,1.1,mean}$	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	$G_{R,1.1,mean}$	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001

Diese Ausführungen, insbesondere die Verschiebung der Proportionen im Vergleich zu Fichtenholz, deuten stark darauf hin, dass bei Laubhölzern, mit Ausnahme der Birke, andere Mechanismen der Holzstruktur bei Rollschubbeanspruchung wesentlich erscheinen als bei Zug, Druck oder Schub in Faserrichtung.

## 4.2 Zusammenhang von Rohdichte und Rollschubeigenschaften

Es kann zwar über die unterschiedlichen Prüfserien ein genereller Trend beobachtet werden, wonach erhöhte Rohdichten mit höheren Rollschubeigenschaften einhergehen. Die Ausprägung des Zusammenhanges sowie die Korrelation einer funktionalen Beschreibung dieses innerhalb der Holzarten variieren allerdings stark.

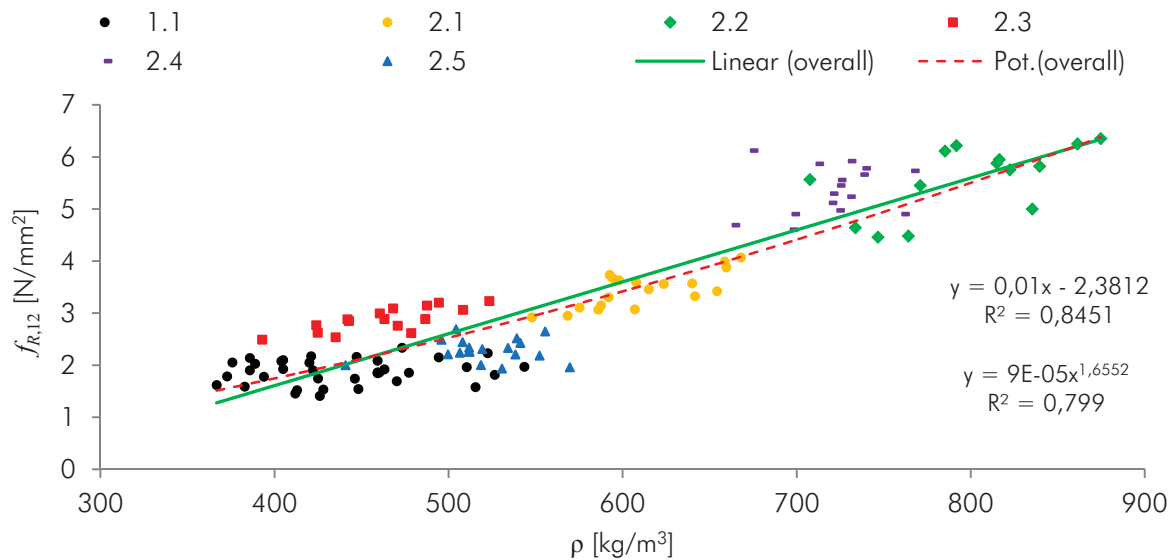


Abb. 4-3: Rollschubfestigkeit vs. Rohdichte der untersuchten Holzarten

Bei globaler Betrachtung der Ergebnisse sämtlicher Holzarten kann eine sehr starke Affinität von Rollschubfestigkeit und Rohdichte festgestellt werden. Sowohl unter Anwendung einer linearen Funktion als auch Potenzfunktion kann ein Korrelationsmaß von  $R \approx 0,90$  ermittelt werden; die zugehörigen Funktionen sind in Abb. 4-3 angegeben. Diese Gesamtbetrachtung unter Einbeziehung aller untersuchten Holzarten soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass nicht für jede Holzart und Serie ein eindeutiger Zusammenhang von Rohdichte und Festigkeit besteht.

Erhöhte Korrelationen zwischen Rohdichte und Rollschubfestigkeit ergeben sich für die Holzarten Birke ( $R = 0,74$ ), Esche ( $R = 0,60$ ) und Pappel ( $R = 0,78$ ); für Buche und Kiefer sowie Fichte in der Referenzserie ist kaum ein Zusammenhang ersichtlich (Tab. 4-4). Einzig in Serie 4.2 ( $b / d = 6$ ) zeigt sich mit  $R = 0,65$  ein erhöhter Zusammenhang der beiden Parameter für die Holzart Fichte.

Ein Erklärungsansatz für die geringe Korrelation von Rohdichte und Rollschubfestigkeit für Nadelholz liegt im strukturellen Aufbau in Verbindung mit den beobachteten Versagensformen (siehe Abschnitt 3.2): Rohdichten unterschiedlicher Größe ergeben sich für Nadelholz vor allem durch verschiedene Jahrringbreiten. Die Dichte der Frühholzzone beträgt rd.  $300 \text{ kg/m}^3$  (z.B. für Fichtenholz), jene der Späthholzzone liegt bei rd.  $900$  bis  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Da die Späthholzonenbreite weitestgehend konstant ist, verringert sich bei zunehmender Jahrringbreite die Rohdichte wegen des steigenden Anteils an Frühholz. Das Rollschubversagen tritt aber i.d.R. im Frühholzbereich durch einen Bruch entlang einiger weniger Jahrringe auf. Die beobachtbare Festigkeit ist somit weitestgehend unabhängig von der Rohdichte.

Tab. 4-4: Funktioneller Zusammenhang von Rollschubfestigkeit und Rohdichte

Serie	Holzart	Lineare Regression		Potenzfunktion	
		Funktion	R <sup>2</sup>	Funktion	R <sup>2</sup>
1.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
2.1	Birke	$y = 0,0075 x - 1,12$	0,55	$y = 0,0070 x^{1,3341}$	0,56
2.2	Esche	$y = 0,0082 x - 0,95$	0,36	$y = 0,0019 x^{1,1906}$	0,35
2.3	Pappel	$y = 0,0053 x + 0,43$	0,60	$y = 0,0160 x^{0,8458}$	0,60
2.4	Buche	-	< 0,1	-	< 0,1
2.5	Kiefer	-	< 0,1	-	< 0,1
3.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
3.2	Fichte	$y = 0,0032 x + 0,28$	0,22	$y = 0,0138 x^{0,7906}$	0,19
4.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
4.2	Fichte	$y = 0,0060 x - 0,45$	0,42	$y = 0,0018 x^{1,1628}$	0,39
5.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
5.2	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
5.3	Fichte	$y = 0,0025 x - 0,20$	0,15	$y = 0,0005 x^{1,2321}$	0,14

Ähnlich wie bei der Festigkeit unter Rollschubbelastung ist auch der Einfluss der Rohdichte auf den Rollschubmodul stark unterschiedlich ausgeprägt. Global ist die Affinität wiederum sehr deutlich feststellbar (Abb. 4-4).

Bei Birke ( $R = 0,63$ ) und Esche ( $R = 0,73$ ) lassen sich mittlere bis hohe Korrelationen feststellen, ebenso bei Buche ( $R = 0,56$ ). Pappel ( $R = 0,02$ ) und Kiefer (negativer Zusammenhang) weisen von der Rohdichte völlig unabhängige Rollschubfestigkeiten auf.

Tab. 4-5: Funktioneller Zusammenhang von Rollschubmodul und Rohdichte

Serie	Holzart	lineare Regression		Potenzfunktion	
		Funktion	R <sup>2</sup>	Funktion	R <sup>2</sup>
1.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
2.1	Birke	$y = 0,6597 x - 226$	0,40	$y = 6E^{-05} x^{2,33}$	0,42
2.2	Esche	$y = 0,9043 x - 340$	0,53	$y = 0,0013 x^{1,88}$	0,50
2.3	Pappel	-	< 0,1	-	< 0,1
2.4	Buche	$y = 0,8842 x - 292$	0,32	$y = 0,0006 x^{2,0092}$	0,34
2.5	Kiefer	$y = -0,3938 x + 359$	0,14	$y = 741649 x^{-1,359}$	0,14
3.1	Fichte	$y = 0,2879 x + 11$	0,45	$y = 0,6753 x^{0,8721}$	0,37
3.2	Fichte	$y = 0,1442 x - 17$	0,18	$y = 0,0156 x^{1,3106}$	0,17
4.1	Fichte	-	< 0,1	-	< 0,1
4.2	Fichte	$y = 0,3672 x - 27$	0,17	$y = 0,0938 x^{1,1906}$	0,17
5.1	Fichte	$y = 0,3067 x - 14$	0,47	$y = 0,1095 x^{1,1504}$	0,49
5.2	Fichte	$y = 0,2440 x + 18$	0,40	$y = 0,7949 x^{0,8307}$	0,37
5.3	Fichte	$y = 0,8557 x - 265$	0,77	$y = 9E^{-07} x^{3,0573}$	0,76

In der Fichtenholzserie 3.1 (Schnittlage  $r = 30$  mm) sowie sämtlichen Systemserien 5.i zeigen sich außerdem erhöhte Korrelationen.

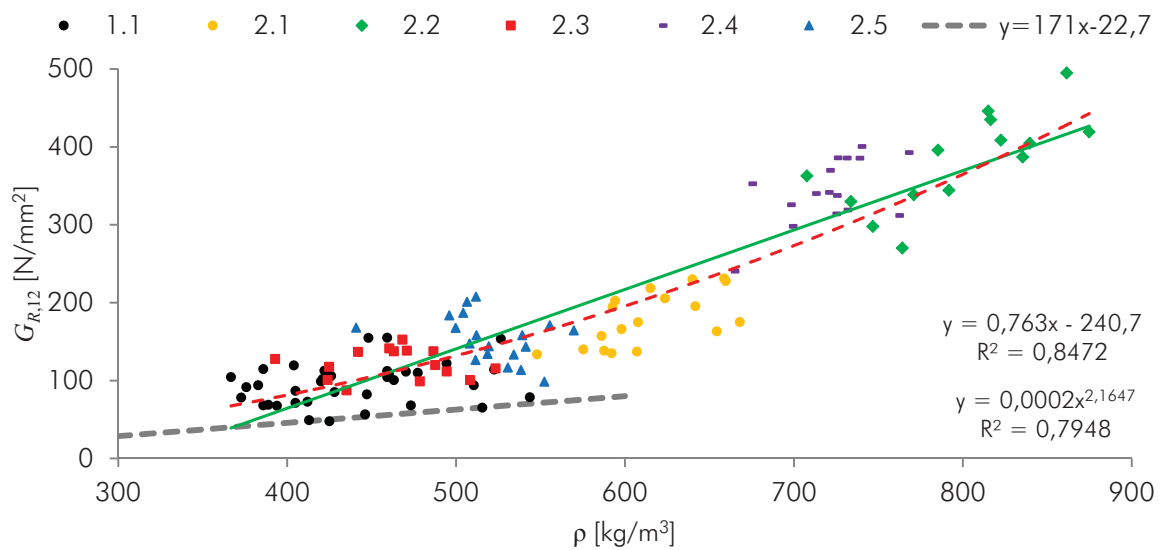


Abb. 4-4: Rollschubmodul vs. Rohdichte unterschiedlicher Holzarten

Die von Görlacher [31] gefundene Funktion (siehe auch Abschnitt 1.4.1.6), beschrieben durch Gl. (1-1) und in Abb. 4-4 strichliert dargestellt, gibt den positiven Zusammenhang von Rohdichte und Rollschubmodul wieder und weist eine sehr ähnliche Steigung wie die sich aus der linearen Regressionsanalyse für Fichte (Serie 1.1) ergebende Gl. (4-1) auf. Allerdings liegen die ermittelten Moduln deutlich über den in [31] angegebenen Werten. Die Höhe des festgestellten Korrelationsmaßes von lediglich  $R = 0,28$  lässt darüber hinaus nicht zu, dass von einem abgesicherten Einfluss der Rohdichte auf den Rollschubmodul ausgegangen werden kann.

$$G_R = 158 \cdot \rho + 26,2 \quad \text{Gl. (4-1)}$$

$G_R$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\rho$  ... Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

### 4.3 Einfluss der Jahrringlage auf die Rollschub Eigenschaften

Ein Einfluss der Jahrringlage auf die Rollschubfestigkeit kann in dieser Studie nicht festgestellt werden (Abb. 4-5). Die beobachteten Werte Mittelwerte für Serie 3.1 ( $r = 30$  mm), Serie 1.1 ( $r = 60$  mm) und Serie 3.2 ( $r = 100$  mm) liegen mit  $1,88 / 1,88 / 1,84$  N/mm<sup>2</sup> auf nahezu exakt gleichem Niveau.

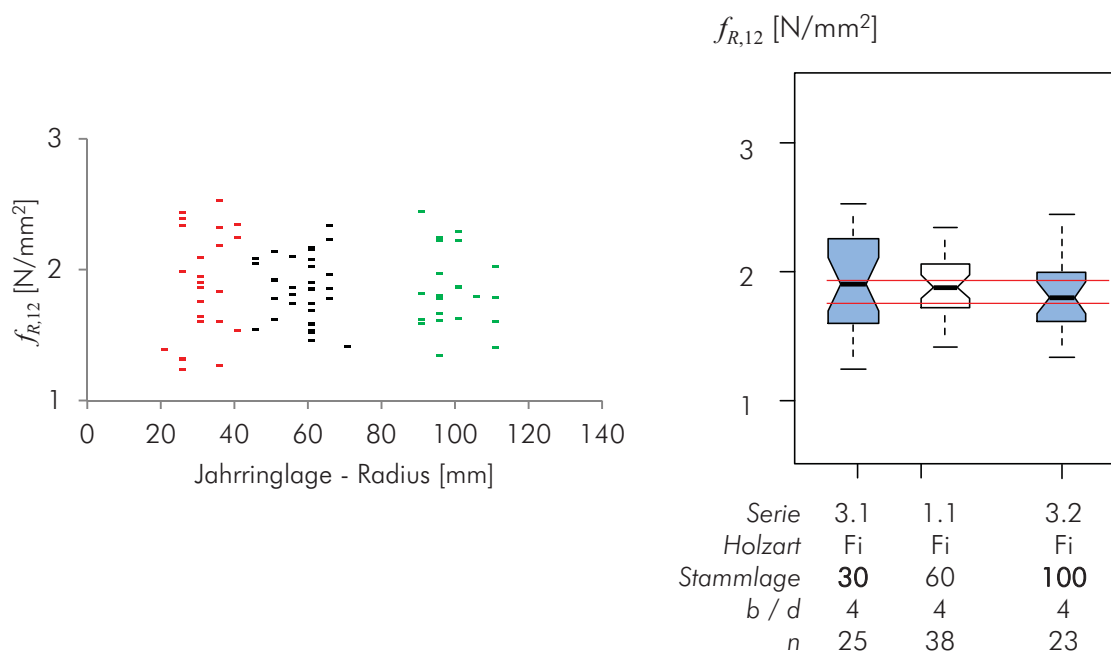


Abb. 4-5: Rollschubfestigkeit vs. Jahrringlage (links) und Box-Plot der untersuchten Serien (rechts)

Signifikanztest, in denen die Mittelwerte und Mediane dieser Serien miteinander verglichen wurden, bestätigen diese Erkenntnis (Tab. 4-6).

Tab. 4-6: Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests für den Vergleich der Mittelwerte und Mediane von Rollschubfestigkeiten unterschiedlicher Jahrringlagen ( $p$ -Werte,  $\alpha = 5$  %)

$f_{R,i,mean}$	Serie	3.1	1.1	3.2
T-Test	3.1	=	0,816	0,838
	1.1	0,816	=	0,558
	3.2	0,838	0,558	=
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	3.1	=	0,832	0,650
	1.1	0,832	=	0,539
	3.2	0,650	0,539	=

Der Rollschubmodul hingegen hängt stark von der Position des Brettes im Stamm ab und sinkt mit zunehmendem Abstand vom Mark ab (Abb. 4-6). Für die Serien 1.1, 3.1 und 3.2 kann hier zwischen den Medianen und Mittelwerten ein hoch signifikanter Unterschied festgestellt werden (Tab. 4-7).

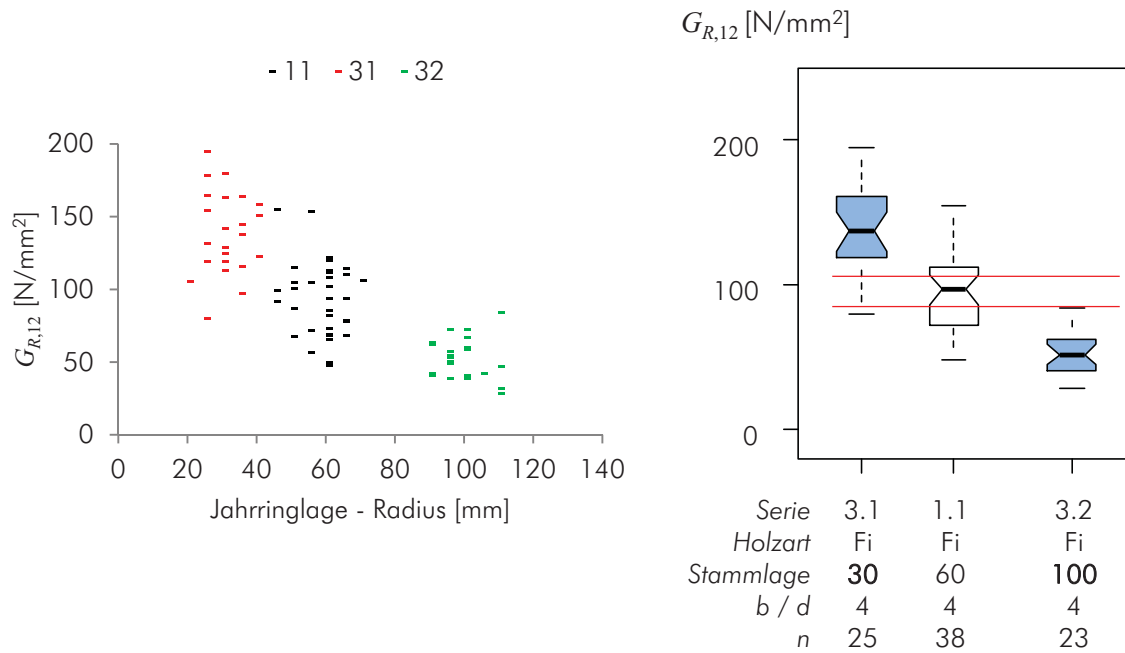


Abb. 4-6: Rollschubmodul vs. Jahrringlage (links) und Box-Plot der untersuchten Serien (rechts)

Tab. 4-7: Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests für den Vergleich der Mittelwerte und Mediane von Rollschubmoduln unterschiedlicher Jahrringlage ( $p$ -Werte,  $\alpha = 5\%$ )

$G_{R,i,mean}$	Serie	3.1	1.1	3.2
T-Test	3.1	=	< 0,001	< 0,001
	1.1	< 0,001	=	< 0,001
	3.2	< 0,001	< 0,001	=
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	3.1	=	< 0,001	< 0,001
	1.1	< 0,001	=	< 0,001
	3.2	< 0,001	< 0,001	=

Die Regressionsanalyse der Prüfdaten liefert Gl. (4-2) bzw. Gl. (4-3) bei Verwendung einer linearen bzw. Potenzfunktion. Die Korrelationsmaße zeigen mit 0,79 in beiden Fällen den starken Zusammenhang auf.

$$G_R = -1,22 \cdot r + 170 \quad \text{Gl. (4-2)}$$

$$G_R = 2024 \cdot r^{-0,79} \quad \text{Gl. (4-3)}$$

Aus den Untersuchungen von Feichter [34] kann für Bretter mit einer Geometrie von  $b/d = 120/30 \text{ mm} = 4$  (zylindrisches Koordinatensystem, technisches Material) für den Bereich der Jahrringlagen zwischen 30 und 110 mm ein nahezu linear abnehmender Rollschubmodul schlussgefolgert werden: Es werden dazu im Abstand von 10 mm Punkte aus dem in [34] angegebenen Diagramm abgelesen und in Abb. 4-7 dargestellt. Durch Gl. (4-4) wird die festgestellte lineare Funktion beschrieben.

$$G_R = -0,6 \cdot r + 134$$

Gl. (4-4)

 $G_R$  ... Rollschubmodul [N/mm<sup>2</sup>]

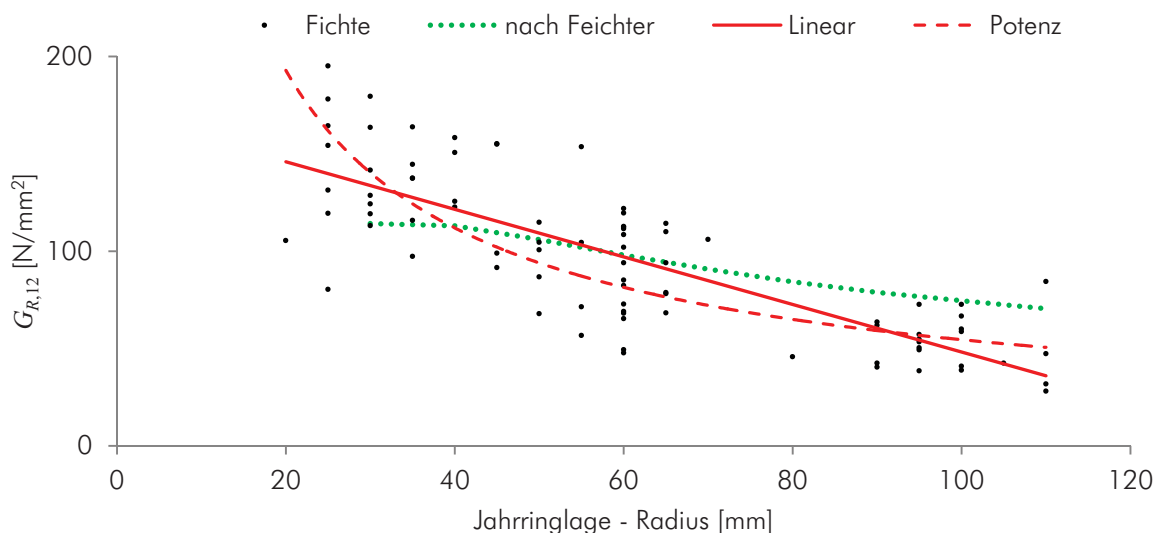
 $r$  ... Abstand des Brettmittelpunktes von der Stammachse [mm]


Abb. 4-7: Rollschubmodul vs. Jahrringlage und Regressionsfunktionen

Ein Vergleich mit den ermittelten Rollschubmoduln bei unterschiedlicher Jahrringlage zeigt, dass sowohl das Niveau der Moduln als auch die Abnahme dieser mit zunehmendem Abstand vom Mark mit den Ergebnissen aus [34] gut übereinstimmt. Durch Gl. (4-4) wird der mittlere Modul innerer Lagen ( $r < 50$  mm) allerdings leicht unterschätzt, jener der äußeren untersuchten Lagen ( $r > 70$  mm) etwas überschätzt.

Den bisherigen Ausführungen bezüglich des Einflusses der Jahrringlage auf die Rollschubeigenschaften liegen ausschließlich Prüfungen von Fichtenholz zugrunde (Serie 1.1 und 3.i). Anhand einiger geprüfter, im weiteren Verlauf aber aufgrund der serienspezifischen Vorgaben hinsichtlich der Lage im Stamm ausgeschlossenen Proben, sollen eventuell vorhandene Analogien zu anderen Holzarten untersucht werden. Dazu werden – als Kleinserien bezeichnete – Serien gebildet.

Für die von der Soll-Jahrringlage  $r = 60$  mm zu stark abweichenden Prüfkörper werden in Tab. 4-8 die Prüfkörperbezeichnung, der jeweilige Markabstand ( $r$ ) sowie Mittelwert und Median der Rollschubfestigkeiten und -moduln der gebildeten Kleinserie angegeben. Darüber hinaus werden die ermittelten Kennwerte der jeweiligen Holzarten bei der Referenzstammlage  $r = 60$  mm aufgelistet.

Die Ergebnisse der Kleinserien für Pappelholz deuten darauf hin, dass wie auch bei Fichte kein stark ausgeprägter Zusammenhang zwischen Jahrringlage und Rollschubfestigkeit besteht. Sämtliche ermittelten Werte liegen zwischen Minimal- und Maximalwert der Serie 2.3, die Mittelwerte unterscheiden sich um lediglich 5 %.

Tab. 4-8: Ergebnisse der Kleinserien für abweichende Jahrringlagen

2.2-Esche				2.3-Pappel				2.5-Kiefer			
PK	$r$ mm	$f_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>	PK	$r$ mm	$f_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>	PK	$r$ mm	$f_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{R,12}$ N/mm <sup>2</sup>
05	100	5,49	352	01	105	2,96	98	08	30	1,71	140
14	110	6,54	493	18	110	2,89	101	13	30	1,83	170
15	100	4,30	229	21	105	2,99	114	18	35	1,81	197
19	100	3,64	150	22	105	3,00	142	-	-	-	-
-	-	-	-	25	100	3,22	122	-	-	-	-
<b>mean</b>	<b>103</b>	<b>4,99</b>	<b>306</b>	<b>mean</b>	<b>105</b>	<b>3,01</b>	<b>115</b>	<b>mean</b>	<b>32</b>	<b>1,78</b>	<b>169</b>
med	100	4,90	290	med	105	2,99	114	med	30	1,81	170
min	40	4,46	270	min	40	2,49	88	min	40	1,94	99
2.2				2.3				2.5			
<b>mean</b>	<b>60</b>	<b>5,57</b>	<b>381</b>	<b>mean</b>	<b>57</b>	<b>2,88</b>	<b>122</b>	<b>mean</b>	<b>59</b>	<b>2,29</b>	<b>154</b>
2.2				2.3				2.5			
max	80	6,35	495	max	75	3,23	153	max	80	2,69	208
2.2				2.3				2.5			

Bei Eschenholz streuen die Ergebnisse der Kleinserie für die Festigkeit in der äußeren Stammlage sehr stark; bei nur vier Prüfkörper unterschreiten zwei den Minimalwert, einer liegt über dem Maximalwert der Serie 2.2. Die Mittelwerte unterscheiden sich um rd. 10 %.

Für Kiefer ergeben sich für die Festigkeit innere Jahrringlagen ( $r = 30$  mm) ebenfalls von der Vergleichsserie 2.5 abweichende Werte. Alle drei Prüfkörper liegen unter dem Minimum der 19 untersuchten Proben mit  $r = 60$  mm. Im Mittel liegen die Festigkeiten bei  $r = 30$  mm rd. 20 % unter jener bei Referenzstammlage. Aufgrund des geringen Prüfumfanges soll dies hier nur Erwähnung finden.

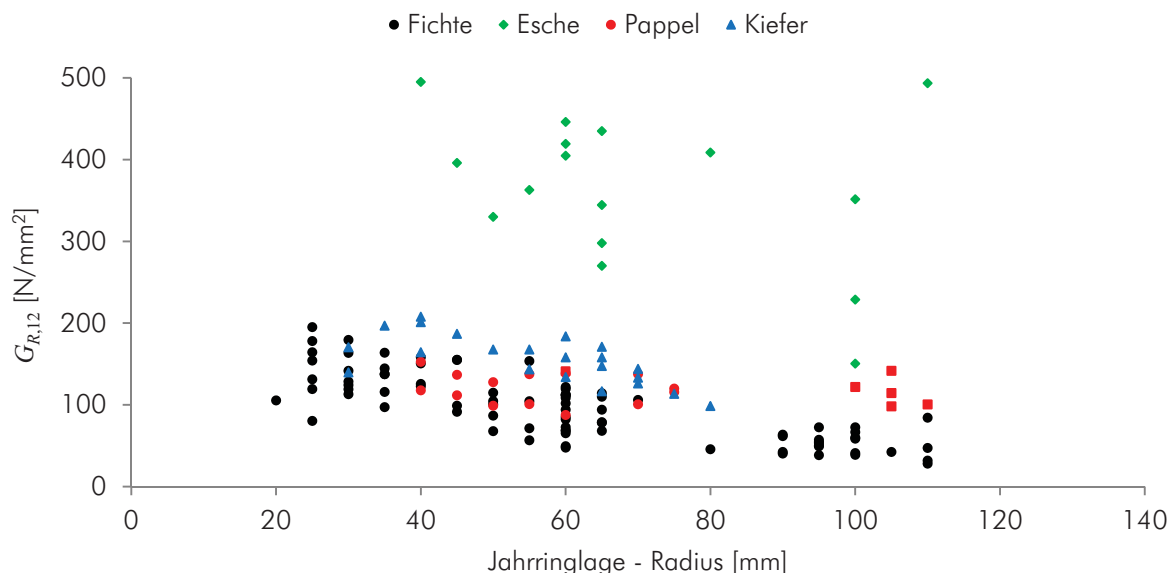


Abb. 4-8: Jahrringlage vs. Rollschubmodul inklusive Kleinserien für Esche, Pappel und Kiefer



Der für Fichtenholz festgestellte Zusammenhang, wonach innerer Jahrringlagen höhere Rollschubmoduln aufweisen, wird durch den Vergleich der untersuchten „Kleinserien“ mit der Serie 2.i auch für Esche, Pappel und Kiefer bestätigt.

Die Kleinserien von Esche und Pappel weisen mit  $r = 100$  mm einen größeren Abstand vom Mark auf. Ihr mittlerer Rollschubmodul liegt 20 bzw. 6 % unter jenem der Vergleichsserie ( $r = 60$  mm). Umgekehrt ergeben sich für die Kleinserie von Kiefer mit  $r = 30$  mm um 10 % höhere Rollschubsteifigkeiten. An dieser Stelle soll noch einmal auf den geringen Umfang von drei bis fünf Prüfkörpern je Kleinserie hingewiesen werden, insbesondere die Streuung von Esche bei  $r = 100$  mm mit bis zu doppelten Werten zeigt, dass hier noch weitere Untersuchungen zur Abklärung der Zusammenhänge notwendig wären.

In Hinblick auf BSP, in diesen Produkten kommen i.d.R. Bretter unterschiedlicher Jahrringlagen zum Einsatz, wird für Fichtenholz eine charakteristische Rollschubfestigkeit ( $f_{R,k}$ ) von  $1,40$  N/mm<sup>2</sup> sowie ein mittlerer Rollschubmodul ( $G_{R,mean}$ ) von  $95$  N/mm<sup>2</sup> als Ergebnis dieser Studie vorgeschlagen.

## 4.4 Einfluss des $b / d$ -Verhältnisses auf die Rollschubeigenschaften

Der aus vorangegangenen Studien bekannte Einfluss des Verhältnisses von Brettbreite zu Brettstärke auf die Rollschubeigenschaften kann auch in dieser Arbeit festgestellt werden.

Die ermittelten Rollschubfestigkeiten nehmen bei konstanter Brettstärke und Jahrringlage mit steigender Brettbreite stark zu. In Referenzserie 1.1 liegt die mittlere Festigkeit bei  $1,88 \text{ N/mm}^2$ . Wird das  $b / d$ -Verhältnis auf zwei (Serie 4.1) reduziert, so sinkt dieser Wert um fast 40 % auf  $1,16 \text{ N/mm}^2$ . Umgekehrt bei gesteigerter Brettbreite: In Serie 4.2 ( $b / d = 6$ ) werden im Vergleich zu Serie 1.1 um 20 % höhere Festigkeiten ermittelt. In Abb. 4-9 werden die Ergebnisse der Serien einander grafisch gegenübergestellt.

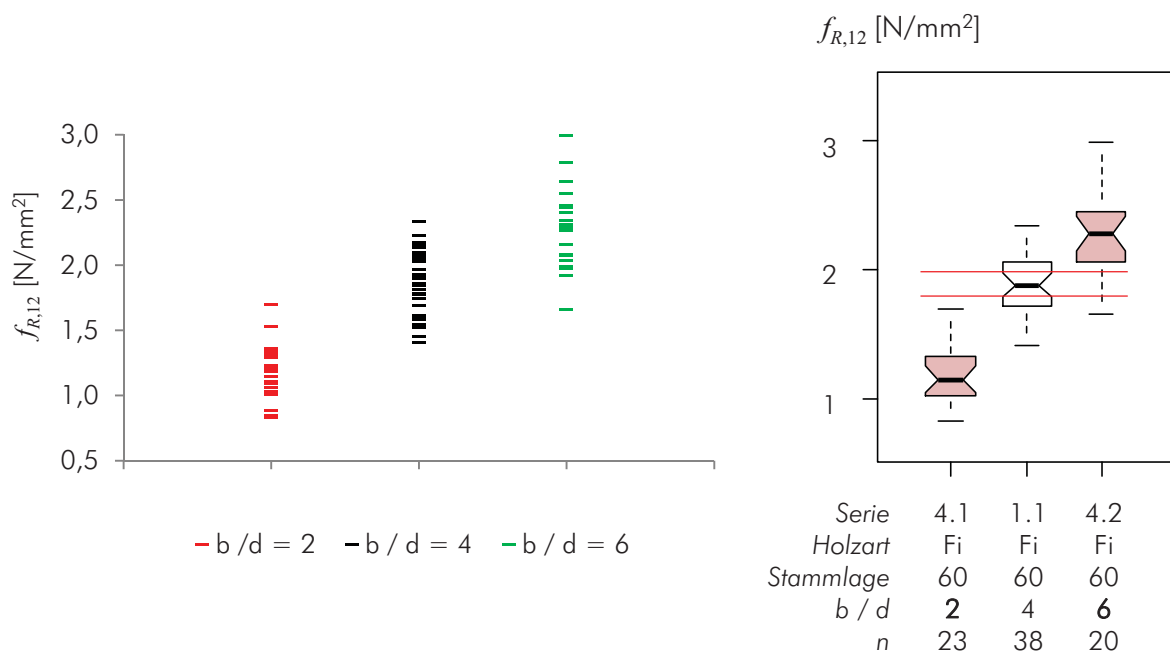


Abb. 4-9: Rollschubfestigkeit vs.  $b / d$ -Verhältnis, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Die durchgeführten statistischen Tests (t-Test, Wilcoxon-Mann-Whitney-Test) bestätigen die signifikanten Unterschiede der Mittelwerte und Mediane der verschiedenen Brettgeometrie.

Durch die Auswahl der Bretter kann annähernd identes Material angenommen werden; Prüfkörper der Serien 4.i wurden aus benachbarten Brettabschnitten gewonnen, was auch die Rohdichte von im Mittel  $439 / 459 / 459 \text{ kg/m}^3$  für die Serien 1.1 / 4.1 / 4.2 widerspiegelt.

Auch hinsichtlich der Steifigkeit gehen höhere  $b / d$ -Verhältnisse einher mit höheren Kennwerten: In Serie 4.1 ergeben sich im Mittel Moduln in der Höhe von 68 % jener der Referenzserie; umgekehrt liegen die der Serie 4.2 um fast 50 % über der Referenzserie 1.1 (Abb. 4-10).

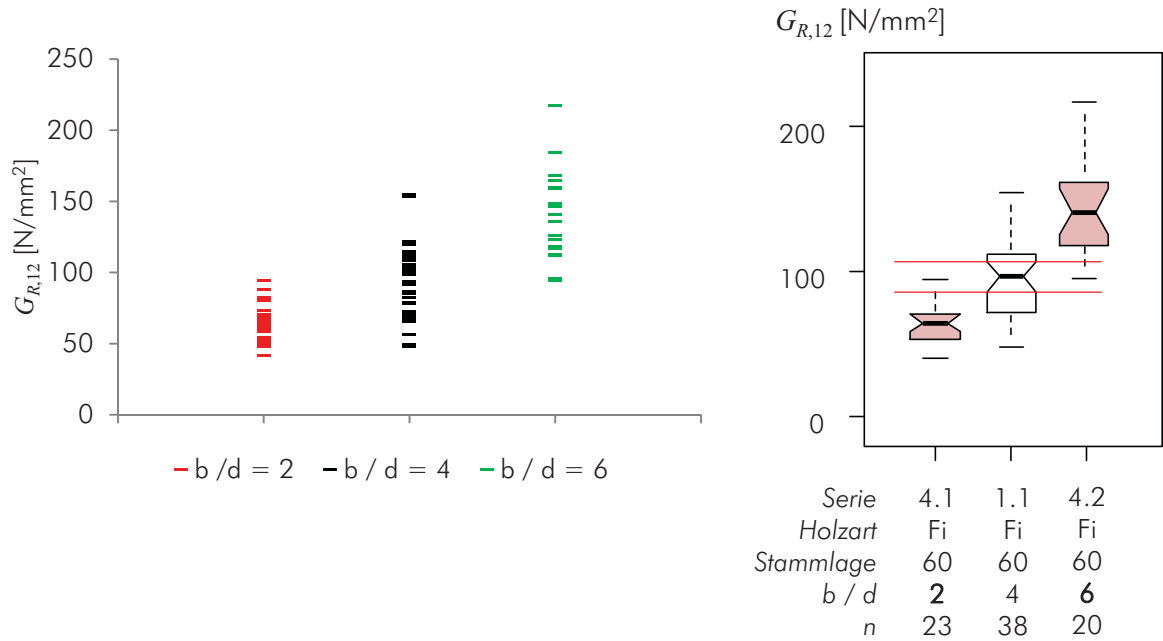


Abb. 4-10: Rollschubmodul vs. *b / d*-Verhältnis, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Der beobachtbare geringe Modul in Serie 4.1 ( $b / d = 2$ ) muss aber zumindest teilweise auch durch den Jahrringverlauf der Prüfkörper erklärt werden: Durch die zentrische Position im Stamm befinden sich bei Brettern mit geringeren Breiten weniger Jahrringe mit diagonaler ( $45^\circ$ ) Orientierung (Abb. 4-11) d. h. die Jahrringlage ändert sich mit abnehmender Brettbreite von nahezu „Halbrift“ zu „liegend“. Wie bereits in [31], [32] oder [33] sowie unter Abschnitt 1.3.3 festgestellt wurde, tragen aber besonders Jahrringe mit einer Neigung zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ$  zur Erhöhung des Rollschubmoduls bei.

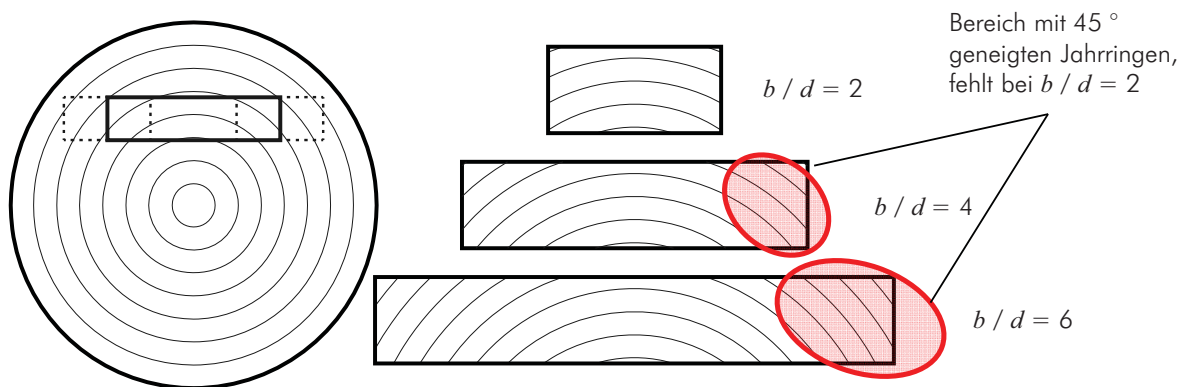


Abb. 4-11: Unterschiedlich großer Anteil an Halbrift-Jahrringen bei geändertem *b / d*-Verhältnis

Um dieser Vermutung nachzugehen, wird ein weiterer Vergleich gezogen: Serie 3.2 ( $r = 100 \text{ mm}$ ) weist mit  $\alpha_{mw} = 16^\circ$  eine sehr ähnliche mittlere Jahrringneigung wie Serie 4.1 ( $15^\circ$ ) auf und eignet sich deshalb zur Abklärung des Einflusses der geometrischen Verhältnisse (Abb. 4-12).

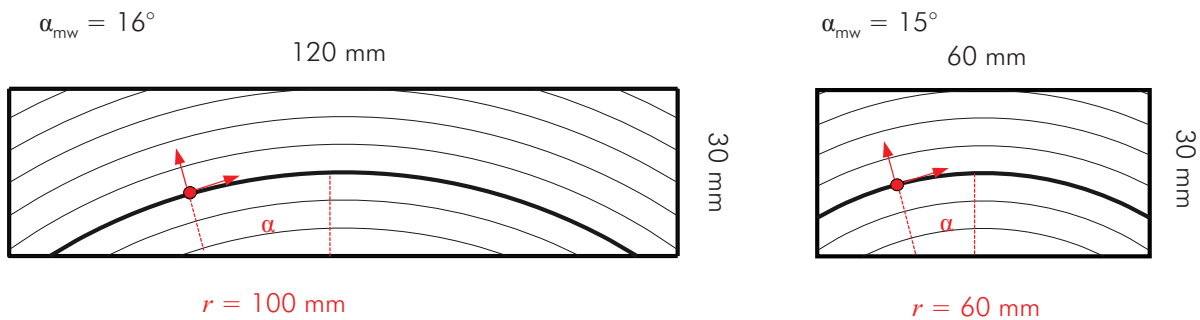


Abb. 4-12: Schnittmuster, Brettgeometrie und mittlere Jahrringneigung der Serien 3.2 (links) und 4.1 (rechts)

Der mittlere Rollschubmodul der Serie 1.1 liegt bei 95, jener der Serie 3.2 ( $r = 100 \text{ mm}$ ) bei 53 und für Serie 4.1 ( $b / d = 2$ ) bei  $65 \text{ N/mm}^2$ . Trotz der unterschiedlichen  $b / d$ -Verhältnisse lassen sich bei ähnlicher mittlerer Jahrringlage also Rollschubmoduln auf ähnlichem Niveau beobachten, der Unterschied beträgt in diesem Fall rd. 20 %. Die große Differenz der Moduln der Serien 4.1, 1.1 und 4.2 kann also nicht durch die geänderte Brettgeometrie, sondern muss durch die Jahrringneigung der Proben erklärt werden.

Für die Festigkeiten ergibt sich ein anderes Bild: Jene der Serie 3.2 liegen auf gleichem Niveau wie die der Referenzserie ( $1,86 / 1,88 \text{ N/mm}^2$ ), für ein  $b / d$ -Verhältnis von zwei lassen sich allerdings nur Festigkeiten von  $1,16 \text{ N/mm}^2$  ermitteln. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Reduktion der Festigkeit primär durch das reduzierte  $b / d$ -Verhältnis hervorgerufen wird.

In Hinblick auf BSP haben diese Ergebnisse besondere Relevanz für das verwendete Verfahren bei der Flächenverklebung: Kommt bei der Herstellung von BSP-Produkten das bereits in Abschnitt 1.1.2.2 erwähnte Vakuumverfahren zum Einsatz, so stellen die dabei erforderlichen Entlastungsnuten planmäßige Schwächungen der Querschichten dar. An Stelle der Brettbreite muss daher der Nutenabstand für die Ermittlung des  $b / d$ -Verhältnisses angesetzt werden. Um die zu verklebenden Flächen dicht genug aneinander zu bringen, ist der mögliche Nutenabstand stark begrenzt, d. h. das  $b / d$ -Verhältnis entspricht in etwa jenem der Serie 4.1 dieser Studie.

Für Querschichten aus Fichtenholz, die in vakuumgepressten BSP-Produkten Einsatz finden, wird daher eine Reduktion der 5 %-Fraktilewerte der Rollschubfestigkeit ( $f_{R,0,05}$ ) auf  $0,80 \text{ N/mm}^2$  vorgeschlagen, was in etwa 60 % der Festigkeit von nutenfreien Brettern entspricht.

## 4.5 Rollschubeigenschaften in Mehrbrett-Systemen

Durch den Vergleich der Serien 5.i und 1.1 können Systemeffekte unter Rollschubbeanspruchung festgestellt werden.

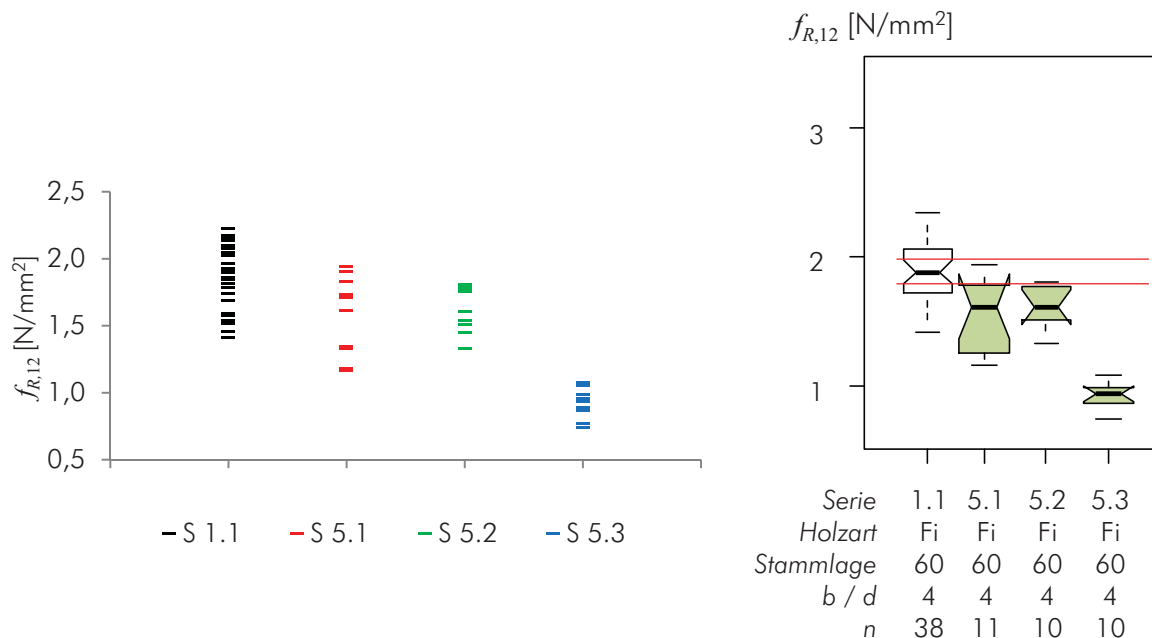


Abb. 4-13: Rollschubfestigkeiten unterschiedlicher Systeme, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Bei den rein parallel wirkenden Systemen (Serie 5.1 und 5.2) unterscheiden sich die Festigkeiten bereits von jenen der Prüfungen von einzelnen Brettern; es ist im Mittel ein Abfall von rd. 15 % festzustellen (Abb. 4-13). Die durchgeführten statistischen Tests bestätigen zwar die unterschiedliche Höhe der Festigkeiten dieser Serien im Vergleich zur Referenzserie, ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Serien kann allerdings nicht festgestellt werden (Tab. 4-9).

Tab. 4-9: Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests für den Vergleich der Mittelwerte und Mediane von Rollschubfestigkeiten unterschiedlicher Mehrbrett-Systeme ( $p$ -Werte,  $\alpha = 5\%$ )

$f_{R,i,\text{mean}}$	Serie	1.1	5.1	5.2	5.3
T-Test	1.1	=	<0,001	< 0,001	< 0,001
	5.1	< 0,001	=	0,380	< 0,001
	5.2	< 0,001	0,380	=	< 0,001
	5.3	< 0,001	< 0,001	< 0,001	=
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	1.1	=	0,003	0,004	< 0,001
	5.1	0,003	=	0,672	< 0,001
	5.2	0,004	0,672	=	< 0,001
	5.3	< 0,001	< 0,001	< 0,001	=

Noch stärker ausgeprägt ist der Festigkeitsabfall, wenn neben paralleler Schaltung von Brettern auch ein seriell System, wie es bei Serie 5.3 (4 x 3) der Fall ist, gebildet wird. Hier liegen die beobachtbaren Rollschubfestigkeiten im Mittel bei nur noch etwa 50 % von jenen der Einzelbrettprüfungen bzw. bei rund 60 % von jenen der rein parallelen Systeme. Durch die teilweise serielle Anordnung lässt sich eine Verminderung der Festigkeiten zwar erklären, nicht aber in der festge-

stellten Höhe; sämtliche Prüfkörper versagten bereits vor Erreichen der in Referenzserie 1.1 beobachteten minimalen Werte ( $f_{R,12,5.1,max} < f_{R,12,1.1,min}$ ). Eine eindeutige Homogenisierung der Rollschubfestigkeiten aufgrund der Systembildung kann serienübergreifend nicht beobachtet werden, die CoV-Werte von Serie 1.1 (14 %), 5.1 (20 %), 5.2 (10 %) und 5.3 (12 %) liegen auf annähernd selben Niveau.

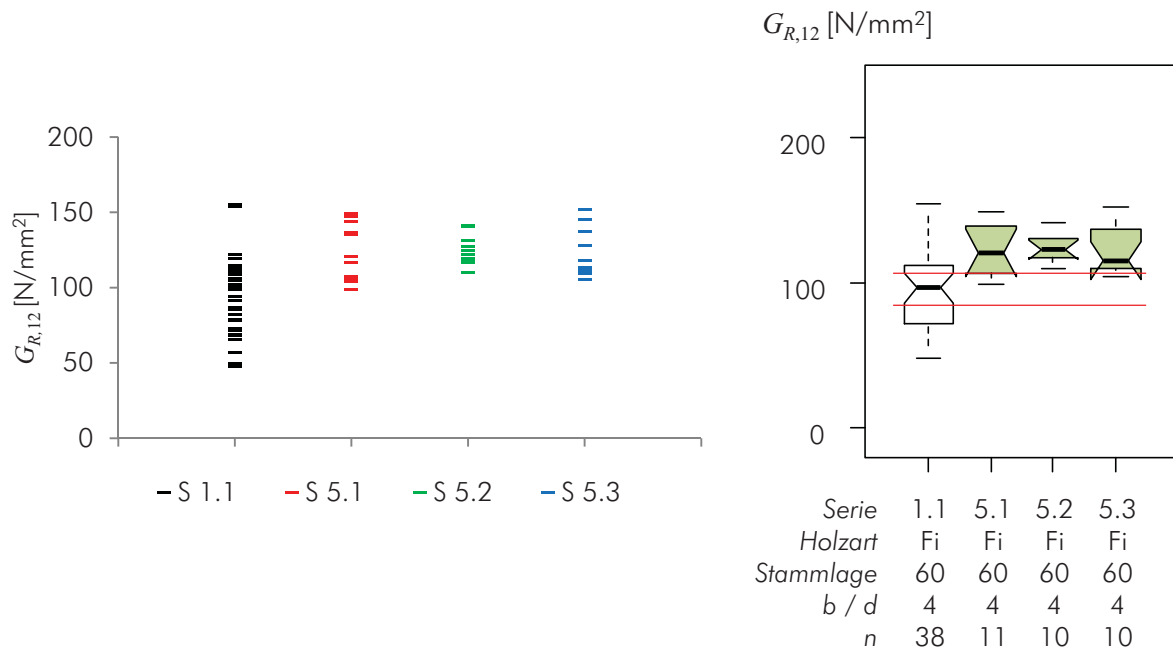


Abb. 4-14: Rollschubmoduln unterschiedlicher Systeme, Einzelergebnisse (links) und Box-Plots (rechts)

Aus statistischer Sicht scheint eine Reduktion der Festigkeiten um 8 bis 10 % durch den Effekt der seriellen Anordnung plausibel. Die verbleibende Differenz wird der Prüfkongfiguration zugeschrieben: Die zur Lastaufbringung dienenden – größtenteils aus Buche in geringem Ausmaß auch aus Eschenholz gefertigten (siehe Abschnitt 2.2.2) – Laschen werden in Faserlängsrichtung belastet und weisen im Vergleich zum dazwischenliegenden, querorientierten Fichtenholz deutlich größere Steifigkeiten auf. Das Versagen der Prüfkörper tritt im Allgemeinen dann ein, wenn die Bruchverformung bzw. -verzerrung des Fichtenholzes erreicht wird. Es wird also nicht in erster Linie die vorhandene Spannung, sondern vielmehr die auftretende Verzerrung der Probe als möglicherweise maßgebend für den Versagenseintritt betrachtet.

Jene Bereiche des geprüften Holzes die sich nahe der Laschen befinden, werden durch diese stabilisiert bzw. durch die transversale Anordnung dieser (Verstärkung) im Grenzbereich hinsichtlich einer freien Verzerrung behindert. Es ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Brettstärke der Prüfkörper bzw. mit zunehmender Anzahl der seriell agierenden Bretter relativ und auf den gesamten Prüfkörper bezogen ein geringerer Stabilisierungseffekt zum Tragen kommt.

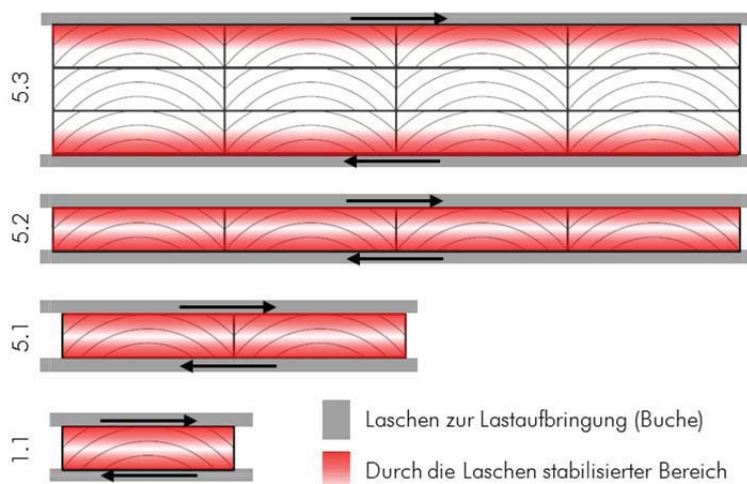


Abb. 4-15: Stabilisierung der äußeren Bereiche durch die steiferen Laschen (qualitatives Modell)

Umgelegt auf die untersuchten Prüfkongfigurationen bedeutet dies, dass für die Serien 1.1, 5.1 und 5.2 aufgrund der gleichbleibenden Prüfholzstärke von einem konstanten Stabilisierungseffekt ausgegangen werden kann. Die innere Brettlage der Serie 5.3 ist hingegen weitgehend frei deformierbar; ein bruchauslösender Verzerrungszustand stellt sich also bereits bei geringeren Spannungen ein. Abb. 4-15 soll den erläuterten Effekt sowie qualitativ den Anteil der stabilisierten Bereiche am gesamten Prüfkörper veranschaulichen. Der ermittelte Rollschubmodul war in sämtlichen Systemserien signifikant höher als er für die Referenzserie 1.1 festgestellt werden konnte (Tab. 4-10 und Abb. 4-14).

Tab. 4-10: Ergebnisse der durchgeführten Signifikanztests für den Vergleich der Mittelwerte und Mediane von Rollschubmoduln unterschiedlicher Mehrbrett-Systeme ( $p$ -Werte,  $\alpha = 5\%$ )

$G_{Ri,i,mean}$	Serie	1.1	5.1	5.2	5.3
T-Test	1.1	=	0,003	0,002	0,005
	5.1	0,003	=	0,787	0,911
	5.2	0,002	0,787	=	0,658
	5.3	0,005	0,911	0,658	=
Wilcoxon-Mann-Whitney-Test	1.1	=	0,003	< 0,001	< 0,003
	5.1	0,003	=	0,833	0,918
	5.2	< 0,001	0,833	=	0,472
	5.3	0,003	0,918	0,472	=

Die Serien 5.i untereinander verglichen weisen nahezu idente Rollschubmoduln auf, überraschender Weise stimmen jene der Serie 5.1 in Höhe und Verteilung nahezu exakt mit jenen der Serie 5.3 überein. (Abb. 4-14 und Tab. 4-10). Eine Reduktion des CoV von 29 % in Serie 1.1 auf zw. 8 und 14 % der Serien 5.i zeugt von einer systembedingten Homogenisierung des Rollschubmoduls und kann mit zwischenzeitlichen Lastumlagerungen auf steifere Bereiche erklärt werden.

In Hinblick auf BSP kann die Steigerung der Rollschubmoduln bei Prüfkörpern der Serie 5.1 und 5.2 dahingehend verstanden werden, dass die mittleren Moduln ( $G_{R,mean}$ ) durch eine Schmalseitenverklebung um rd. 20 % auf 120 N/mm<sup>2</sup> ansteigen und dieser Produktionsschritt diesbezüglich vorteilhaft scheint. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass mögliche Quell- und Schwindvorgänge bzw. daraus resultierende Rissbildung diesen Effekt gegebenenfalls aufheben können.

## 4.6 Verlauf der Rollschubeigenschaften entlang des Brettes

Durch die in Abschnitt 3.2 (Tab. 3-2) angegebenen Werte der Rohdichte für die untersuchten Bretter der Serie 1.2 wurde bereits die im Vergleich zur Referenzserie wesentlich geringere Streuung innerhalb einzelner Bretter vorweggenommen.

In Abb. 4-16 ist die  $\rho_{12}$ -Verteilung der Bretter aus Serie 1.2, sowie zum Vergleich der Mittelwert der Referenzserie und die Intervalle  $\pm \sigma$  (68,3 %),  $\pm 2 \sigma$  (95,4 %) und  $\pm 3 \sigma$  (99,7 %) dargestellt. Das unterschiedliche Niveau der Rohdichte verschiedener Bretter ist augenscheinlich; sämtliche Werte befinden sich jedoch innerhalb des von Kollmann [8] angegebenen Rohdichtebereiches für Fichte von zwischen 325 und 670 kg/m<sup>3</sup> bei einer nach ÖNORM EN 384 [39] umgerechneten Holzfeuchtigkeit von 12 %.

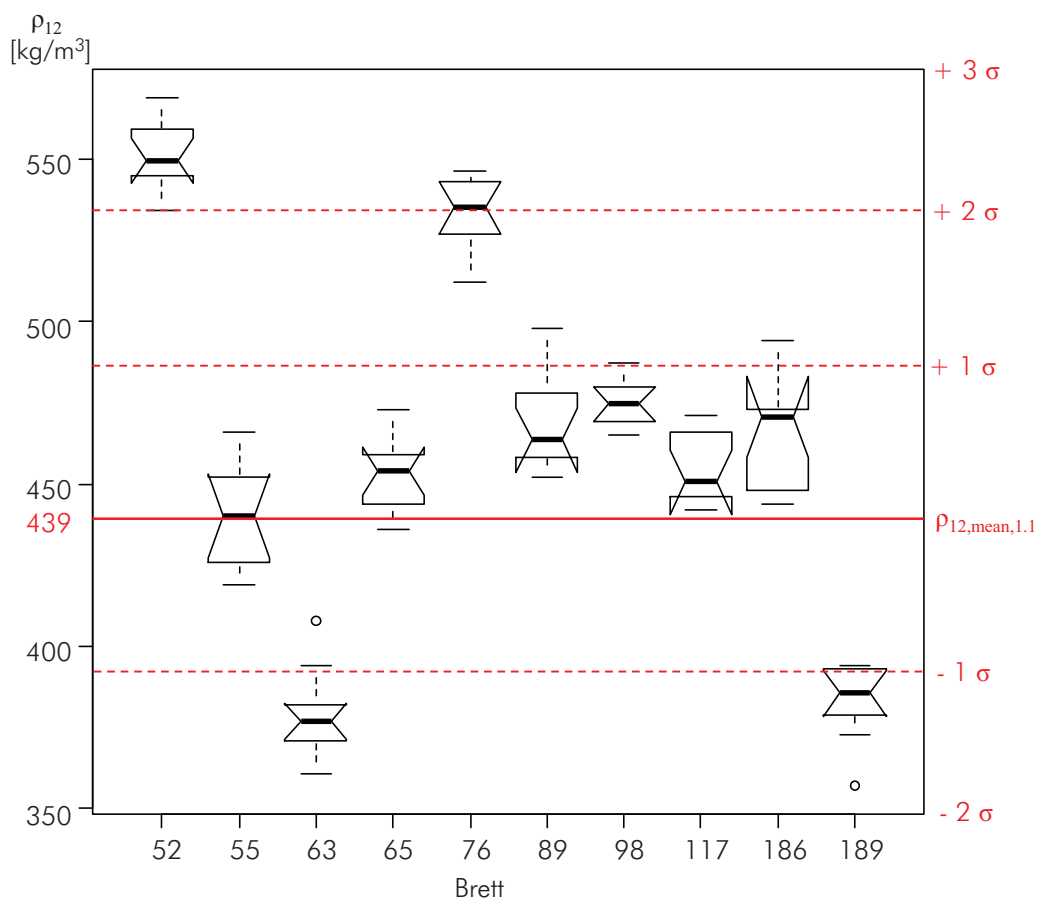


Abb. 4-16: Verteilung der Rohdichte in den untersuchten Brettern, Serie 1.2

Innerhalb der Bretter ändert sich die Rohdichte nur geringfügig, jedoch nahezu kontinuierlich, wie Abb. 4-17 veranschaulicht.



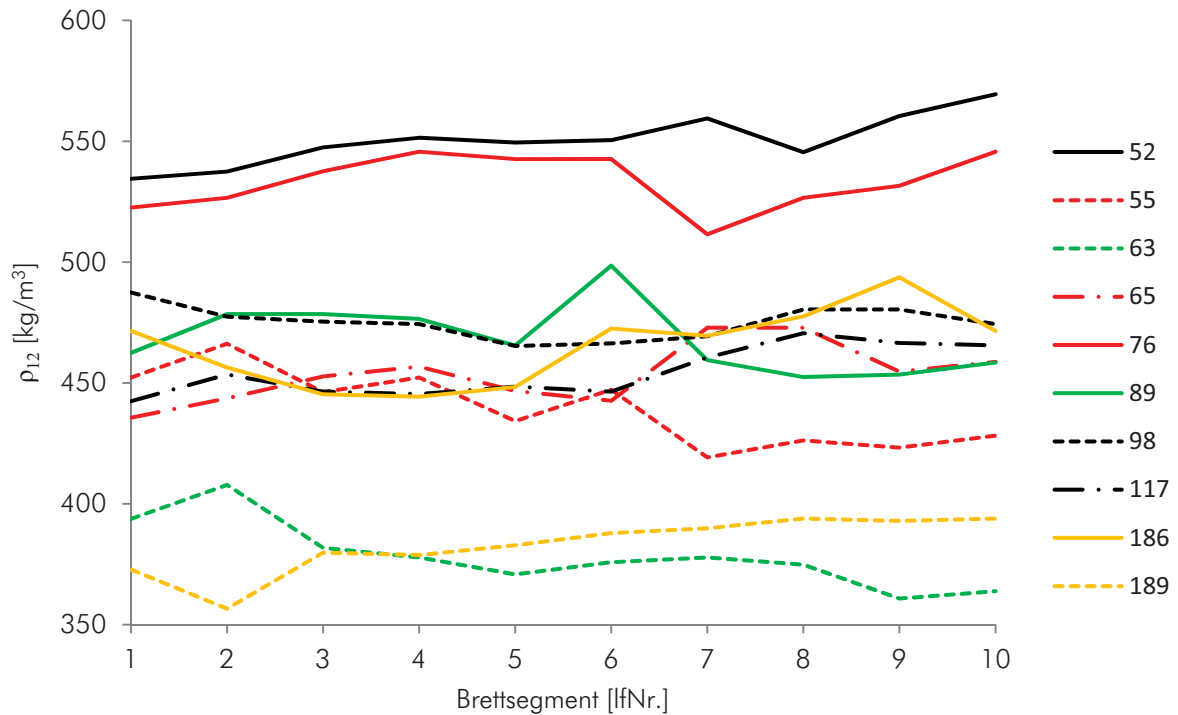


Abb. 4-17: Verlauf der Rohdichte in den untersuchten Brettern, Serie 1.2

Die Streuung der Rollschubfestigkeit innerhalb der Bretter (Abb. 4-18) ist ähnlich groß wie in Referenzserie 1.1, in der ausschließlich Prüfkörper aus unterschiedlichen Brettern untersucht wurden (siehe Abschnitt 3.2). Prüfkörper aus den Brettern 52, 89 und 76 weisen sowohl die höchste Rohdichte wie auch Festigkeit auf; umgekehrt geht die niedrige Rohdichte der Bretter 63 und 189 einher mit unterdurchschnittlicher Rollschubfestigkeit, was den in Abschnitt 4.2 diskutierten Einfluss tendenziell bekräftigt.

Im Verlauf der Rollschubfestigkeit entlang eines Brettes kann kein genereller Trend festgestellt werden (Abb. 4-19). Lediglich für Brett 52 wird eine annähernd kontinuierliche Zu- bzw. Abnahme der Festigkeiten über die Brettlänge beobachtet.

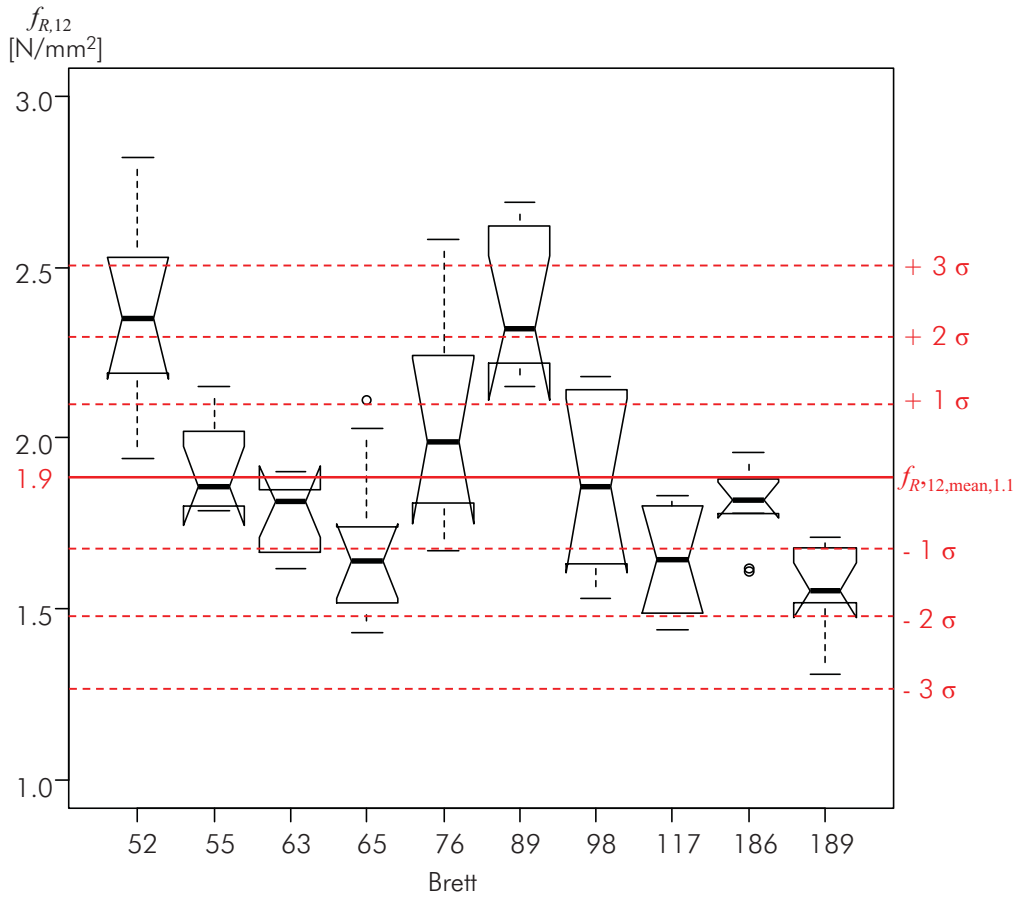


Abb. 4-18: Verteilung der Rollschubfestigkeit in den untersuchten Brettern, Serie 1.2

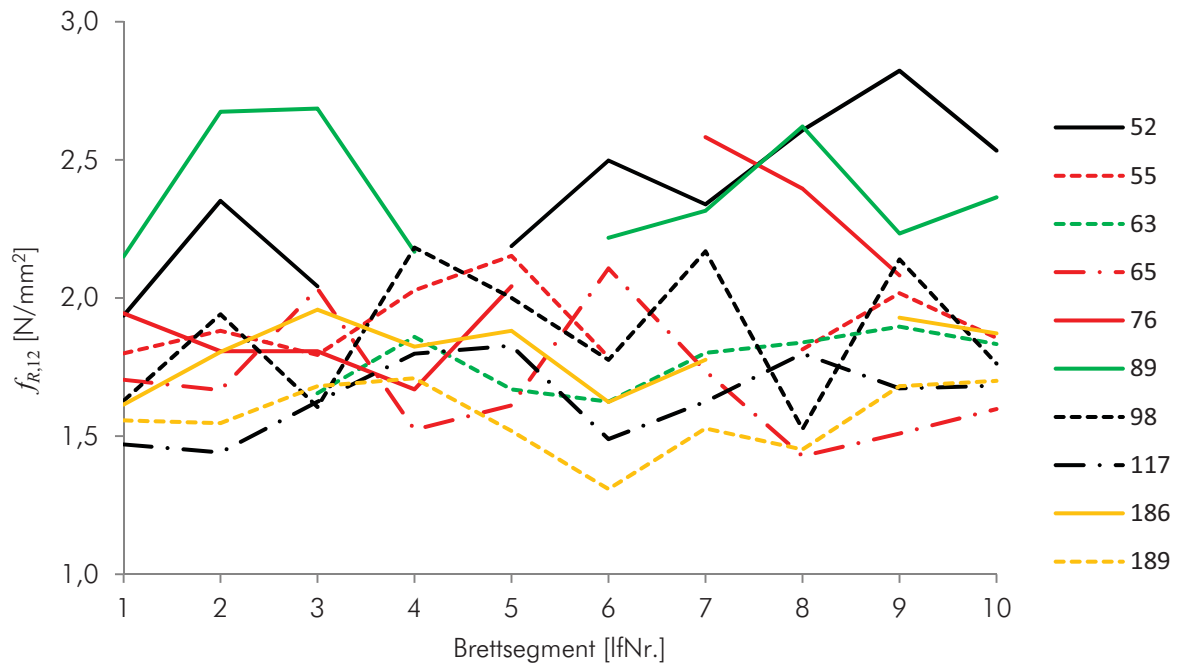


Abb. 4-19: Verlauf der Rollschubfestigkeit entlang der untersuchten Bretter, Serie 1.2

Bei acht von zehn Brettern der Serie 1.2 liegen die Rollschubmoduln über dem Niveau der Referenzserie, wobei die Streuung bei der Betrachtung einzelner Bretter wesentlich reduziert wird (Abb. 4-20).

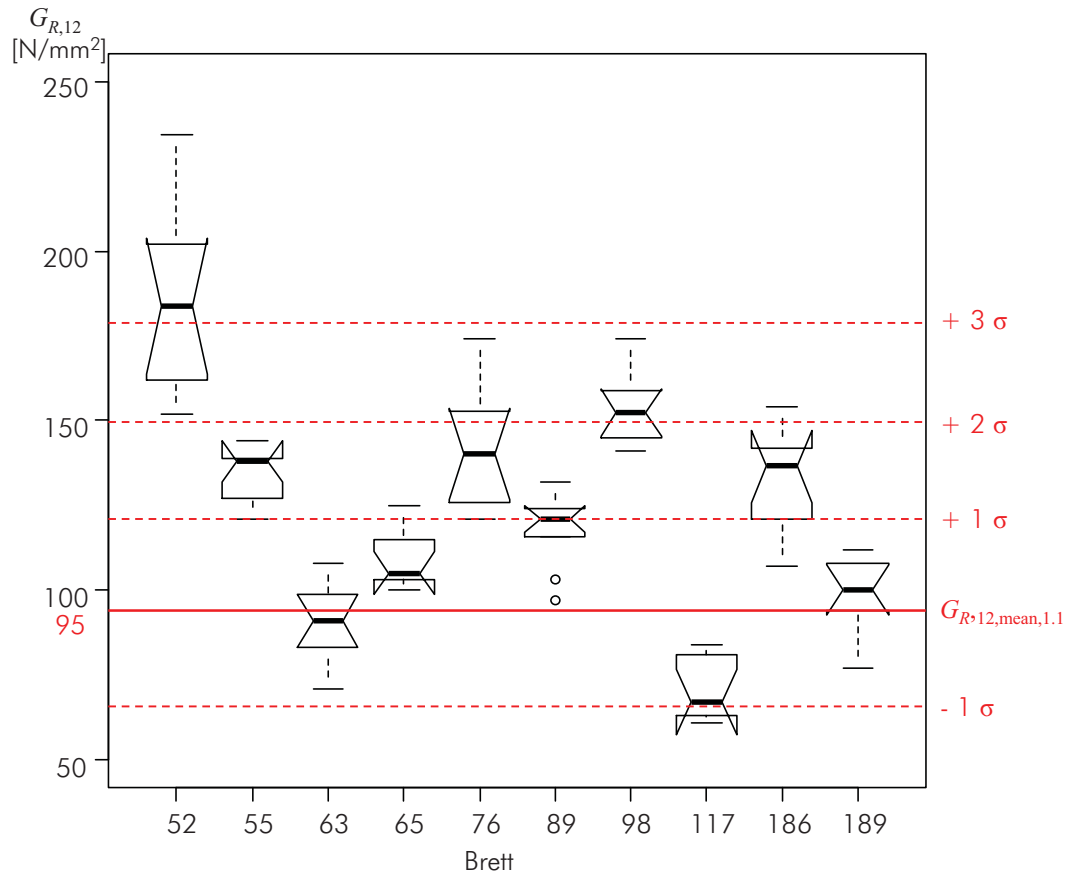


Abb. 4-20: Verteilung des Rollschubmoduls in den untersuchten Brettern, Serie 1.2

Nur bei drei der zehn Bretter kann ein Trend zu- bzw. abnehmender Rollschubmoduln über die Länge beobachtet werden. Dieser zeigt sich besonders stark für die Bretter 117 und 52, deutlich weniger ausgeprägt für das Brett 189. Die restlichen Bretter bzw. Prüfkörper lassen diesbezüglich keinen Zusammenhang erkennen.

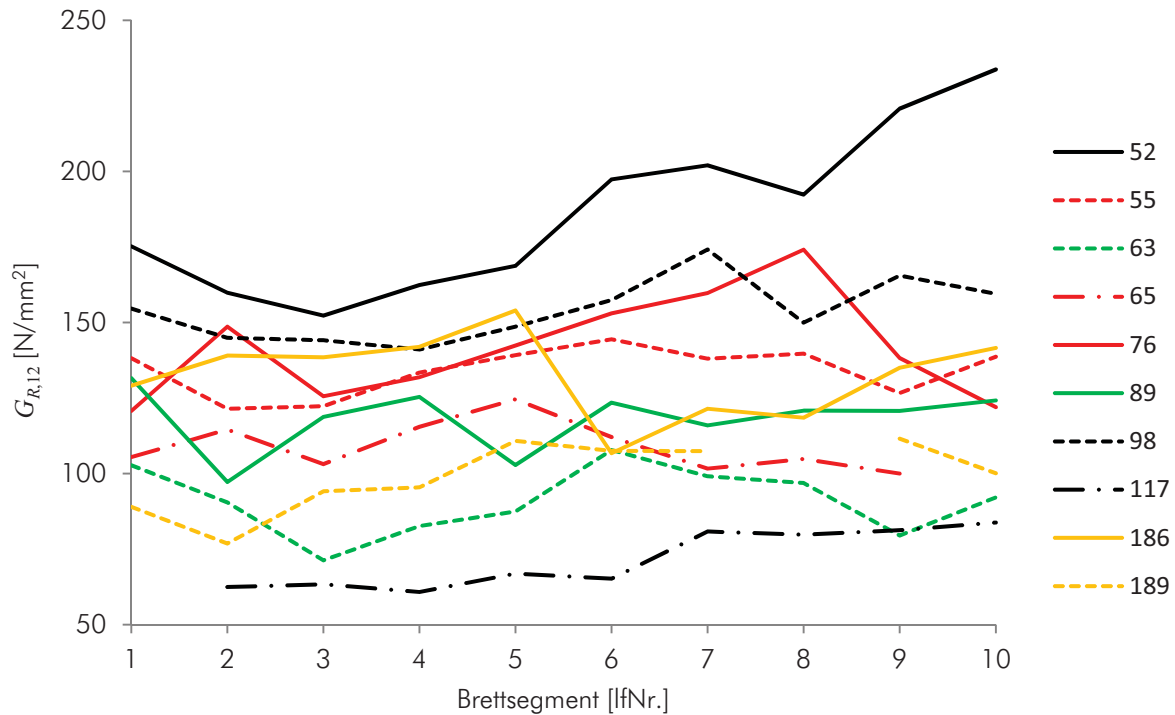


Abb. 4-21: Verlauf des Rollschubmoduls entlang der untersuchten Bretter, Serie 1.2

$$CoV = \frac{\sqrt{\frac{1}{10} \cdot (s_1^2 + \dots + s_{10}^2)}}{\frac{1}{10} \cdot (\bar{x}_1 + \dots + \bar{x}_{10})} [\%] \quad \text{Gl. (4-5)}$$

$\bar{x}_i$  ... Mittelwert von ( $\rho_{12} / f_{R,12} / G_{R,12}$ ) des Brettes  $i$

$s_i$  ... Standardabweichung von ( $\rho_{12} / f_{R,12} / G_{R,12}$ ) des Brettes  $i$

Tab. 4-11: Streuung der einzelnen Bretter bzw. Serie 1.2 gesamt im Vergleich zur Referenzserie

	CoV		
	Serie 1.1	Serie 1.2-gesamt	Serie 1.2-Brett
$\rho_{12}$	11 %	12 %	3 %
$f_{R,12}$	13 %	17 %	11 %
$G_{R,12}$	29 %	28 %	11 %

In Tab. 4-11 sind die Variationskoeffizienten der Referenzserie 1.1, der Serie 1.2 gesamt und durchschnittliche je Brett nach Gl. (4-5) einander gegenübergestellt. Da die Serien 1.1 und 1.2 aus demselben Material hergestellt wurden, ist bei Gesamtbetrachtung die Streuung sämtlicher Eigenschaften sehr ähnlich. Wird die mittlere Streuung der Eigenschaften für einzelne Bretter betrachtet, so lässt sich die deutlich geringere Variation von Rohdichte und Rollschubmodul, jedoch nahezu unveränderte Streuung der Festigkeit feststellen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für  $\rho_{12}$  und  $G_{R,12}$  die Struktur und Eigenschaften eines Brettes über dessen Volumen gemittelt Bedeutung haben, während für  $f_{R,12}$  das jeweils „schwächste Glied“ der Probe ausschlaggebend ist.

## 4.7 Zusammenhang von Rollschubfestigkeit und -modul

Werden Rollschubmodul und -festigkeit sämtlicher (Einzel-) Prüfkörper einander gegenübergestellt, so ist der starke globale Zusammenhang der beiden mechanischen Eigenschaften deutlich sichtbar (Abb. 4-22). Wird zur funktionellen Beschreibung des Zusammenhanges eine Potenzfunktion gewählt, da beide Parameter als log-normalverteilt angenommen werden können, stellt dies die mathematisch korrekte Vorgehensweise dar (siehe Abschnitt 2.5.3), so ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,84, d. h. die beiden Parameter sind stark affin. Unter Anwendung einer einfachen Regressionsanalyse lässt sich ein noch höheres Korrelationsmaß von 0,92 ermitteln.

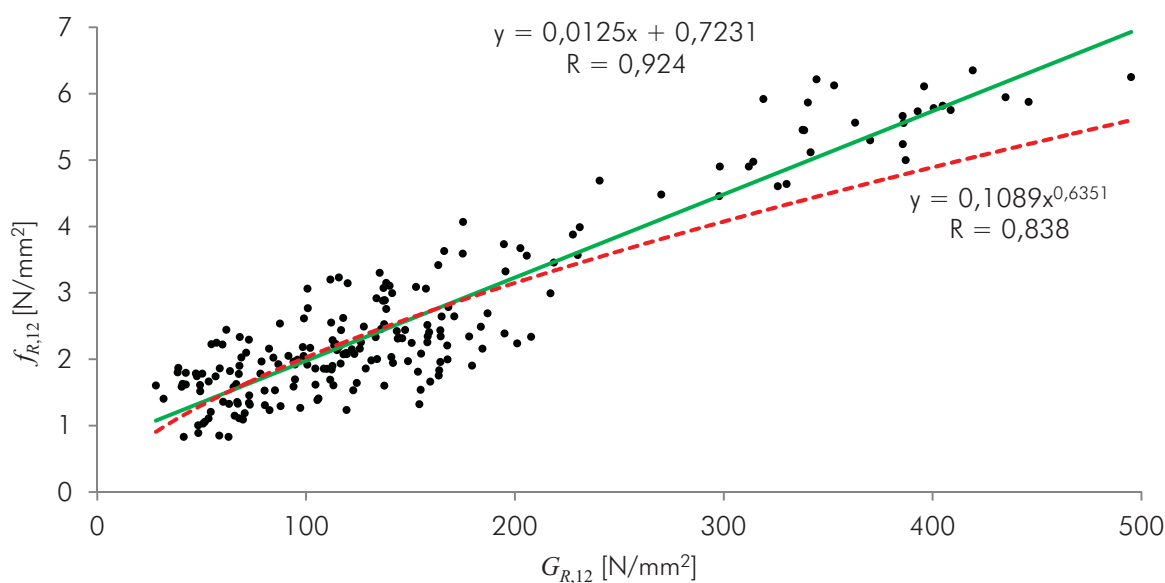


Abb. 4-22: Rollschubmodul vs. -festigkeit, serienübergreifend

Den bisherigen Ausführungen liegt eine globale, serienübergreifende Betrachtung zugrunde. Werden die Korrelationen serienspezifisch analysiert, so ist der Zusammenhang der beiden Parameter nicht für sämtliche Holzarten, geometrische Verhältnisse und Jahrringlagen eindeutig feststellbar (Abb. 4-23).

In Tab. 4-12 sind die gefundenen Regressionsgleichungen sowie die zugehörigen Bestimmtheitsmaße sämtlicher Serien angegeben.

Für Fichtenholz lässt sich keine generelle Aussage über die Höhe des Korrelationsmaßes treffen. Während für die Referenzserie 1.1, wie auch schon bei der Untersuchung des Einflusses der Rohdichte auf die Rollschubeigenschaften (Abschnitt 4.2), nur ein sehr geringer Zusammenhang der beiden Größen festgestellt werden kann ( $R = 0,17$ ), deuten die Ergebnisse für Serie 3.i (geänderte Jahrringlage) und 4.i (geändertes  $b/d$ -Verhältnis) sehr wohl auf eine Affinität hin. In den Mehrbrett-System-Serien 5.i ist mit  $R = 0,59$  der Zusammenhang in Serie 5.2 am größten.

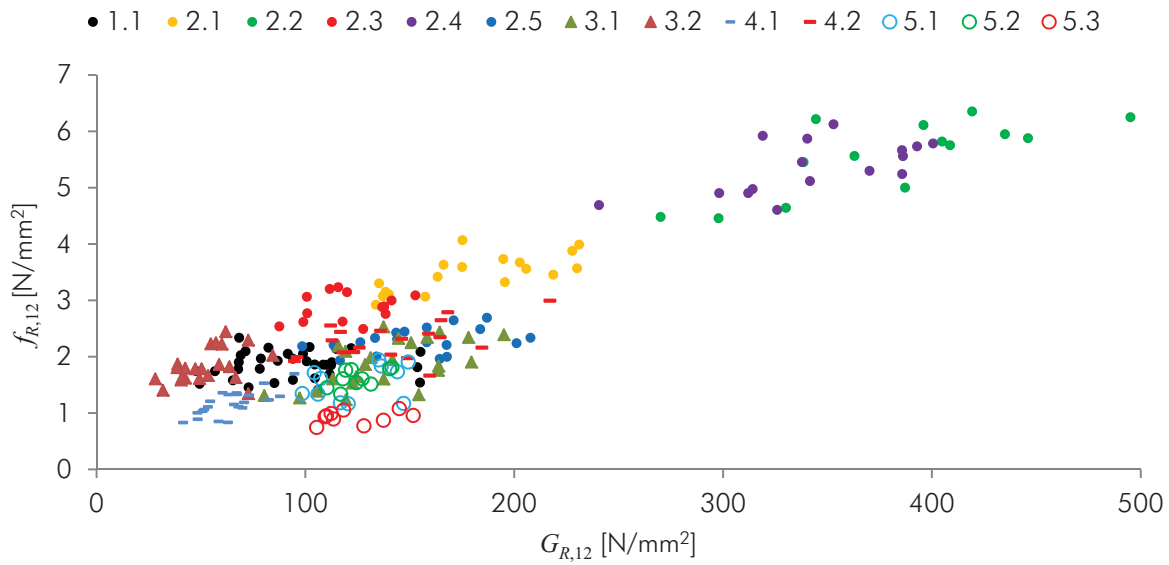


Abb. 4-23: Rollschubmodul vs. -festigkeit, nach Serien getrennt

Bei Kiefer und Pappel ist der Zusammenhang mit  $R = 0,37$  bzw.  $0,28$  relativ gering, bei Buche mit  $0,61$  bereits deutlich höher. Die höchsten Korrelationen von  $0,79$  bzw.  $0,74$  sind in dieser Studie für Esche und Birke festzustellen.

Tab. 4-12: Funktioneller Zusammenhang von Rollschubmodul und -festigkeit

$G_{R,12} = f(f_{R,12}) \text{ [N/mm}^2\text{]}$				
Serie	Holzart	Funktion	$R^2$	R
1.1	Fichte	$y = 1,3169 x^{0,0761}$	0,03	0,17
2.1	Birke	$y = 0,5371 x^{0,3602}$	0,55	0,74
2.2	Esche	$y = 0,1571 x^{0,6004}$	0,63	0,79
2.3	Pappel	$y = 1,4318 x^{0,1452}$	0,08	0,28
2.4	Buche	$y = 0,4967 x^{0,4074}$	0,37	0,61
2.5	Kiefer	$y = 0,9350 x^{0,1774}$	0,14	0,37
3.1	Fichte	$y = 0,0676 x^{0,6722}$	0,38	0,62
3.2	Fichte	$y = 0,6872 x^{0,2466}$	0,19	0,44
4.1	Fichte	$y = 0,0732 x^{0,6650}$	0,52	0,72
4.2	Fichte	$y = 0,5967 x^{0,2699}$	0,17	0,41
5.1	Fichte	$y = 0,2056 x^{0,4146}$	0,10	0,31
5.2	Fichte	$y = 0,0432 x^{0,7496}$	0,35	0,59
5.3	Fichte	$y = 0,2666 x^{0,2573}$	0,08	0,28

## 5 CONCLUSIO

Die Rollschubeigenschaften der untersuchten Holzarten Fichte, Kiefer, Esche, Birke, Buche und Pappel erweisen sich als sehr unterschiedlich: Besonders für Buchen- und Eschenholz werden herausragende Rollschubfestigkeiten und -moduln festgestellt, bezogen auf Fichtenholz liegen diese deutlich über anderen mechanischen Eigenschaften. Dies deutet darauf hin, dass unter Rollschubbeanspruchung andere Mechanismen der Holzstruktur wesentlicher sind als bei Zug-, Druck- oder Biegebelastung. Im Vergleich zu Fichtenholz um 25 % höhere Festigkeit und um 50 % höherer mittlerer Rollschubmodul zeigen die Eignung von Pappelholz zur Verwendung in den Querlagen von Brettsperrholzprodukten auf, besonders in Anbetracht des geringen Eigengewichts und der ökonomischen Attraktivität.

Bestätigt werden kann der bereits in numerischen Untersuchungen festgestellte Einfluss der Jahrringlage auf den Rollschubmodul. Mit zunehmendem Abstand vom Mark weisen Bretter bei symmetrischer Lage im Stamm sinkende Moduln auf; der Einsatz von Hauptware bei der Produktion von Brettsperrholz kann demnach als positiv und die Schubsteifigkeit erhöhend angesehen werden. In Abhängigkeit des geometrischen Verhältnisses von Brettbreite zu Brettstärke ändern sich auch die Rollschubeigenschaften; es können signifikante Unterschiede der untersuchten  $b/d$ -Verhältnisse festgestellt werden. Bei einer Steigerung von vier auf sechs erhöhen sich die Festigkeit im Mittel um 20 % und der Modul um 45 %. Werden Brettssysteme einer Rollschubbelastung unterzogen, kann eine starke Reduktion der Streuung der Moduln, nicht jedoch der Festigkeiten beobachtet werden, ebenso bei der Untersuchung von Proben, die einem Brett entnommen wurden. Aufgrund der möglichen zwischenzeitlichen Lastumlagerungen auf steifere Bereiche sind für die Höhe des Rollschubmoduls die mechanischen Eigenschaften des gesamten Prüfkörpers ausschlaggebend. Die Festigkeit hingegen ist determiniert durch lokale „Störstellen“.

In Hinblick auf Brettsperrholz wird dieser Prüfstudie folgend für Hauptwareneinschnitt bei einem  $b/d$ -Verhältnis von vier eine charakteristische Rollschubfestigkeit ( $f_{R,k}$ ) von 1,40 N/mm<sup>2</sup> sowie ein mittlerer Rollschubmodul ( $G_{R,mean}$ ) von 95 N/mm<sup>2</sup> vorgeschlagen. Für Seitenware mit großem Blochdurchmesser muss von geringeren Moduln, aber ähnlichen Festigkeiten ausgegangen werden. Entlastungsnuten, wie sie bei der Flächenpressung mittels Vakuumverfahren notwendig sind, stellen eine Verringerung des  $b/d$ -Verhältnisses dar. Eine Reduktion der Rollschubfestigkeit für mit diesem Verfahren hergestellte BSP-Produkte um rd. 40 % auf 0,80 N/mm<sup>2</sup> scheint deshalb sinnvoll. Die Ergebnisse der Systemversuche lassen darauf schließen, dass schmalseitenverklebte BSP-Produkte um bis zu 20 % höhere mittlere Rollschubmoduln besitzen, ein Wert von 110 bis 120 N/mm<sup>2</sup> für Fichtenholz lässt sich in dieser Studie feststellen.

Die verwendete Prüfkfiguration selbst bewährt sich in dieser Studie: Einfache Herstellung der Prüfkörper, breite Möglichkeiten zur Variation der Materialparameter bzw. der Probengeometrie sowie die simple Adaption auf Systemprüfungen bei gleichzeitig plausiblen und mit Hilfe der durchgeführten FE-Studie abgesicherten Ergebnissen machen sie zu einem sinnvollen Kandidaten zur Ermittlung von (Roll-)Schubeigenschaften. Noch detailliertere Informationen über den Spannungs- bzw. Verzerrungszustand der Probe während der Prüfung könnten darüber hinaus mittels Bildmessungen sehr einfach gewonnen werden.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] proholz, „Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft,“ pro:Holz, [Online]. Available: <http://www.proholz.at/holzarten/>. [Zugriff am 23 August 2014].
- [2] H. J. Braun, Bau und Leben der Bäume, Rombach Wissenschaft, 1998.
- [3] D. Grosser, Die Hölzer Mitteleuropas - Ein mikrophotographischer Lehratlas, München: Verlag Dr. Kessel, 2007.
- [4] Mägdefrau, 1951.
- [5] D. Grosser und W. Teez, „Einheimische Nutzhölzer (Looseblattsammlung),“ Informationsdienst Holz, 1985.
- [6] J. Stupnicki, Strukturmodell der Holzzelle zur Untersuchung von Bruchvorgängen, 1970.
- [7] G. Schickhofer, T. Bogensperger und T. Moosbrugger, BSPHandbuch - Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2010.
- [8] F. Kollmann, Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 1951.
- [9] ÖNORM EN 14081-1, Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1 Allgemeine Anforderungen, 2011.
- [10] ÖNORM DIN 4074-1, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1\_Nadelschnittholz, 2012.
- [11] ÖNORM EN 1912, Bauholz fuer tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten, 2005.
- [12] ÖNORM EN 338, „Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen,“ 2009.
- [13] enBR, „eurocodenahe Bemessungsrichtlinie; Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung,“ holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2007.
- [14] T. Bogensperger und G. Schickhofer, „Präsentation Brettsperrholz: Forschung & Entwicklung, Nachweisverfahren, Einsatzmöglichkeiten und Transfer,“ holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2010.



- [15] R. Brandner, „Modern Products and Solutions for the structural Use of Wood (Roofs and Houses)“ Presentation, Building with Wood Seminar, Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University,“ 2010.
- [16] R. Brandner, „Präsentation Brettsperrholz: Technologie und Anwendung,“ TU Graz, Internationales Holzbau Seminar, Volyne, 2011.
- [17] Z. Wang, H. Fu, Y.-H. Chui und M. Gong, „Feasibility of Using Poplar as Cross Layer to Fabricate Cross-Laminated Timber,“ 2014.
- [18] ÖNORM EN 301, „Klebstoffe fuer tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste - Klassifizierung und Leistungsanforderungen,“ 2006.
- [19] ÖNORM EN 15425, „Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis fuer tragende Zwecke - Klassifizierung und Leistungsanforderungen,“ 2008.
- [20] ÖNORM EN 386, „Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung,“ 2002.
- [21] Hasslacher Norica Timber, [Online]. Available: <http://www.hasslacher.at/de/holzwerkstoffe/brettsperrholz/>. [Zugriff am 20 August 2014].
- [22] „AZI SRL,“ [Online]. Available: <http://de.woodwindow.ro>. [Zugriff am 20 August 2014].
- [23] G. Schickhofer, Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten flächenhaften Holzstrukturen, 1994.
- [24] Entwurf ÖNORM EN 16351-1:2012, Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen.
- [25] G. Schickhofer und J. Angerer, „Straßenbrücken aus Holz - Ausgeführte Beispiele,“ Technische Universität, Graz, 1999.
- [26] ÖNORM EN 1991-1-1, Nutzlasten im Hochbau.
- [27] T. Bogensperger und T. Moosbrugger, „Schubkorrekturfaktoren für geschichtete Querschnitte,“ TU Graz, 2005.
- [28] ÖNORM EN 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung, 2010.
- [29] B. A. Bendtsen, „Rolling Shear Characteristics of Nine Structural Softwoods,“ *Forest Products Journal*, Nr. No. 11, 1976.

- [30] H. Werner, „Tragfähigkeit von Holz-Verbindungen mit stoffähnlichen Verbindungsmitteln unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen,“ 1993.
- [31] R. Görlacher, „Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz,“ *Holz als Roh und Werkstoff*, Nr. 60, 2002.
- [32] S. Aicher und G. Dill-Langer, „Basic Considerations to Rolling Shear Modulus in Wooden Boards,“ *Otto-Graf-Journal*, Nr. 11, 2001.
- [33] A. Jakobs, „Zur Berechnung von Brettlagenholz mit starrem und nachgiebigem Verbund unter plattenartiger Belastung unter besonderer Berücksichtigung des Rollschubes und der Drillweichheit,“ Universität der Bundeswehr, München, 2005.
- [34] I. Feichter, Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Masterarbeit TU Graz, 2013.
- [35] F. H. Neuhaus, „Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit,“ Ruhr Universität, Bochum, 1981.
- [36] A. Scholz, „Schub beim Brettsperrholz,“ *Bauen mit Holz*, Nr. 5, 2001.
- [37] P. Mestek, Punktgestützte Flachentragwerke aus Brettsperrholz - Schubbemessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen, München, 2011.
- [38] H. Kreuzinger und A. Scholz, „Schubtragverhalten von Brettsperrholz; Forschungsvorhaben - Schlussbericht,“ 2001.
- [39] ÖNORM EN 384, Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte, 2010.
- [40] R. Brandner, W. Gatterig und G. Schickhofer, „Determination of shear strength of structural and glued laminated timber,“ Graz, 2012.
- [41] H. Hörig, Tafeln  $R(p)$  und  $Q(p)$  zur Berechnung der Gleitzahlen  $S_{44}$ ,  $S_{55}$ ,  $S_{66}$  und der maximalen Tangentialspannungen aus Drillungsmessungen an Stäben aus rhombischen Stoffen bei Rechteckquerschnitt, Berlin: Technischer Verlag H. Cram, 1957.
- [42] ÖNORM EN 408, „Bauholz für tragende Zwecke und Brettchichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften,“ 2012.
- [43] I. Hassel, B. P. Berard, S. Modén und L. Berglund, „The Single Cube Apparatus for Shear

Testing - Full-Field Strain and Finite Element Analysis of Wood in Transverse Shear," *Composites Science and Technology*, Nr. 69, 2009.

- [44] N. Iosipescu, „New accurate procedure for single shear testing," 1967.
- [45] J. F. Dumail, K. Olofsson und L. Salmén, „An Analysis of Rolling Shear of Spruce Wood by the Iosipescu," *Holzforschung*, Nr. Nr. 4, 2000.
- [46] J. Xavier, M. Oliveira, J. Morais und T. Pinto, „Measurement of the shear properties of clear wood by the arcan shear test," *Holzforschung*, Nr. Vol. 63, 2009.
- [47] H. J. Blaß und R. Görlacher, „Zum Trag- und Verformungsverhalten von LIGNOTREND-Decken- und Wandsystemen aus Nadelschnittholz".
- [48] E. Gehri, „Korrespondenz mit R. Steiger zu Rollschubeigenschaften".
- [49] ABAQUS 6.11, Dassault Systèmes.
- [50] R, Version 2.12.0, 2010.
- [51] Microsoft Excel 2010.
- [52] ÖNORM EN 13183-1, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1\_Bestimmung durch Darrverfahren, 2004.
- [53] ÖNORM ISO 3131, Holz, Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen, 1996.
- [54] ÖNORM EN 789, „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen," 2005.
- [55] R. Brandner, *Stochastic System Actions and Effects in Engineered Timber Products and Structures*, Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2012.
- [56] ÖNORM B 3012, „Holzarten-Kennwerte zu den Bennennungen und Kurzzeichen der ÖNORM EN 13556," 2003.

## 7 ANHANG

Bei den nachfolgend aufgelisteten Ergebnissen handelt es sich um den bereinigten Datensatz, d.h. technologische und statistische Ausreißer wurden bereits eliminiert.

mit: NA ... not available; Daten wurden nicht ermittelt

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1.1	Fichte	11_01	55	405	26,73	284	2,10	71	75
1.1	Fichte	11_02	60	404	26,47	255	2,08	120	123
1.1	Fichte	11_03	50	405	24,53	226	1,93	87	88
1.1	Fichte	11_04	60	422	24,20	191	1,90	113	114
1.1	Fichte	11_05	65	510	25,02	175	1,96	94	100
1.1	Fichte	11_08	55	527	23,11	123	1,81	154	155
1.1	Fichte	11_09	65	522	28,41	191	2,23	114	120
1.1	Fichte	11_10	45	459	26,57	184	2,09	155	158
1.1	Fichte	11_11	60	413	19,35	235	1,52	49	56
1.1	Fichte	11_12	60	421	27,66	195	2,17	102	103
1.1	Fichte	11_13	55	446	22,20	337	1,74	57	62
1.1	Fichte	11_14	60	494	27,40	180	2,15	122	126
1.1	Fichte	11_15	60	428	19,53	117	1,53	85	86
1.1	Fichte	11_16	50	463	24,45	200	1,92	101	105
1.1	Fichte	11_17	60	515	20,13	157	1,58	65	77
1.1	Fichte	11_19	45	376	26,13	185	2,05	92	94
1.1	Fichte	11_20	45	448	19,64	107	1,54	155	156
1.1	Fichte	11_21	60	386	24,23	305	1,90	68	69
1.1	Fichte	11_22	60	383	20,23	156	1,59	94	100
1.1	Fichte	11_23	60	425	22,22	250	1,74	48	52
1.1	Fichte	11_24	65	373	22,73	255	1,78	78	84
1.1	Fichte	11_25	50	386	27,23	262	2,14	115	116
1.1	Fichte	11_26	60	459	23,53	245	1,85	112	116
1.1	Fichte	11_28	55	459	23,71	165	1,86	104	110
1.1	Fichte	11_29	60	412	18,55	202	1,46	73	77
1.1	Fichte	11_30	65	477	23,65	233	1,86	110	113
1.1	Fichte	11_31	60	389	25,83	278	2,03	69	71
1.1	Fichte	11_32	70	426	17,95	169	1,41	106	116
1.1	Fichte	11_33	65	544	25,06	245	1,97	79	83
1.1	Fichte	11_34	60	460	23,68	246	1,86	109	116
1.1	Fichte	11_35	45	420	26,10	164	2,05	99	103
1.1	Fichte	11_36	60	470	21,56	261	1,69	112	121
1.1	Fichte	11_37	60	447	27,52	204	2,16	82	89
1.1	Fichte	11_38	50	367	20,60	173	1,62	105	112
1.1	Fichte	11_39	50	394	22,65	239	1,78	68	73
1.1	Fichte	11_41	65	473	29,75	306	2,34	68	72

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.1	Birke	21_01	60	659	49,64	266	3,99	231	235
2.1	Birke	21_02	70	615	42,75	159	3,46	219	223
2.1	Birke	21_03	65	624	44,33	232	3,56	206	213
2.1	Birke	21_04	45	568	37,06	634	2,95	NA	NA
2.1	Birke	21_06	65	588	40,06	299	3,15	138	138
2.1	Birke	21_07	60	608	45,66	237	3,59	175	181
2.1	Birke	21_08	80	592	41,73	334	3,30	135	142
2.1	Birke	21_10	40	660	48,27	192	3,88	228	232
2.1	Birke	21_11	60	642	41,76	222	3,33	196	222
2.1	Birke	21_13	45	594	46,01	262	3,68	203	210
2.1	Birke	21_14	45	640	44,56	226	3,57	230	247
2.1	Birke	21_15	40	593	46,46	274	3,73	195	196
2.1	Birke	21_16	50	654	42,42	242	3,42	163	173
2.1	Birke	21_17	60	548	36,90	233	2,92	134	144
2.1	Birke	21_18	45	586	38,73	198	3,07	157	168
2.1	Birke	21_19	75	668	51,27	318	4,07	175	181
2.1	Birke	21_20	45	598	45,32	207	3,63	166	172
2.1	Birke	21_21	80	607	39,20	270	3,07	137	150
2.1	Birke	21_23	55	575	39,38	204	3,11	140	149

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.2	Esche	22_01	55	708	72,99	284	5,57	363	374
2.2	Esche	22_02	60	875	79,54	331	6,35	419	428
2.2	Esche	22_03	65	747	56,85	326	4,46	298	336
2.2	Esche	22_04	50	734	57,76	261	4,64	330	369
2.2	Esche	22_06	60	815	74,96	238	5,88	446	464
2.2	Esche	22_07	60	840	74,45	280	5,82	405	421
2.2	Esche	22_09	40	861	79,22	305	6,25	495	508
2.2	Esche	22_11	65	764	57,33	266	4,48	270	299
2.2	Esche	22_12	65	816	76,09	285	5,95	435	452
2.2	Esche	22_16	80	823	74,76	277	5,75	409	425
2.2	Esche	22_20	45	785	78,18	333	6,11	396	409
2.2	Esche	22_21	65	792	78,54	387	6,22	344	354
2.2	Esche	22_22	75	835	64,37	316	5,00	387	410
2.2	Esche	22_23	50	771	70,17	357	5,45	339	360

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.3	Pappel	23_02	60	460	39,95	269	3,00	141	144
2.3	Pappel	23_03	70	508	39,93	258	3,06	101	104
2.3	Pappel	23_04	55	487	37,42	261	2,89	138	142
2.3	Pappel	23_05	60	435	33,85	197	2,54	88	93
2.3	Pappel	23_06	40	468	40,41	243	3,09	153	159
2.3	Pappel	23_07	60	443	37,14	507	2,85	NA	NA
2.3	Pappel	23_08	60	471	36,90	249	2,76	138	144
2.3	Pappel	23_09	45	494	41,87	276	3,20	112	115
2.3	Pappel	23_10	40	425	34,29	224	2,62	118	124
2.3	Pappel	23_11	50	479	33,89	194	2,62	99	106
2.3	Pappel	23_13	75	523	41,63	258	3,23	116	122
2.3	Pappel	23_16	50	393	32,79	296	2,49	128	134
2.3	Pappel	23_19	55	424	36,33	257	2,77	101	106
2.3	Pappel	23_20	45	442	37,70	211	2,88	137	142
2.3	Pappel	23_23	75	488	40,75	221	3,15	120	123
2.3	Pappel	23_24	70	463	37,76	274	2,89	138	143

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.4	Buche	24_01	70	663	62,75	278	4,69	241	258
2.4	Buche	24_02	50	738	76,85	273	5,79	401	410
2.4	Buche	24_04	80	724	70,89	272	5,46	338	353
2.4	Buche	24_08	70	723	65,09	326	4,98	314	322
2.4	Buche	24_10	50	720	68,84	276	5,30	370	382
2.4	Buche	24_11	80	698	64,95	245	4,91	298	312
2.4	Buche	24_12	60	697	61,60	226	4,61	326	344
2.4	Buche	24_14	55	724	73,88	273	5,56	386	388
2.4	Buche	24_15	40	730	79,19	287	5,92	319	329
2.4	Buche	24_16	45	730	69,86	251	5,24	386	398
2.4	Buche	24_17	75	719	66,72	236	5,12	342	363
2.4	Buche	24_18	85	737	73,15	267	5,67	386	401
2.4	Buche	24_19	75	761	63,52	233	4,91	312	328
2.4	Buche	24_20	45	674	80,59	302	6,13	353	362
2.4	Buche	24_21	80	766	75,94	259	5,74	393	406
2.4	Buche	24_23	75	711	77,48	269	5,87	340	351

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
2.5	Kiefer	25_01	65	508	31,95	477	2,44	147	152
2.5	Kiefer	25_02	55	500	28,61	275	2,21	168	171
2.5	Kiefer	25_03	70	512	29,15	599	2,26	126	130
2.5	Kiefer	25_04	50	441	25,73	262	2,00	168	168
2.5	Kiefer	25_05	60	539	32,30	433	2,52	158	165
2.5	Kiefer	25_06	45	504	34,66	324	2,69	187	185
2.5	Kiefer	25_09	60	519	25,87	403	2,00	134	137
2.5	Kiefer	25_10	65	531	24,69	328	1,94	117	120
2.5	Kiefer	25_11	70	519	29,75	435	2,31	144	146
2.5	Kiefer	25_12	65	512	29,33	451	2,26	158	160
2.5	Kiefer	25_14	75	538	28,06	483	2,21	114	115
2.5	Kiefer	25_15	40	507	28,57	237	2,24	201	201
2.5	Kiefer	25_16	65	555	33,66	410	2,65	171	175
2.5	Kiefer	25_17	60	496	32,35	320	2,49	184	188
2.5	Kiefer	25_19	70	534	29,94	509	2,33	133	137
2.5	Kiefer	25_20	40	570	25,24	205	1,96	164	186
2.5	Kiefer	25_21	80	552	28,04	474	2,19	99	101
2.5	Kiefer	25_22	40	512	30,28	243	2,34	208	210
2.5	Kiefer	25_23	55	541	31,13	403	2,43	143	148

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
3.1	Fichte	31_01	30	407	21,15	252	1,64	124	127
3.1	Fichte	31_02	25	505	16,96	197	1,32	154	158
3.1	Fichte	31_03	25	532	30,36	264	2,39	195	207
3.1	Fichte	31_04	30	531	22,32	234	1,76	164	166
3.1	Fichte	31_06	20	369	17,76	287	1,39	105	115
3.1	Fichte	31_07	40	490	30,25	271	2,35	158	162
3.1	Fichte	31_08	25	483	15,78	309	1,24	119	127
3.1	Fichte	31_09	25	490	16,75	234	1,31	80	89
3.1	Fichte	31_10	40	363	19,90	213	1,53	123	126
3.1	Fichte	31_11	35	361	16,34	192	1,27	97	104
3.1	Fichte	31_12	30	397	23,86	244	1,86	129	132
3.1	Fichte	31_13	40	464	29,11	318	2,25	151	151
3.1	Fichte	31_14	35	500	23,48	252	1,83	164	173
3.1	Fichte	31_16	30	573	23,99	344	1,91	180	183
3.1	Fichte	31_17	30	363	26,64	305	2,10	119	121
3.1	Fichte	31_18	30	444	24,98	254	1,95	142	145
3.1	Fichte	31_19	25	428	30,73	285	2,44	164	168
3.1	Fichte	31_20	30	434	24,49	270	1,90	NA	NA
3.1	Fichte	31_21	35	477	20,33	236	1,60	137	146
3.1	Fichte	31_22	30	371	20,51	290	1,61	113	119

3.1	Fichte	31_23	35	380	27,39	326	2,19	116	120
3.1	Fichte	31_24	25	378	25,14	314	1,99	131	135
3.1	Fichte	31_25	25	503	29,42	259	2,34	178	176
3.1	Fichte	31_26	35	415	29,61	340	2,32	145	145
3.1	Fichte	31_27	35	388	32,15	376	2,53	137	139

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
3.2	Fichte	32_01	95	497	21,98	265	1,78	50	56
3.2	Fichte	32_02	95	415	20,48	610	1,61	49	52
3.2	Fichte	32_04	110	524	26,17	309	2,02	84	87
3.2	Fichte	32_05	110	465	20,05	504	1,61	28	30
3.2	Fichte	32_07	95	538	27,74	364	2,23	55	56
3.2	Fichte	32_08	95	465	20,88	512	1,67	53	62
3.2	Fichte	32_09	100	460	23,59	422	1,87	39	40
3.2	Fichte	32_10	100	487	20,41	227	1,63	67	73
3.2	Fichte	32_11	100	481	28,01	414	2,22	60	62
3.2	Fichte	32_12	90	451	22,96	391	1,82	64	66
3.2	Fichte	32_13	90	408	19,94	528	1,59	40	43
3.2	Fichte	32_14	100	466	23,09	364	1,86	59	61
3.2	Fichte	32_15	90	568	30,03	337	2,45	62	64
3.2	Fichte	32_16	95	460	24,80	573	1,97	NA	NA
3.2	Fichte	32_17	95	435	28,22	515	2,25	57	60
3.2	Fichte	32_18	95	506	16,81	180	1,34	73	79
3.2	Fichte	32_19	95	493	22,71	444	1,81	39	40
3.2	Fichte	32_20	100	525	28,54	513	2,30	73	73
3.2	Fichte	32_21	90	441	20,13	329	1,62	42	46
3.2	Fichte	32_22	110	454	17,59	449	1,40	32	36
3.2	Fichte	32_23	105	473	22,50	334	1,80	42	45
3.2	Fichte	32_24	110	557	22,25	461	1,79	47	49
3.2	Fichte	32_25	100	470	20,40	274	1,63	41	44

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
4.1	Fichte	41_01	45	429	6,88	163	1,09	70	69
4.1	Fichte	41_02	70	467	8,52	170	1,36	67	70
4.1	Fichte	41_03	60	456	8,52	312	1,36	60	60
4.1	Fichte	41_04	50	556	7,00	267	1,11	68	70
4.1	Fichte	41_05	65	382	5,32	275	0,84	NA	NA
4.1	Fichte	41_06	60	526	8,36	267	1,32	73	73
4.1	Fichte	41_07	50	447	8,39	321	1,33	67	68
4.1	Fichte	41_08	60	398	8,40	294	1,33	63	64
4.1	Fichte	41_09	70	448	6,60	317	1,03	51	51



4.1	Fichte	41_10	55	509	7,53	262	1,19	71	71
4.1	Fichte	41_11	50	439	7,20	290	1,15	66	65
4.1	Fichte	41_12	80	395	5,22	328	0,83	41	43
4.1	Fichte	41_13	60	517	5,57	298	0,89	48	49
4.1	Fichte	41_14	45	442	8,14	231	1,30	88	90
4.1	Fichte	41_15	70	476	6,78	333	1,06	52	52
4.1	Fichte	41_16	60	461	9,38	305	1,53	80	81
4.1	Fichte	41_17	60	512	6,86	244	1,11	53	54
4.1	Fichte	41_18	50	403	7,75	133	1,23	83	83
4.1	Fichte	41_19	55	443	5,42	179	0,85	58	55
4.1	Fichte	41_20	60	480	5,24	167	0,83	63	64
4.1	Fichte	41_22	70	454	7,57	363	1,21	54	56
4.1	Fichte	41_23	50	527	10,54	266	1,70	95	96
4.1	Fichte	41_24	60	393	6,41	327	1,01	48	50

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
4.2	Fichte	42_01	45	413	37,27	186	1,97	149	153
4.2	Fichte	42_02	70	469	45,35	264	2,41	159	165
4.2	Fichte	42_05	65	435	36,42	385	1,92	95	100
4.2	Fichte	42_06	60	527	53,16	322	2,79	168	170
4.2	Fichte	42_07	50	459	46,43	251	2,46	136	141
4.2	Fichte	42_08	60	417	38,57	249	2,04	141	151
4.2	Fichte	42_09	70	450	48,99	342	2,55	112	119
4.2	Fichte	42_10	55	508	50,29	260	2,65	165	169
4.2	Fichte	42_11	50	465	39,10	231	2,08	123	130
4.2	Fichte	42_12	80	401	37,54	515	1,99	96	107
4.2	Fichte	42_13	60	509	38,97	214	2,08	118	129
4.2	Fichte	42_14	45	440	42,69	180	2,27	NA	NA
4.2	Fichte	42_15	70	449	43,92	395	2,29	113	121
4.2	Fichte	42_16	60	501	55,05	306	2,99	217	224
4.2	Fichte	42_17	60	487	45,25	341	2,44	117	121
4.2	Fichte	42_18	50	434	44,20	256	2,35	164	167
4.2	Fichte	42_19	55	447	31,83	178	1,66	159	157
4.2	Fichte	42_20	60	459	40,83	257	2,16	184	192
4.2	Fichte	42_22	70	475	43,49	296	2,32	146	153
4.2	Fichte	42_24	60	427	41,33	485	2,16	126	134

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
5.1	Fichte	51_01	NA	424	33,98	288	1,33	106	115
5.1	Fichte	51_02	NA	383	34,28	193	1,35	99	106
5.1	Fichte	51_03	NA	403	43,66	240	1,71	104	112
5.1	Fichte	51_04	NA	420	49,48	235	1,94	135	140
5.1	Fichte	51_05	NA	481	29,65	184	1,16	121	141
5.1	Fichte	51_06	NA	480	46,67	221	1,83	136	142
5.1	Fichte	51_07	NA	470	48,54	316	1,91	149	154
5.1	Fichte	51_08	NA	533	29,77	210	1,17	147	157
5.1	Fichte	51_09	NA	450	44,10	232	1,73	144	150
5.1	Fichte	51_10	NA	457	41,06	213	1,61	107	116
5.1	Fichte	51_11	NA	446	30,08	169	1,18	117	124

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
5.2	Fichte	52_01	NA	448	81,86	232	1,61	118	131
5.2	Fichte	52_02	NA	453	92,09	261	1,81	142	146
5.2	Fichte	52_03	NA	416	81,82	260	1,61	127	129
5.2	Fichte	52_04	NA	402	90,05	255	1,77	122	128
5.2	Fichte	52_05	NA	430	73,70	213	1,45	110	121
5.2	Fichte	52_07	NA	494	91,00	238	1,79	140	150
5.2	Fichte	52_09	NA	465	77,09	236	1,51	131	140
5.2	Fichte	52_10	NA	425	67,91	202	1,33	117	125
5.2	Fichte	52_11	NA	437	78,43	224	1,54	124	136
5.2	Fichte	52_12	NA	437	89,59	264	1,76	119	125

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
5.3	Fichte	53_01	NA	429	47,52	208	0,93	109	117
5.3	Fichte	53_02	NA	483	54,92	277	1,08	145	148
5.3	Fichte	53_03	NA	445	39,26	161	0,77	128	143
5.3	Fichte	53_04	NA	443	48,48	229	0,95	110	119
5.3	Fichte	53_05	NA	474	48,73	227	0,96	152	147
5.3	Fichte	53_06	NA	470	44,34	197	0,87	137	138
5.3	Fichte	53_07	NA	449	45,56	94	0,89	113	119
5.3	Fichte	53_08	NA	444	53,55	234	1,05	118	126
5.3	Fichte	53_09	NA	440	37,90	186	0,74	105	121
5.3	Fichte	53_10	NA	453	50,46	221	0,99	112	117

Serie	Holzart	Prüfkörper	$r$ [mm]	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$t_{Fmax}$ [s]	$f_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{R,12,EN}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
189	Fichte	12_189_01	55	373	20,11	210	1,56	89	96
189	Fichte	12_189_02	55	357	20,02	239	1,55	77	81
189	Fichte	12_189_03	50	380	21,75	256	1,68	94	99
189	Fichte	12_189_04	50	379	22,11	273	1,71	95	100
189	Fichte	12_189_05	55	383	19,68	168	1,52	111	116
189	Fichte	12_189_06	55	388	16,98	139	1,31	108	114
189	Fichte	12_189_07	55	390	19,83	174	1,53	107	110
189	Fichte	12_189_08	50	394	18,80	206	1,45	NA	NA
189	Fichte	12_189_09	50	393	21,80	272	1,68	112	118
189	Fichte	12_189_10	50	394	22,04	243	1,70	100	109
65	Fichte	12_65_01	60	436	21,86	319	1,70	105	112
65	Fichte	12_65_02	60	444	21,38	277	1,67	115	119
65	Fichte	12_65_03	60	453	26,09	297	2,03	103	106
65	Fichte	12_65_04	65	457	19,54	170	1,52	115	120
65	Fichte	12_65_05	65	447	20,67	142	1,61	125	129
65	Fichte	12_65_06	65	443	27,03	250	2,11	112	116
65	Fichte	12_65_07	65	473	22,26	239	1,74	102	107
65	Fichte	12_65_08	65	473	18,32	242	1,43	105	113
65	Fichte	12_65_09	70	455	19,37	330	1,51	100	108
65	Fichte	12_65_10	70	459	20,50	401	1,60	NA	NA
55	Fichte	12_55_01	45	452	22,32	132	1,80	138	147
55	Fichte	12_55_02	45	466	23,33	152	1,88	121	126
55	Fichte	12_55_03	45	446	22,25	307	1,79	122	126
55	Fichte	12_55_04	45	452	25,16	298	2,03	133	138
55	Fichte	12_55_05	45	434	26,70	281	2,15	139	144
55	Fichte	12_55_06	45	447	22,16	208	1,79	144	146
55	Fichte	12_55_07	45	419	30,28	380	NA	138	140
55	Fichte	12_55_08	45	426	22,51	231	1,81	140	144
55	Fichte	12_55_09	45	423	25,03	248	2,02	127	128
55	Fichte	12_55_10	45	428	23,02	220	1,86	139	141
63	Fichte	12_63_01	55	394	17,47	173	NA	103	110
63	Fichte	12_63_02	55	408	19,00	152	NA	90	90
63	Fichte	12_63_03	60	382	20,41	227	1,66	71	79
63	Fichte	12_63_04	60	378	22,93	309	1,86	83	84
63	Fichte	12_63_06	65	371	20,58	274	1,67	87	91
63	Fichte	12_63_07	60	376	20,03	182	1,62	108	113
63	Fichte	12_63_08	60	378	22,21	279	1,80	99	106
63	Fichte	12_63_09	60	375	22,67	304	1,84	97	103
63	Fichte	12_63_10	60	361	23,38	334	1,90	80	84
63	Fichte	12_63_11	60	364	22,61	311	1,83	92	96
76	Fichte	12_76_01	60	523	24,45	370	1,94	121	125
76	Fichte	12_76_02	60	527	22,73	268	1,81	149	153
76	Fichte	12_76_03	60	538	22,74	334	1,81	126	130
76	Fichte	12_76_04	60	546	21,03	262	1,67	132	140
76	Fichte	12_76_05	60	543	25,75	396	2,04	142	144
76	Fichte	12_76_06	55	543	17,07	127	NA	153	158
76	Fichte	12_76_07	55	512	32,47	415	2,58	160	164
76	Fichte	12_76_08	50	527	30,22	259	2,40	174	177
76	Fichte	12_76_09	50	532	26,17	296	2,08	138	142
76	Fichte	12_76_10	50	546	19,57	230	NA	122	126
186	Fichte	12_186_01	50	472	20,96	212	1,61	129	134

186	Fichte	12_186_02	50	456	23,34	312	1,80	139	142
186	Fichte	12_186_03	50	445	25,29	309	1,96	138	142
186	Fichte	12_186_04	50	444	23,66	244	1,82	142	142
186	Fichte	12_186_05	50	448	24,39	235	1,88	154	152
186	Fichte	12_186_06	55	473	21,03	315	1,62	107	112
186	Fichte	12_186_07	60	469	22,98	334	1,78	121	124
186	Fichte	12_186_08	60	478	18,40	219	NA	119	124
186	Fichte	12_186_09	60	494	24,95	263	1,93	135	138
186	Fichte	12_186_10	60	472	24,19	262	1,87	142	144
117	Fichte	12_117_01	80	442	19,52	609	1,47	NA	NA
117	Fichte	12_117_02	80	453	18,87	609	1,44	62	69
117	Fichte	12_117_03	75	446	20,78	266	1,62	63	69
117	Fichte	12_117_04	75	445	22,99	342	1,80	61	65
117	Fichte	12_117_05	75	448	23,40	355	1,83	67	69
117	Fichte	12_117_06	75	446	19,02	285	1,49	65	72
117	Fichte	12_117_07	75	461	20,76	184	1,62	81	86
117	Fichte	12_117_08	70	471	23,01	247	1,80	80	85
117	Fichte	12_117_09	65	467	21,45	312	1,67	81	88
117	Fichte	12_117_10	65	466	21,48	283	1,68	84	90
52	Fichte	12_52_01	55	534	23,81	295	1,94	175	184
52	Fichte	12_52_02	55	537	28,91	383	2,35	160	162
52	Fichte	12_52_03	55	547	25,11	289	2,04	152	158
52	Fichte	12_52_04	55	551	20,81	185	NA	162	167
52	Fichte	12_52_05	55	549	26,90	294	2,19	169	172
52	Fichte	12_52_06	50	550	30,71	311	2,50	197	201
52	Fichte	12_52_07	50	559	28,76	272	2,34	202	207
52	Fichte	12_52_08	50	545	32,05	328	2,61	192	195
52	Fichte	12_52_09	45	560	34,70	329	2,82	221	226
52	Fichte	12_52_10	45	569	31,15	235	2,53	234	231
89	Fichte	12_89_01	55	462	26,75	268	2,15	132	135
89	Fichte	12_89_02	55	478	33,27	232	2,67	97	99
89	Fichte	12_89_04	55	478	33,42	249	2,69	119	121
89	Fichte	12_89_05	60	476	26,97	174	2,17	125	129
89	Fichte	12_89_06	60	465	20,59	186	NA	103	108
89	Fichte	12_89_07	60	498	27,60	183	2,22	123	129
89	Fichte	12_89_08	65	459	28,81	227	2,32	116	120
89	Fichte	12_89_09	65	452	32,62	257	2,62	121	123
89	Fichte	12_89_10	65	453	27,79	208	2,23	121	125
89	Fichte	12_89_11	65	458	29,42	474	2,36	124	127
98	Fichte	12_98_01	35	487	20,76	227	1,63	155	159
98	Fichte	12_98_02	35	477	24,75	273	1,94	145	148
98	Fichte	12_98_03	35	475	20,47	225	1,61	144	149
98	Fichte	12_98_04	35	474	27,83	150	2,18	141	143
98	Fichte	12_98_05	35	465	25,51	130	2,00	149	149
98	Fichte	12_98_06	35	466	22,64	254	1,78	157	161
98	Fichte	12_98_07	35	469	27,66	328	2,17	174	171
98	Fichte	12_98_08	35	480	19,45	344	1,53	150	156
98	Fichte	12_98_09	40	480	27,28	301	2,14	166	165
98	Fichte	12_98_10	40	474	22,47	156	1,76	159	160



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

Institutskenzahl:

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