

Ausgewählte mechanische Eigenschaften von Furnier der Holzarten Fichte, Birke und Buche

M-4-04/2015



Robert Staudacher
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Robert Staudacher, BSc

Ausgewählte mechanische Kennwerte von Fichten-, Buchen- und Birkenfurnier

MASTERARBEIT

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

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer
Dipl.-Ing. Markus Grabner
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Juni 2015

„Es muss der Tag kommen, an dem man genormte Holzwinkel, Sparbalken, T- und andere Profile aus Furnieren genauso kaufen kann wie Stahlprofile.“

(Fischer, 1941)

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 Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer möchte ich mich recht herzlich für die persönlichen Gespräche bedanken und dass er mich mit seiner begeisternden Art in seinen Vorlesungen überhaupt erst zum Holzbau gebracht hat.

Für die Betreuung und Korrektur der Arbeit möchte ich mich recht herzlich bei meinem Betreuer Dipl. Ing. Markus Grabner bedanken.

Für die Vorbereitung und Durchführung der Prüfungen, sowie die lustigen Stunden in der Werkstatt, möchte ich mich bei Bernd Heissenberger, unseren Tischlermeister, bedanken.

Mein größter Dank gilt allerdings meiner Familie, vor allem euch, Mama und Papa, die ihr mir – nicht nur während des Studiums – sehr viel Freiraum zur Entfaltung meiner Interessen gegeben habt und mich in all meinen Entscheidungen stets unterstützt habt. Danke, für alles was ihr für mich getan habt. Aber auch meinen drei Schwestern Karin, Dagmar und Jutta gilt großer Dank an dieser Stelle. Danke, dass ich euch habe!

Natürlich möchte ich mich bei all meinen Freunden und dem Zeichensaal bedanken. Ohne euch wäre die Studienzeit nur halb so schön und lustig gewesen. Ich werde diese Zeit niemals vergessen.

Danke auch an Markus Loik, mit dem ich viele gemeinsame Stunden im Labor und vor dem PC verbracht habe, sowie an meine Schwester Karin fürs Korrekturlesen dieser Arbeit.

Snaddy, over and out!



Staudacher

Einer checkt's, ein anderer nicht!

Kurzfassung

Im Sinne einer verantwortungsvollen Nutzung natürlicher Ressourcen gewinnt auch der Einsatz furnierbasierter Werkstoffe aus Laubholz zunehmend an Bedeutung. Im Vergleich zu herkömmlichen Einschnittstechnologien zur Fertigung von Schnittware, können durch den Auftrennprozess des „Schälens“ höhere Materialausbeuten am Rundholz realisiert werden. Vor allem die hohen mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften einiger Laubholzarten (z.B.: Birke, Buche), gegenüber den im Holzbau häufig eingesetzten Nadelhölzern, machen diese für einen Einsatz im konstruktiven Bereich interessant. Eine derartige Verwendung von Laubhölzern ist nicht neu und bereits in den 1920-iger Jahren wurden Furnierschicht- und Furniersperrholz erfolgreich im Flugzeugbau eingesetzt. Erkenntnisse aus jener Zeit sind noch heute, trotz neuer Technologien, wertvoll, nicht zuletzt weil die Anforderungen an den Werkstoff im Flugzeugbau und konstruktiven Holzbau sehr ähnlich sind. Eine Möglichkeit furnierbasierte Werkstoffe im konstruktiven Bereich zu verwenden, stellt der Einsatz von UHPP – Leichtbauprofilen (Ultra High Performance Plywood-Profiles) dar. Dies sind aus Furnierschichtholz bestehende und im Formpressverfahren hergestellte Profile mit beanspruchungsoptimiertem Querschnitt. Die Kenntnis der Materialeigenschaften des verwendeten Werkstoffes sind dabei ausschlaggebend für die Abschätzung des Tragverhaltens.

Die vorliegende Arbeit gibt, basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche, einen Überblick über bereits durchgeführte Untersuchungen zu festigkeits- und steifigkeitsbestimmenden Einflussfaktoren an Einzelfurnieren und Furnierschichtholz. Darauf aufbauend wurden ausgewählte mechanische Kennwerte an Einzelfurnieren und Furnierschichthölzern der Holzarten Fichte, Buche und Birke unterschiedlichen Aufbaus untersucht. Die experimentellen Methoden umfassten Zugprüfungen an Einzelfurnieren und Furnierschichtholz, Hochkantbiegeprüfungen und Schubprüfungen.

Die in vorliegender Arbeit gewonnen Erkenntnisse im Umgang mit furnierbasierten Werkstoffen bilden eine wesentliche Grundlage für weiterführende Studien. Entscheidend für eine fundierte Analyse dieser Werkstoffe wird dabei die Eruiierung und infolge Bewertung relevanter Einflussparameter an entsprechender Stichprobengröße sein.

Abstract

In terms of sustainable and responsible utilization of natural resources the use of some hardwood species as raw material for veneer-based products (laminated veneer lumber, plywood) is gaining more and more importance. This is due to a higher material utilisation which can be realized by the process of "peeling" of round wood. Some hardwood species such as birch and beech are particularly appropriated Because of their high mechanical strength and stiffness properties, Laminated Veneer Lumber (LVL) and Plywood have already been used successfully for constructing aircrafts in the 1920s. The present study provides a literature review on technologies and veneer usage from the beginnings to modern possibilities for constructing UHPP – lightweight profiles (Ultra high performance plywood profiles). These cross-section optimized profiles are made of LVL manufactured in a moulding process. To estimate the structural behaviour of those elements, however, comprehensive knowledge about the properties of the material is essential.

The present study therefore focuses on reviewing tests on veneer and LVL regarding factors which influence their strength and stiffness. Selected mechanical properties of veneer and LVL with different ply organizations and hardwood species (spruce, birch beech) were additionally investigated experimentally, comprising tensile tests, edge bending tests and shear tests.

The outcomes of the present study contributed to a better understanding of veneer-based products and will stimulate future research. To develop this material to its full potential further studies concerning determination and evaluation of relevant influencing parameters will be needed.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT	1
1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT	2
KAPITEL 2: GESCHICHTLICHER RÜCKBLICK.....	3
2-1 DAS FURNIER	3
2-2 ANFÄNGE - 1900.....	4
2-2.1 Allgemein	4
2-2.2 Herstellung	5
2-2.3 Verwendung	6
2-3 1900-1950.....	7
2-3.1 Allgemein	7
2-3.2 Herstellung	10
2-3.3 Verwendung	13
2-4 1950 – HEUTE.....	22
2-4.1 Allgemein	22
2-4.2 Verwendung von Furnierschichtholz.....	23
KAPITEL 3: CHARAKTERISIKA DER FICHTE, BUCHE UND BIRKE.....	26
3-1 STRUKTUR DES HOLZES	26
3-1.1 Makroebene	26
3-1.2 Mikroebene.....	28
3-1.3 Beschreibung der Holzarten Birke, Buche und Fichte	33
KAPITEL 4: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON EINZELFURNIEREN UND FURNIERSCHICHTHOLZ.....	39
4-1 ALLGEMEIN.....	39
4-2 ÜBERSICHT	40
4-3 EINFLÜSSE AUF MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN.....	41
4-3.1 Qualität des Ausgangsmaterials.....	41
4-3.2 Holzart.....	42
4-3.3 Vorbehandlung	43
4-3.4 Herstellungsart.....	46
4-3.5 Mikrorisse.....	47
4-3.6 Vorpressung.....	50

4-3.7	Grösseneffekt	51
4-3.8	Furnierdicke	52
4-3.9	Faserrichtung	53
4-3.10	Schichtstärken und Schichtanzahl.....	54
4-3.11	Klebstoff und Oberflächenrauheit.....	55
KAPITEL 5: FÜGEN VON FURNIEREN		57
5-1	GESCHICHTLICHE BETRACHTUNG.....	57
5-2	FÜGEN AM FURNIERSCHICHTHOLZ.....	58
5-3	ARTEN	58
5-3.1	Stumpf.....	58
5-3.2	Überlappung.....	60
5-3.3	Schäftung	60
KAPITEL 6: MATERIAL UND METHODEN.....		61
6-1	ALLGEMEIN	61
6-2	PRÜFKONZEPT	61
6-3	MATERIAL.....	62
6-3.1	Furniere.....	62
6-3.2	Klebstoff	63
6-4	ZUGPRÜFUNG AN KLEINPROBEN	63
6-4.1	Allgemein.....	63
6-4.2	Prüfkonfiguration und Messeinrichtung	64
6-4.3	Prüfkörpergeometrie und Herstellung.....	64
6-4.4	Prüfablauf.....	67
6-4.5	Ermittlung der Zugfestigkeit in Faserrichtung.....	68
6-4.6	Ermittlung des E-Moduls in Faserrichtung.....	69
6-5	ZUGPRÜFUNG NACH EN 408	70
6-5.1	Allgemein.....	70
6-5.2	Prüfkonfiguration und Messeinrichtung	70
6-5.3	Prüfkörpergeometrie und Herstellung.....	71
6-5.4	Prüfablauf.....	75
6-5.5	Ermittlung der Zugfestigkeit in Faserrichtung.....	76
6-5.6	Ermittlung des E-Moduls in Faserrichtung.....	76
6-5.7	Dynamischer E-Modul mittels Ultraschall	76

6-6	HOCHKANTBIEGUNGEPRÜFUNG NACH EN 408	77
6-6.1	Allgemein	77
6-6.2	Prüfkonfiguration und Messeinrichtung	77
6-6.3	Prüfkörpergeometrie und Herstellung	80
6-6.4	Prüfablauf	81
6-6.5	Ermittlung des Schubmoduls.....	82
6-6.6	Ermittlung des E-Moduls aus Hochkantbiegung.....	84
6-7	SCHUBVERSUCHE NACH EHRHART (2014).....	85
6-7.1	Allgemein	85
6-7.2	Prüfkonfiguration und Messeinrichtung.....	85
6-7.3	Prüfkörpergeometrie und Herstellung	87
6-7.4	Prüfablauf	90
6-7.5	Ermittlung der Schubfestigkeit.....	92
6-7.6	Ermittlung des Schubmoduls.....	92
6-8	SCHUBVERSUCH NACH HIRSCHMANN (2011)	93
6-8.1	Allgemein	93
6-8.2	Prüfkonfiguration und Messeinrichtung.....	93
6-8.3	Prüfkörpergeometrie und Herstellung	94
6-8.4	Prüfablauf	96
6-8.5	Ermittlung der Schubfestigkeit.....	97
KAPITEL 1: ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....		98
1-1	ZUGPRÜFUNG KLEINPROBEN.....	98
1-1.1	Einzelergebnisse und Versagensbilder	98
1-1.2	3-schichtig	102
1-1.3	Zusammenfassung und Diskussion	106
1-2	ZUGPRÜFUNG NACH EN 408.....	107
1-2.1	Einzelergebnisse und Versagensbilder	107
1-2.2	Zusammenfassung und Diskussion	111
1-3	SCHÜBPRÜFUNG BEI HOCHKANTBIEGUNG NACH EN 408.....	118
1-3.1	Einzelergebnisse	118
1-3.2	Zusammenfassung und Diskussion	120
1-4	SCHUBPRÜFUNG NACH EHRHART (2014)	124
1-4.1	Einzelergebnisse	124

1-4.2	Zusammenfassung und Diskussion.....	127
1-5	SCHUBPRÜFUNG NACH HIRSCHMANN (2011).....	129
1-5.1	Einzelergebnisse	129
1-5.2	Zusammenfassung und Diskussion.....	130
KAPITEL 2: RESÜMEE UND AUSBLICK.....		132
ANHANG A VERZEICHNISSE.....		I
A-1	LITERATURVERZEICHNIS	I
A-2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
A-3	TABELLENVERZEICHNIS.....	XI
ANHANG B ERGEBNISSE DER PRÜFUNGEN		XIV

Sofern nicht explizit gekennzeichnet, stammen sämtliche Abbildungen und Fotos vom Autor.

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Der verantwortungsvolle Umgang mit natürlichen Ressourcen hat in jüngster Zeit erheblich an Bedeutung gewonnen. In Anbetracht des stetigen Anstiegs der Nutzung von Rohstoffen sind neue Ansätze und Strategien zur nachhaltigen Entwicklung unserer Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft gefragt. Der Ressourceneinsatz zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen ist in der Baubranche verhältnismäßig hoch, wodurch gerade in diesem Bereich eine nachhaltige Nutzung im Vordergrund stehen sollte. Ein Bauwerk besteht im Allgemeinen aus einer Kombination unterschiedlichster Materialien, die entsprechend den Bedürfnissen und baulichen Anforderungen in Form von Bauprodukten eingesetzt werden. Bauprodukte aus Holz und deren Verwendung in Bauwerken vereinen einerseits ökologische wie ökonomische Aspekte im Sinne einer nachhaltigen Bauweise in einem hohen Maße. Aber auch das Holz als Baustoff steht, wenn auch nachwachsend, nur in begrenzter Menge und Qualität zur Verfügung. In Österreich, wie auch im mitteleuropäischen Raum wurden und werden traditionell Nadelhölzer für den konstruktiven Einsatz verwendet. Dies beruht auf einer im Vergleich zu Laubholz einfacheren Ver- und Bearbeitung von Nadelholz zu Holzwerkstoffen, aber auch einer geringeren Variabilität der holzartenspezifischen Eigenschaften. Mit der beständigen Zunahme des Laubholzvorrates nicht nur in Österreich, sondern auch in anderen Ländern Mitteleuropas, wie beispielsweise in der Schweiz und in Deutschland, wird der Druck hinsichtlich einer breiteren Verwendung von Holzarten wie Buche, Esche, Birke und Ahorn, aber auch der Nadelholzarten Fichte-Starkholz sowie Douglasie, Kiefer, Tanne und Lärche immer größer. Aufgrund des steigenden Interesses diese verfügbaren Ressourcen einer stofflichen Nutzung zuzuführen, ist eine Zunahme der Forschungstätigkeit insbesondere im Bereich der Laubholzforschung zu verzeichnen.

Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten belegen das Potential von Laubholz und dessen Verwendung für konstruktive Zwecke in Form von stabförmigen und flächigen Bauteilen. Neben brettbasierten Holzwerkstoffen (aus Laubholz oder Kombination von Nadelholz und Laubholz in Form von Hybridbauteilen) stellen insbesondere furnierbasierte Holzwerkstoffe (Furnierschichtholz FSH, Furniersperrholz FSP) eine interessante Möglichkeit zur Nutzung der hohen mechanischen Eigenschaften einiger Laubholzarten (z.B. Buche, Birke) dar. Der Auftrennprozess „Schälen“ zur Herstellung des Ausgangsmaterials „Furnier“ erlaubt im Vergleich zu traditionellen Einschnittstechnologien zur Produktion von Brettware höhere Ausbeuten am Rundholz. Durch Verkleben einzelner Furnierschichten entstehen Verbundbauteile, deren mechanische Eigenschaften durch entsprechende Wahl der Anordnung im Schichtaufbau an Beanspruchungsbedingungen und Anforderungen angepasst werden können. Um somit möglichst leistungsfähige Bauteile herzustellen, ist es unabdingbar, die Werkstoffkenngrößen sowohl der unterschiedlich starken Furniere und der daraus verklebten Furnierpakete zu kennen.

Die vorliegende Arbeit gibt auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche einen Überblick über bereits durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich festigkeits- und steifigkeitbestimmender Einflussfaktoren auf furnierbasierte Produkte und befasst sich mit der experimentellen Bestimmung ausgewählter Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Einzelfurnier und Furnierschichtpaketen unterschiedlichen Aufbaus der Holzarten Fichte, Birke und Buche.

1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel, welche im Folgenden durch eine kurze inhaltliche Beschreibung angeführt werden.

Kapitel 2 – Geschichtlicher Rückblick

Kapitel 2 befasst sich mit den Anfängen der Furnierherstellung und den unterschiedlichen Verwendungen des Ausgangsmaterials Furnier und zeigt anhand einiger Beispiele die wesentlichsten Entwicklungen, welche das Furnier bis zur heutigen Verwendung als Werkstoff durchlaufen hat.

Kapitel 3 - Charakteristika der Buche, Birke und Fichte

In Kapitel 3 werden die Unterschiede der charakteristischen Strukturmerkmale der Laub- (Birke und Buche) und Nadelholzarten (Fichte), die für das anisotrope Materialverhalten des Holzes verantwortlich sind dargestellt.

Kapitel 4 – Mechanische Eigenschaften von Einzelfurnieren und Furnierschichtholz

Kapitel 4 befasst sich mit bereits durchgeführten Arbeiten zu Einflussparametern auf Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Einzelfurnier und Furnierschichtholz der Holzarten Fichte, Buche und Birke.

Kapitel 5 – Fügen von Furnieren

Kapitel 5 beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Möglichkeiten des Fügens von Einzelfurnieren bei der Herstellung von Furnierschichtholz.

Kapitel 6 – Material und Methoden

Kapitel 6 zeigt die Herstellung, Prüfkörpergeometrie, Prüfkonfiguration und den Prüfablauf der einzelnen Prüfungen, welche an Einzelfurnieren und Furnierschichthölzern im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Kapitel 7 – Ergebnisse und Diskussion

Kapitel 7 befasst sich mit den Ergebnissen der Prüfungen, weist auf aufgetretene Probleme hin und beinhaltet eine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse.

Kapitel 8 – Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 8 gibt eine zusammenfassende Betrachtung der durchgeführten Arbeiten sowie einem Ausblick auf den Bedarf weiterer Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet.

KAPITEL 2: GESCHICHTLICHER RÜCKBLICK

Diese Kapitel beinhaltet einen Überblick über die Entwicklung von Furnier und Furnierschicht- bzw. Furniersperrholz vom Altertum bis in den heutigen modernen Holzbau. Die ersten Überlieferungen über den Einsatz von Furnieren gehen auf die ägyptische Hochkultur zurück. Anfang des 19. Jahrhunderts standen erstmals Maschinen zur Verfügung, welche eine industrielle Fertigung von Furnieren in größeren Mengen erlaubten. Entwicklungen des Auftrennprozesses zur Furnierherstellung, die einfache Be- und Verarbeitbarkeit, sowie die vielseitige Verwendungsmöglichkeiten führten zu einem steigenden Bedarf und bedingten eine Zunahme der Furnierproduktion bis in die zwanziger Jahre. Neben dem Einsatz der Furniere als dekoratives Element im Möbelbau, begann man Furniere zu verkleben und als tragendes Element einzusetzen. Dies markierte den Beginn der Werkstoffe Furnierschichtholz sowie Furniersperrholz, welche insbesondere im Flugzeugbau eingesetzt wurden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann in den USA der vermehrte Einsatz furnierbasierter Werkstoffe im Bauwesen durch die Entwicklung von Microllam LVL (Weyerhaeuser NR Company; USA). Die Herstellung von UHPP – Profilen stellt nun eine Fortsetzung dieser Entwicklung dar.

2-1 DAS FURNIER

Das Wort „Furnier“ stammt ursprünglich aus dem Althochdeutschen wobei sich die Schreibweise in weiterer Folge in Anlehnung ans Französische zum Wort „Fournir“ bzw. „Fournier“ weiterentwickelte, was so viel bedeutete wie „bestücken“. Im 20. Jahrhundert ging man schließlich wieder zur anfänglichen alten deutschen Schreibweise „Furnier“ zurück. Das englische Wort „veneer“ stammt von „fenere“ ab und ist eine Anlehnung an das Wort „finish“. Man wollte damit ausdrücken, dass es einem Möbelstück den letzten Schliff gibt. (Knigh, Wulpi, 1930)

Definitionen nach Tennyson Century Dictionary (1893): (in Knigh, Wulpi (1930))

Das „Furnier“ bezeichnet ein *„Dünnes Stück Holz ausgesuchter Art, das auf ein anderes gewöhnlicher Sorte aufgelegt wird, um im Möbel dem so behandelten Werkstück ein besseres und wertvolleres Ansehen zu geben.“*

Unter „furnieren“ versteht man: *„Das Auflagen oder das Bedecken der Oberflächen eines minderwertigen Holzes mit Holz einer besseren und schöneren Art, um dem Ganzen das Aussehen zu geben, als wenn es aus wertvollem Material hergestellt ist.“*

2-2 ANFÄNGE - 1900

Im Folgenden dient die geschichtliche Ausarbeitung von Knigth, Wulpi (1930) als die wichtigste Bezugsquelle.

2-2.1 ALLGEMEIN

Altertum

Die erste nachweisbare Verwendung von Furnieren geht auf das ägyptische Königtum zurück. Furniere kamen zu dieser Zeit nicht aufgrund einer wirtschaftlicheren Ausnutzung des Holzes zum Einsatz, sondern rein als gestalterisches Element. Ein Beispiel für die Dauerhaftigkeit und Beständigkeit ist eine Grabbeigabe Tutanchamuns im alten Ägypten, oder der „Stuhl von St. Peter“ aus der byzantinischen Zeit (Abbildung 1). Die ältesten überlieferten Stücke stammen aus dem 14. und 15. Jahrhundert vor Christus und zeugen von der Wertschätzung der Furniere und deren Vorbehalt für den Adel und die gehobene Bevölkerungsschicht zu jener Zeit. In dieser Zeit wurden aus Furnieren hauptsächlich Einlegearbeiten hergestellt, welche die Oberfläche von Möbeln zierte. Ein Grund dafür war, dass selbst die Herstellung kleiner Mengen noch sehr arbeits- und zeitintensiv war. Aus Schriften von PLINIUS dem Älteren geht hervor, dass neben der Furniertechnik auch die Absperrung durch dünne Brettchen bereits bekannt war. (Knigth, Wulpi, 1930)

Eine Beschreibung zur altertümlichen Nutzung stammt von PLINIUS dem Älteren: (nach Knigth, Wulpi (1930))

„Das Holz, besonders das von Buche, läßt sich leicht verarbeiten, trotzdem es zerbrechlich und weich ist. Wenn man es in ganz dünne Lagen von Furnieren schneidet ist es sehr biegsam.“

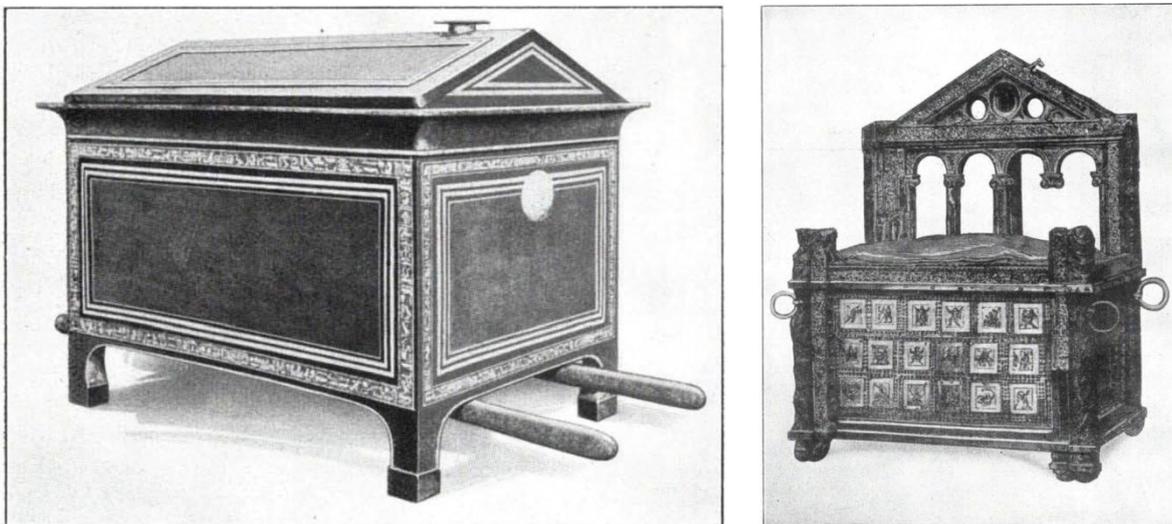


Abbildung 1: links: Grabbeigabe Tutanchamuns, Truhe aus Zedernholz furniert mit Ebenholz und Elfenbein; rechts: Stuhl von St. Peter, furniert und mit Einlagen aus Elfenbein und Gold versehen (Knigth, Wulpi, 1930)

Renaissance und Neuzeit

Nachdem Furniere im Mittelalter eine untergeordnete Rolle gespielt haben und kaum nennenswerte Überlieferungen vorliegen, kam es in diesen Zeitepochen zu einem erneuten Erwachen der Furnierkunst. Es ist anzunehmen, dass man Furniere damals, aber auch bereits im Altertum, durch Sägen herstellte. Anschließend wurden diese einer Nachbehandlung mit Hobeln oder Schaben unterzogen, um die

gewünschten geringen Dicken zu erreichen. Es gibt auch Belege dafür, dass zunächst stärkere Furnierbretter zuerst auf die Möbel geklebt wurden und anschließend auf eine geringere Stärke nachbearbeitet wurden. Das Furnieren im heutigen Sinne, hat seinen Ursprung im 17.- 18. Jahrhundert, als man begann, größere Flächen mit Furnieren zu bedecken. Man erkannte bald den Vorteil gegenüber Massivholz, welches bei Feuchteänderung stark zu Verziehen und Rissbildung neigte. Ab dem 19. Jahrhundert gab es ein nachweisbares wirtschaftliches Interesse an der Nutzung von Furnieren. So wurden anstatt der vollen Schnittholzstärke dünne Blätter der gleichen Holzart verwendet, um eine möglichst große Fläche einheitlicher Maserung, bei geringem Holzbedarf, zu erhalten. Weiters erkannte man in dieser Zeit erstmals neben künstlerischen Gesichtspunkten zusätzliche Vorteile bei der Verarbeitung und somit auch bei der Verwendung von Furnieren. Als Beispiel sei die Verarbeitung verschiedener Furnierschichten zur Herstellung von geschwungenen Formen angeführt. Wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Vorteilen der Querverleimung von Furnieren, sowie der Verleimung mehrerer Schichten übereinander, sind erst aus dem beginnenden 20. Jahrhundert bekannt. Die damit einhergehende Festigkeitserhöhung und das bessere Standvermögen brachten das Furnier auf eine neue Ebene wirtschaftlicher Nutzbarkeit. (Knigh, Wulpi, 1930)

2-2.2 HERSTELLUNG

Die Herstellung von Furnieren war bis Anfang des 19. Jahrhunderts sehr aufwändig und reine Handarbeit. Das erste Arbeitsmittel zur Herstellung von Furnieren war die Rahmensäge. Um einen exakten Schnitt zu ermöglichen und geringe Dicken fertigen zu können, war das Sägeblatt sehr breit und mit dünnen feinen Zähnen ausgestattet (Abbildung 2).



Abbildung 2: Furnierherstellung mittels Rahmensäge (um 1530); mit breitem aber dünnem feingezahnten Blatt (Finsterbusch, Thiele, 1987)

Erste Patente zur mechanisierten Fertigung gab es 1638 durch Sara JEROME und William WEB (Pat. no. 87) (Edwards, 2008). Diese Erfindungen gerieten allerdings wieder in Vergessenheit und schafften nicht den erhofften Durchbruch. Anfang des 19. Jahrhunderts gelang es schließlich, die Arbeitsmethoden der Furnierherstellung zu mechanisieren. Ein Meilenstein war das Patent von Sir Marc Isambard BRUNEL aus dem Jahre 1806 in England (Pat. no 2968). Er erfand die erste handbetriebene Furnierschneidemaschine für dünne, gesägte Furniere (Beamish, 1862). Die Erfindung von Brunel wurde schließlich in weiterer Folge auch zu einer Messermaschine weiterentwickelt, womit deutlich dünnere Furniere hergestellt werden konnten. Ein erstes Patent auf eine Furnier-Messermaschine bekam im Jahre 1834 der Franzose Charles PICOT (Kollmann, 1962). Praxisrelevant wurden diese Maschinen erst in den sechziger Jahren des 19. Jahrhunderts nachdem sie konstruktiv ausgereifter waren. (Knigh, Wulpi, 1930)

Die Konstruktion des Horizontalgatters zur Herstellung von Furnieren geht auf ein Patent von August COCHOT im Jahre 1814 zurück. Ursprünglich war es für Sägewerke gedacht, wurde aber später

hauptsächlich in Furnierfabriken eingesetzt. Die Furnierblöcke wurden in eine unter der Maschine angelegte Grube aufrecht hineingestellt und im Rhythmus des Rahmenhubes nach oben gegen das Sägeblatt bewegt (Abbildung 3).

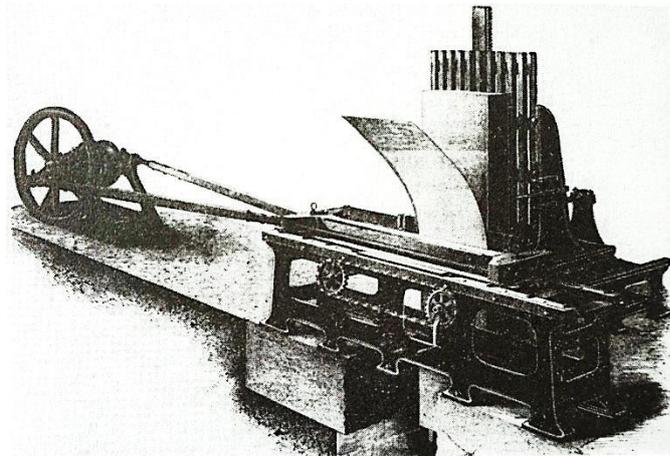
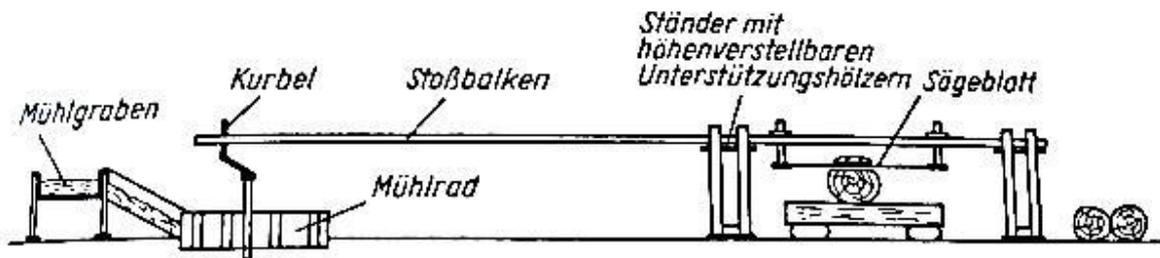


Abbildung 3: oben: Vorläufer des Horizontalgatters, schematische Darstellung nach einem Modell in Schweden; unten: Horizontalgatter zur Herstellung von Furnieren (Cochot, 1814) (Finsterbusch, Thiele, 1987)

Die erste Furnierschälmaschine wurde ebenfalls in England im Jahr 1818 von Henry FAVERYEAR erfunden (Pat. no. 4324). Diese wurde allerdings nicht weiterentwickelt und so entstand der erste Prototyp einer Schälmaschine an der Technischen Universität Wien im Jahre 1822. 1840 gab es durch John DRESSER das erste Patent dazu in den Vereinigten Staaten. (Edwards, 2008). Eine Schälmaschine aus dem Jahr 1844, patentiert von GARAND, schaffte Schällängen bis zu 2 m und erreichte Geschwindigkeiten von 5 m/min (Kollmann, 1962).

Die erste Furnierfabrik in Freiburg (Deutschland) wurde von Ludwig JÄGER 1843 gegründet. Diese war allerdings noch mit Furniersägen ausgestattet. Um 1870 wurden die meisten Fabriken von Sägefurnieren auf Messerfurnieren umgestellt, wodurch die Effektivität enorm gesteigert werden konnte. Dies markierte den Beginn der modernen Furnierindustrie.

2-2.3 VERWENDUNG

Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Furniere zum Großteil als gestalterisches und dekoratives Element verwendet. Erst als man begann mehrere Furniere miteinander zu verkleben, wurden die Vorteile im Vergleich zu Vollholz klar und damit auch der Anwendungsbereich vergrößert. Erste Aufzeichnungen zur Herstellung von „Sperrholz“ aus Furnieren datieren auf das Jahr 1865. John K. MAYO meldete dieses Patent (Pat. no. 51735, Mayo (1865)) in New York an. Dieses geriet allerdings wieder in Vergessenheit. 1893 wurde die erste Sperrholzplatte aus 3 bis 5 Buchenfurnieren durch Bernhard HAUSMANN in Blomberg hergestellt (Abbildung 4). Verwendet wurde sie vorwiegend für Fassdeckel und Sitzplatten. Die großen Vorteile der Sperrholzplatten waren das geringe Gewicht und die Formstabilität bei hohen

Festigkeiten (Knigh, Wulpi, 1930). Die erste Sperrholzfabrik in Österreich wurde von LOURIÉ in Wien im Jahre 1903 gegründet (Kollmann, 1962).

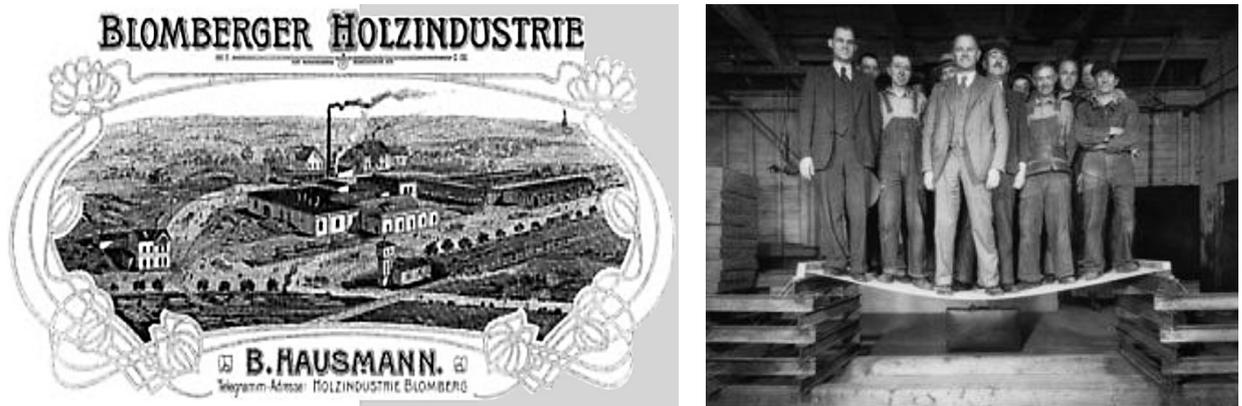


Abbildung 4: links: Blomberger Holzindustrie, Herstellung von Sperrholz aus Buchenfurnieren (1893) (Blomberger Holzindustrie b. Hausmann GmbH & Co. KG, 1999); rechts: Darstellung der Vorteile von Sperrholz (History of APA, Plywood, and Engineered Wood, 2015)

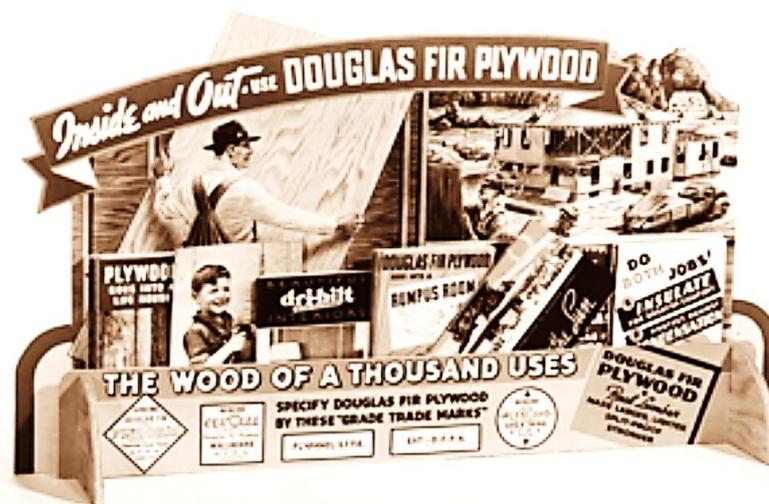


Abbildung 5: Werbung für "Plywood" um 1900 (PPA Structural Wood Society, 2014)

2-3 1900-1950

2-3.1 ALLGEMEIN

Während dieser Epoche wurde die Technologie der Furnierwerkstoffe vor allem durch den häufigen Einsatz im Flugzeugbau vorangetrieben. Durch die unterschiedlichen Belastungsrichtungen welche am Flugzeug auftreten, war es zweckmäßig, einen Werkstoff zu entwickeln, der ähnliche Festigkeitseigenschaften in verschiedene Richtungen besitzt. Weiters galt es, Maßänderungen bei Feuchtigkeitsdifferenzen gering zu halten. So entstand der gerade genannte Werkstoff, das „Sperrholz“, gefertigt aus Furnieren.

Bittner (1951) definierte das zu dieser Zeit verwendete „Sperrholz“ folgendermaßen:

„... ist eine Verbindung einzelner Holzelemente ... durch Verleimung in der Art, daß sie die durch Witterungseinflüsse bedingten Längenänderungen der unverleimten Elemente verhindern; dadurch „sperrn“ die Elemente gegenseitig die Auslösung der Spannungen ab, die infolge Quellen oder Schrumpfen auftreten.“

Bittner (1951) gibt folgende Vorteile von „Sperrholz“ gegenüber Massivholz an:

- Unausgeglichene innere Spannungen werden durch zweckmäßige Verleimung ausgeglichen (gesperrt)
- Erhöhung der Festigkeit durch Unterteilen in verschiedene Einzelschichten und Verkleben (vergütetes Holz)
- Gewichtseinsparung durch den Einsatz von Holz geringeren Raumgewichtes in den Mittellagen
- Günstiges Verhältnis von Raumgewicht zu Zugfestigkeit gegenüber anderen Werkstoffen (besonderes Argument für den Einsatz im Flugzeugbau)
- Gutes Umformvermögen durch Biegen einzelner dünner Furnierschichten (Fahrzeugverkleidungen)
- Möglichkeit eines nahezu vollständigen Festigkeitsausgleiches in alle Richtungen (z.B.: Stern- oder Konstantplatten) (Bittner, 1951)

Seinen Aussagen zufolge gab es zu jener Zeit außer Eisen kaum einen Werkstoff, welcher so vielseitig eingesetzt werden konnte wie „Sperrholz“. Neben der Möbelindustrie und der Verpackungsindustrie zählen auch das Baugewerbe und die Musikindustrie zu den Einsatzbereichen. Außerdem das Kunstgewerbe und vor allem, bedingt durch die hohen Festigkeiten, die Verkehrstechnik (Flugzeuge, Schiffe, Waggonen, Karosseriebau). (Bittner, 1951)

Für den Einsatz im Flugzeugbau wurde meist der Begriff „Flugzeugsperrholz“ verwendet. Um den Bedarf an höherwertigen Hölzern zu senken, verwendete man beim „Flugzeugsperrholz“ häufig minderwertige Holzarten für die Querlagen, da über diese meist ohnehin nur sehr geringe Kräfte abgetragen werden. Als gute Kombination mit Buche und Birke stellten sich Erle, Bergahorn, Pappel und Gaboon heraus.

Neben dem „Sperrholz“ (gesperrte Anordnung bezüglich Faserrichtung der Furnierschichten im Schichtverbund) wurde zu dieser Zeit auch „Schichtholz“, analog zum heutigen Furnierschichtholz (größtenteils parallele Anordnung der Furnierschichten bezüglich der Faserrichtung im Schichtverbund) hergestellt. Die Herstellung erfolgt wie auch bei „Sperrholz“ durch die Arbeitsgänge Schälen, Trocknen, Fügen und Schäften. Die Verleimung erfolgte meist mit Tegofilm bei einem Pressdruck von 2,5 N/mm². Abbildung 6 zeigt einen Vergleich ausgewählter Kenngrößen von Buchenschichtholz mit unterschiedlicher Schichtanzahl mit Buchenvollholz. (Kraemer, 1934)

Bezeichnung	Raumgewicht g/cm ³	Feuchtigkeitsgehalt %	Festigkeitseigenschaften			Wasser- aufnahme in % nach 48 h Wasserlagerung
			Druck kg/cm ²	Zug kg/cm ²	Biegung kg/cm ²	
Rotbuche .	0,60—0,77	7—10	500—720	501—1470	850—1400	62
TVBu 5 ¹ . .	0,65—0,75		700—812	800—1350	1200—1430	—
TBBu 12 . .	0,70—0,8	4—7	750—917	1000—1686	1350—1615	46
TVBu 20 . .	0,75—0,85		800—995	1300—1869	1400—1800	32
TVBu 20/10 ²	0,75—0,85		780—910	1200—1535	1350—1586	—
TVBu 28 . .	0,8—0,9		850—1000	1350—1768	1450—1900	24
TVBu 40 . .	0,85—0,95		900—1100	1400—1745	1500—2000	18

¹ TVBu 5 Tegofilm Verleimte Buche mit 5 Furnieren je cm Dicke.
² Jede zehnte Reihe quer zur Hauptfaserrichtung.

Abbildung 6: Eigenschaften von Buchenschichtholz im Vergleich zu Buchenvollholz (Kraemer, 1934)

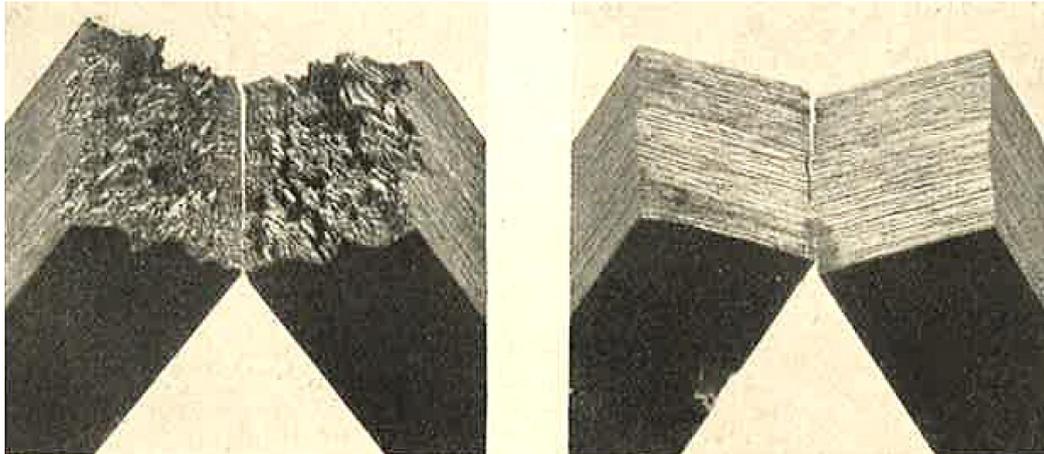


Abbildung 7: Bruchgefüge von Schlagbiegeversuchen an Schichtholz (Buche 45-fach); links: Schlag senkrecht zur Faser; rechts: Schlag in Faserrichtung (Kraemer, 1934)

In Bittner (1951) sind weitere Möglichkeiten zur Holzveredelung angeführt. Als eine Möglichkeit zur Qualitätssteigerung sieht er das Verdichten des Holzes durch Pressen.

Hierbei gibt es drei Möglichkeiten:

- Pressen in Faserrichtung: durch die Zerstörung der röhrenförmigen Zellen und der damit einhergehenden Auflockerung des inneren Zusammenhangs lässt sich die Verformbarkeit verbessern (dies wurde unter dem Namen „Patentbiegeholz“ verwendet)
- Pressen rechtwinklig zur Faser
- allseitiges Verpressen

Ein veredeltes Produkt aus dieser Zeit war Lignofol. Hierbei wurden Buchenfurniere unter hohem Druck und hoher Temperatur mit Kunstharz vergütet und verleimt (Kunstharzschichtholz). Durch die erhöhten Festigkeitseigenschaften wurde es häufig zur Herstellung von Luftschrauben (Propeller) eingesetzt. (Bittner, 1951)

Winter (1955) beschreibt in seinem Werk „Unterlagen und Richtlinien für den Holzflugzeugbau B IIIb“ der Deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt den Einsatz von Sperrholz im Flugzeugbau. Er geht auf Herstellung, Berechnung sowie Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Flugzeugsperrholz verschiedener Dicken ein.

2-3.2 HERSTELLUNG

Ab dem 20. Jahrhundert erfolgte die Furnierherstellung weitestgehend mechanisch und an der Funktionsweise der Maschinen sowie dem Prinzip der Herstellung kam es zu keinen großen Veränderungen mehr. Demnach bezieht sich die im Folgenden beschriebene Herstellung auch auf die Zeit nach 1950 (Kapitel 2-4).

Historische Maschinen zur Furnierherstellung (Abbildung 8, Abbildung 9)

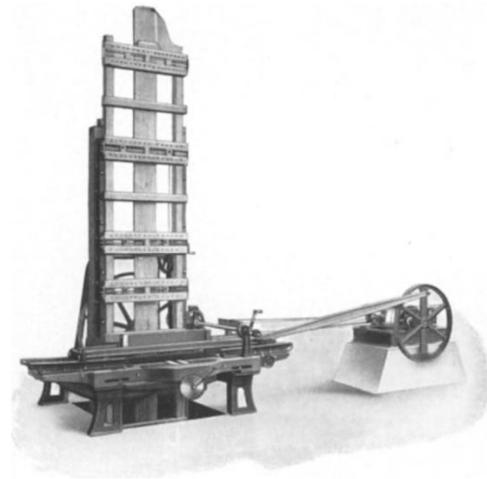
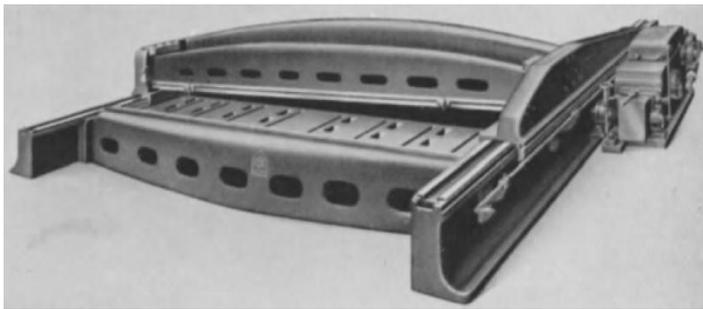


Abbildung 8: links: Furniermessermaschine; rechts: Furniersägemaschine (Klotz, 1940)

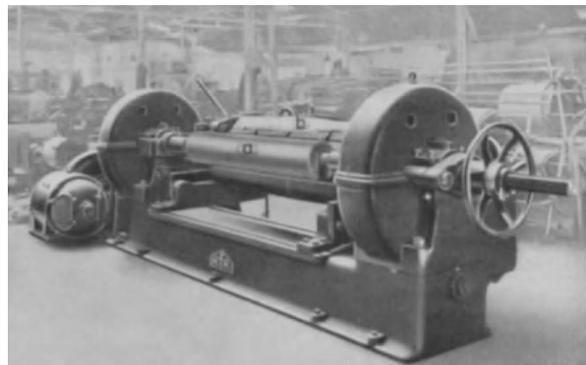
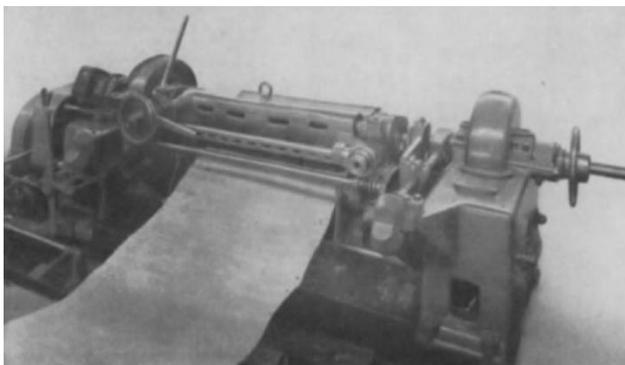


Abbildung 9: Furnierschälmaschinen (Klotz, 1940)

Allgemein

Furniere können aus einer Vielzahl von Hölzern hergestellt werden, wobei die Dimensionen der Bäume der Maschine angepasst sein muss. McMillin (1950) beschreibt die Wichtigkeit der sofortigen Behandlung von Stämmen nach dem Fällen, um eine gute Qualität des Furniers zu gewährleisten. Es sollte das Entstehen von Rissen verhindert werden, welche sich durch eine ungleiche Feuchtigkeitsverteilung an den grünen Stämmen sowie dem Transport ergeben. So werden die Baumstämme beispielsweise mit diversen Stoffen ummantelt und mit Eisenklammern versehen, um das Auftreten von Rissen zu verhindern. Durch geeignete Vorbehandlungsmaßnahmen (Kochen, Dämpfen, Lagerung, ...) kann die Qualität des Endproduktes beträchtlich gesteigert werden. (Kollmann et al., 1975)

Dämpfen und Kochen der Stämme

Im Unterschied zur Furnierherstellung durch Sägen müssen die Stämme vor dem Schalen bzw. Messern gekocht oder gedämpft werden. Dies führt zur Plastifizierung und zum Abbau innerer Spannungen im Holz und ist bei einem Großteil der in Frage kommenden Holzarten für den folgenden Schäl- oder Messerprozess erforderlich. Eine Ausnahme hierbei bilden extrem feuchte und weiche Hölzer. Die Temperatur beim Kochen des Stammes ist meist unter 100°C, variiert aber in Abhängigkeit vom Herstellungsbetrieb teils beträchtlich. Beim Dämpfen wird unterschieden zwischen direktem und indirektem Dämpfen. Doffiné (1956) untersuchte die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren. Die Wahl des Verfahrens und der Temperatur hängt hauptsächlich von der Herstellungsart, der Holzart, der gewünschten Qualität und den erlaubten Farbänderungen ab (Fleischer, 1959/1965). Generell können bei annähernd gleicher Dichte Harthölzer mit einer geringeren Temperatur als Weichhölzer bearbeitet werden. Die Dauer der Behandlung durch Kochen oder Dämpfen wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Dazu gehören Holzart, Stammdurchmesser, Stammlänge und die Vorbehandlung des Holzes nach dem Fällen. (Kollmann et al., 1975)



Abbildung 10: kochen der Stämme im Furnierwerk Merkscha Furnirnica d.o.o.(Celje, Slowenien)

Reinigen und Entrinden

Um die Maschinen zu schützen, werden die Stämme vor dem Schalen bzw. Messern entrindet und gewaschen. Oftmals werden sie zusätzlich durch einen Metalldetektor geführt, um Granatsplitter oder andere Fremdkörper zu identifizieren. Dadurch kann die Einsatzdauer der Messer beträchtlich gesteigert werden. (Kollmann et al., 1975)

Furnierarten

Sägefurniere

Sägefurniere werden selten gefertigt, da die Herstellung aufwändig und der Verlust durch das Auftrennen mittels Sägen relativ groß ist.

Es gibt drei Arten von Sägen:

- Kreissäge
- Gattersäge
- Bandsäge

Die Qualität von Sägefurnieren ist sehr hoch. Durch den Umstand, dass Stämme vor dem Sägen nicht gedämpft und gekocht werden, kommt es zu keiner Farbänderung des Furniers. Die aufwändige Herstellung und der große Verlust machen Sägefurniere zu einem teuren aber qualitativ hochwertigen Produkt. Daher werden diese häufig beim Bau von Instrumenten eingesetzt und sind für den Masseneinsatz nur bedingt geeignet. (Kollmann et al., 1975)

Messerfurnier

Das Einsatzgebiet der Messerfurniere ist breit gefächert und reicht von dekorativen Zwecken bis hin zur Verarbeitung zu Bauteilen als tragende Elemente. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Herstellung zwei Arten von Maschinen: (i) horizontal- und (ii) vertikal orientierte Messermaschinen. Beim Messern befestigt man zunächst den Stamm auf dem Maschinentisch der Messermaschine. Im nächsten Schritt wird der Stamm entweder in horizontaler oder vertikaler Richtung gegen ein feststehendes Messer geführt, wobei Messer und Druckbalken nach jeder Bewegung um die gewünschte Furnierdicke vorrücken. Alternativ kann der Stamm auch fest in die Maschine eingespannt und ein bewegendes Messer gegen diesen geführt werden. Der Druckbalken bei Messermaschinen minimiert das Entstehen von Mikrorissen im Holz während des Auftrennprozesses. (Kollmann et al., 1975)

Schäl furniere

Der Großteil der Furniere wird durch Schalen (Rundschalen) gewonnen, wobei die Herstellung eines „endlosen“ Furnierstücks möglich ist. Dabei kann bei geringem Zeitaufwand eine große Ausbeute erzielt werden. Je nach Art des Einspannens des Stammes wird zwischen Rundschalen, exzentrischem Schalen und Radialschalen unterschieden. Beim Rundschalen wird der Stamm ähnlich wie bei einer Drehbank zwischen zwei Backen gespannt. Anschließend wird der Stamm rotiert und gegen das Messer geführt und es entsteht ein endloses Furnierband. Entscheidend für die Qualität der Furniere ist unter anderem der Druckbalken. Dieser komprimiert das Holz vor dem Messer um einen möglichst exakten Schnitt zu gewährleisten und das Auftreten von Mikrorissen (Schälrisse) zu minimieren. (Kollmann et al., 1975)

Furniertrocknung

Kurz nach dem Messern oder Schalen ist der Feuchtegehalt aufgrund der Vorbehandlung des Stammes extrem hoch. Aus diesem Grund ist die Trocknung sehr entscheidend, um das Furnier in weiterer Folge verarbeiten zu können. Die Trocknung unter Fasersättigung sollte auch die Gefahr eines Pilz- oder Bakterienbefalls vermindern. Furniere neigen während der Trocknung zum Verziehen und Werfen, deshalb ist die Beaufschlagung der Furniere mit Druck notwendig. Um die Qualität der Furniere zu gewährleisten ist es wichtig Temperatur, Zeit, relative Luftfeuchtigkeit und Druck bestens aufeinander abzustimmen. (Kollmann et al., 1975)

Anforderungen

Durch das breite Einsatzgebiet von Furnieren sind die Anforderungen oft sehr verschieden. Voraussetzungen sind beispielsweise:

- gleichmäßige Furnierdicke,
- keine Risse in der Oberfläche und
- glatte Oberflächen auf beiden Seiten.

Um hochwertige Furniere herstellen zu können, sollten folgende Einflüsse beachtet werden:

- Eignung der Holzart,
- Qualität des Stammes (Faserstruktur, Wachsrate, Drehwuchs, Abholzigkeit),

- Vorbehandlung durch Kochen oder Dämpfen (Temperatur und Dauer),
- Schnittgeschwindigkeit,
- möglichst geringe Vibrationen an der Maschine,
- Messerwechsel zum richtigen Zeitpunkt und
- Schutz der Metallteile an Maschinen vor chemischen Einflüssen um etwaige Färbungen an den Furnieren zu verhindern. (Kollmann et al., 1975)

2-3.3 VERWENDUNG

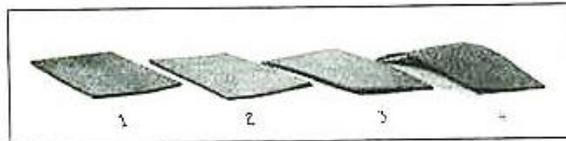
2-3.3.1 Flugzeugbau

In der Anfangszeit des Flugzeugbaus bestand die Tragstruktur meist aus Holz, die Verkleidung selbiger erfolgte mit Stoff. Ab Beginn des ersten Weltkrieges verwendete man schließlich Furnierschichtholz bzw. Furniersperrholz als Beplankung, um eine bessere Aussteifung zu erhalten. Zu dieser Zeit wurden diese beiden Werkstoffe als „Schichtholz“ und „Flugzeugsperrholz“ bezeichnet. Holz war in der Anfangszeit aufgrund seiner guten Eigenschaften der meistverwendete Werkstoff im Flugzeugbau. Die Vorteile lagen im Preis, der guten Verarbeitbarkeit und dem geringen Gewicht bei guten mechanischen Eigenschaften. Bis 1914 wurden weltweit ~5000 Flugzeuge gebaut. Alleine während dem 1. Weltkrieg stieg die Zahl weltweit auf 200 000 an. (Schwab, 1987)

Die Festigkeiten von Holz in Faserrichtung waren zu dieser Zeit vergleichbar mit jenen von Leichtmetallen und Stählen. Problematisch waren nur der starke Abfall von Festigkeiten unter einem Winkel zur Faser sowie das Thema der Feuchtigkeit, welches vor allem im Flugzeugbau eine große Rolle spielte. Abhilfe hierbei schaffte man sich durch das Verkleben mehrerer dünner Furnierschichten. Durch die Anordnung der Schichten in verschiedenen Faserrichtungen entstand das bereits erwähnte „Flugzeugsperrholz“. Es entstand ein Material mit guter Querfestigkeit und guter Verformbarkeit bei hoher Stabilität. Zusätzlich war es einfach, festigkeitsmindernde Merkmale wie Äste zu eliminieren und dadurch hohe Festigkeiten zu erzielen. Während des Krieges führte das U.S. Forest Products Laboratory Untersuchungen zur Eignung verschiedener Holzarten durch. Aus den 30 geprüften Holzarten stellte sich Buche, Birke und Ahorn als am geeignetsten heraus. In Deutschland wurde in weiterer Folge hauptsächlich Birkensperrholz im Flugzeugbau eingesetzt. Bittner (1951) rechnete ebenfalls Birken- und Buchenfurnieren das größte Potential zu. Vorteile der Birke waren die hohen Festigkeiten und die guten Verleimungseigenschaften. Die verhältnismäßig langen Fasern machten sie zusätzlich widerstandsfähiger gegenüber dynamischen Belastungen. Die in Deutschland heimische Birke war jedoch ungeeignet, dies machte einen Import aus Ost- und Nordeuropa notwendig.

„Flugzeugsperrholz“ bestand meist aus drei Furnierschichten mit einer Gesamtstärke von 1,5 mm und symmetrischen Schichtaufbau und setzte sich aus zwei Decklagen und einer Mittellage zusammen. Dieser Aufbau war das Ergebnis vieler Untersuchungen zu Anordnung und Schichtdicke und erwies sich als optimal für diesen Einsatzbereich. Der symmetrische Aufbau verhinderte zusätzlich das Werfen und Verziehen des Sperrholzes, welches vor allem bei Buchensperrholz ein Problem darstellte (Abbildung 11). (Hoff et al., 1929)

Aufbau	Dicke in mm Verhältnis	1,2 1:1:1
Raumgewicht . g/cm ³		0,78
Feuchtigkeits- gehalt vH		11,7—12,5 Mittel 12,2
Zugfestigkeit . kg/cm ²	längs	810—970 Mittel 870
	quer	220—450 Mittel 330
	diagonal	280—320 Mittel 290
Elastizitäts- modul . . kg/cm ²	längs	132—133000
	quer	46—49000
	diagonal	27—29000
Scherfestig- keit ²⁾ . . . kg/cm ²	längs	200—230
	quer	170—190
	diagonal	350—450
Kleinsten Biege- radius ³⁾ . . . mm	längs	30
	quer	7—10



¹⁾ Diese Werte sind einer anderen Versuchsreihe Platten entnommen und zum Vergleich hier angeführt.
²⁾ Wegen Schubfestigkeit siehe S. 205.
³⁾ In diagonalen Richtung ist die Biegefähigkeit bei

Abbildung 11: links: Festigkeitskennwerte von 3-schichtigem Birkenperrholz (1,2 mm, symmetrischer Aufbau 1:1:1); rechts: Sperrholzproben nach 16-stündiger Wasserlagerung (1 Kiefern-, 2 + 3 Birken, 4 Buchensperrholz) (Hoff et al., 1929)

Ein Beispiel eines Flugzeuges aus dem Jahr 1913 ist die in Schalenbauweise erbaute Deperdussin-Sportmaschine. Den Rumpf dieses Flugzeuges bildete ein stabiler Rahmen mit mittragender Beplankung aus 3-schichtigem Rosenholz-Furnier (Abbildung 12). Viele Formteile am Flugzeug bestanden aus Pressschichtholz, welches häufig aus mit Kunstharz verleimten Birkenfurnieren bestand. (Schwab, 1987) Vor allem Propeller wurden wegen der guten Eigenschaften aus Birkenperrholz hergestellt (Ylinen, 1942).

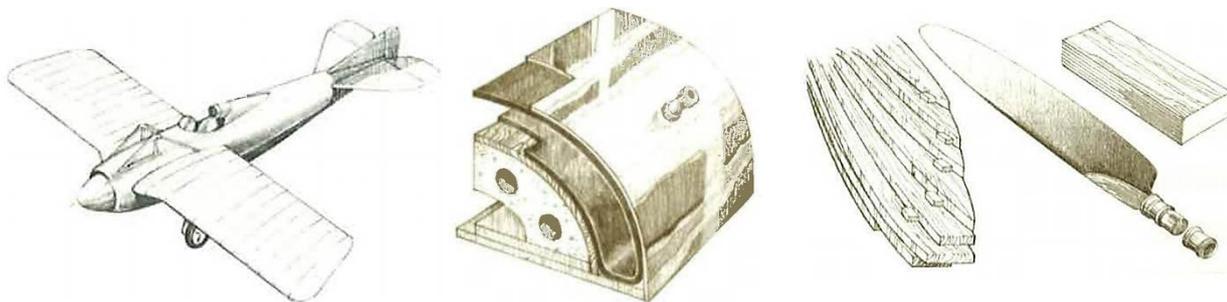


Abbildung 12: links: Deperdussin-Sportmaschine (1913); Mitte: Formbauteil aus Birken-Pressschichtholz; rechts: Propeller aus verleimten Furnieren (Schwab, 1987)

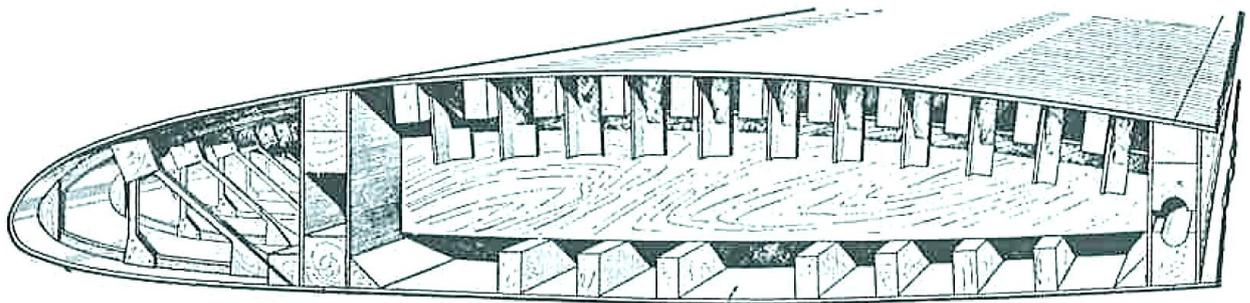


Abbildung 13: Aufbau eines Flügels der De Havilland "Mosquito" in Holzbauweise

Bis heute ist die aus Holz gefertigte „Spruce Goose“ (Hughes K-4 Hercules), das Flugzeug mit der größten Spannweite weltweit. Obwohl „Spruce Goose“ übersetzt „Fichten – Gans“ heißt, wurde es fast zur Gänze aus Birkenholz gefertigt. Die Spannweite beträgt 97,5 m. Im Vergleich dazu hat der hochmoderne Airbus A380 eine Spannweite von ~80 m.

Im Buch „Handbuch für Flugzeug-Konstrukteure“ geht Haffner (1922) auf einige Einsatzgebiete von „Sperrholz“ im Flugzeugbau ein. Als sehr günstig erwies sich das gute Verhältnis von spezifischem Gewicht zu Festigkeit. Tabelle 1 zeigt Mittelwerte von Festigkeiten verschiedener Holzarten, welche im Flugzeugbau zum Einsatz kamen. Die ausgezeichneten Werte machten eine ausgedehnte Verwendung möglich, wobei auch immer auf die Problematik der Feuchtigkeitsaufnahmen sowie splintern und brennen bei Abstürzen hingewiesen wurde.

Tabelle 1: Materialkennwerte von Holzarten, welche im Flugzeugbau eingesetzt wurden (Haffner, 1922)

Material	Zug [kg/mm ²]	Druck [kg/mm ²]	Schub [kg/mm ²]	Biegung [kg/mm ²]	Wertungsziffer
Buchenholz	13,0	3,0	6,0	6,5	8,4
Eichenholz	9,0	4,5	7,0	7,0	8,1
Eschenholz	7,5	6,0	6,0	6,0	7,7
Hickoryholz	12,0	4,6	7,9	6,0	7,1
Nussbaumholz	9,0	6,0	4,0	4,0	4,7
Pappelholz	4,0	1,2	1,2	1,2	7,7
Pitchpinholz	6,8	2,8	4,0	3,0	5,0
Rottanneholz (Fichte)	7,5	4,5	5,0	5,0	10,4
Lärchenholz	8,0	3,0	4,8	4,8	6,8
Kiefernholz	6,5	4,0	5,0	5,0	8,8
Withewoodholz	3,5	1,0	1,3	1,3	2,9
Spruceholz	5,5	1,8	2,8	2,8	5,6
Birkenholz	13,0	5,0	9,0	7,0	10,8
Akazienholz	12,5	4,5	8,8	6,8	10,5

Für Propeller wurde neben Birkenholz häufig Nussbaumholz verwendet. Die Propeller waren Hohlkörper (Holzrohre) mit Wandstärken von 4 mm und wurden aus Furniersperrholz gewickelt (Abbildung 14). Als Verbindungsmittel unterschiedlicher Teile verwendete man häufig Sperrholzwinkel oder Sperrholzplatten (Abbildung 14). Die Rumpfaußenhaut bestand meist aus dreifach abgesperrten Birken- oder Erlenholz mit

einer Stärke von 1-3 mm. Wenn die Biegeradien zu klein wurden, oder an Stellen besonders hoher Beanspruchung, wurde die Außenhaut meist gewickelt. Hierbei verleimte man mehrere Schichten dünner Furniere kreuzweise übereinander. (Haffner, 1922)

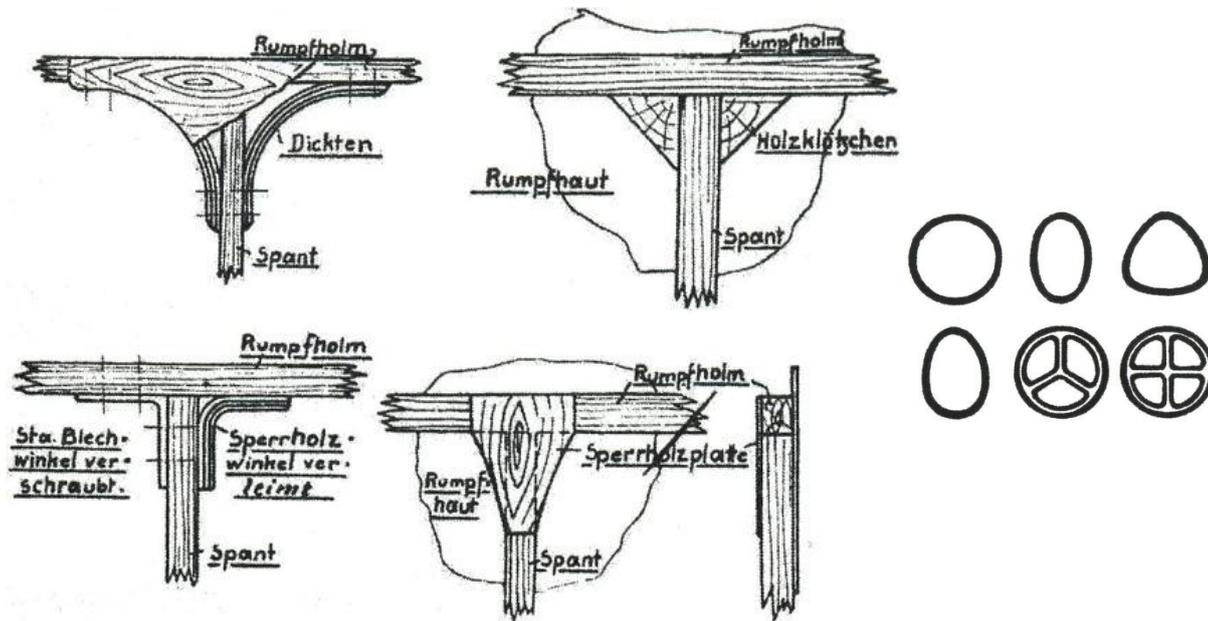


Abbildung 14: links: Verbindungsmittel im Flugzeugbau aus "Sperrholz"; rechts: Formen von Propellern aus Sperrholz (Haffner, 1922)

Elmendorf (1919) beschreibt in seinem Buch „The design of plywood for aircraft“ einige Prüfungen, welche an „Flugzeugsper Holz“ durchgeführt werden mussten. Weiters führt er die Verwendung von Hölzern geringerer Rohdichte für Kernlagen an, wodurch bei sehr geringen Festigkeitsverlusten an Gewicht gespart werden konnte. In Abbildung 15 sind zwei Arten „Flugzeugsper Holz“ zu Fügen dargestellt. Hierbei geht die Schäftung durch alle drei Schichten hindurch. Als Schäftungswinkel wird $1/20 - 1/30$ vorgeschlagen. Selbiges gilt auch für Schäftungen an Einzelfurnieren (Abbildung 16).

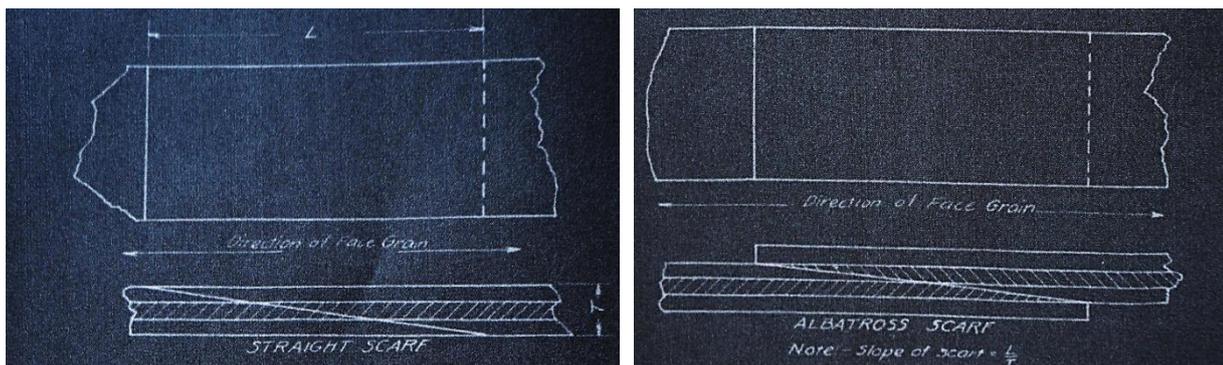


Abbildung 15: Fügearten im Flugzeugbau bei 3-schichtigem Sperrholz (Elmendorf, 1919)

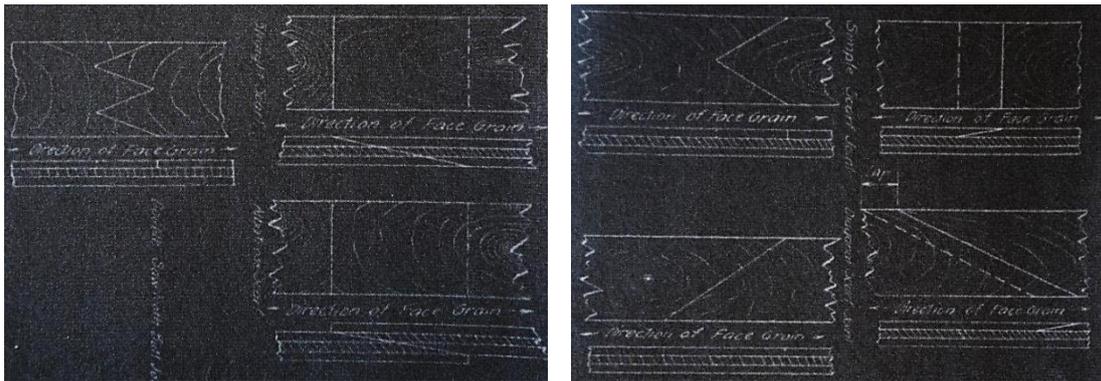


Abbildung 16: Schäftungen von Einzelfurnieren an "Flugzeugsperrholz" (Elmendorf, 1919)

Ein Beispiel aus dem italienischen Flugzeugbau von Küch (1942) ist die Schalenbauweise eines Flugzeugrumpfes nach ZAPATTA. Gefertigt wurde die Außenhaut mittels „Sternholz“ (Furniere sind im Schichtverbund sternförmig versetzt angeordnet). 0,8 mm dicke Furniere wurden auf der Außenseite um 90° und an der Innenseite um 45° versetzt. Man erreichte dadurch ausgezeichnete Festigkeiten in unterschiedlichen Richtungen.

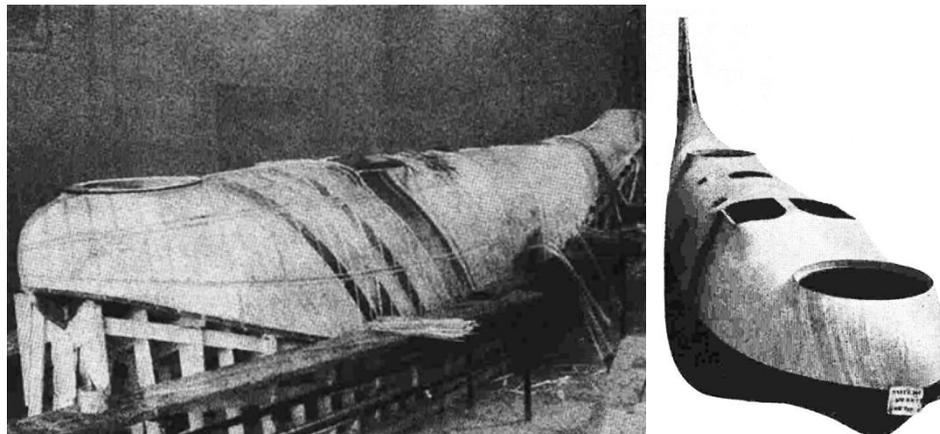


Abbildung 17: Schalenbauweise in Holz nach Zapatta (Küch, 1942)

In Abbildung 18 ist das Bild der Werbung für „Plymold“ (eine Art Furnierschichtholz) aus den USA vom Jahre 1943 zu sehen.

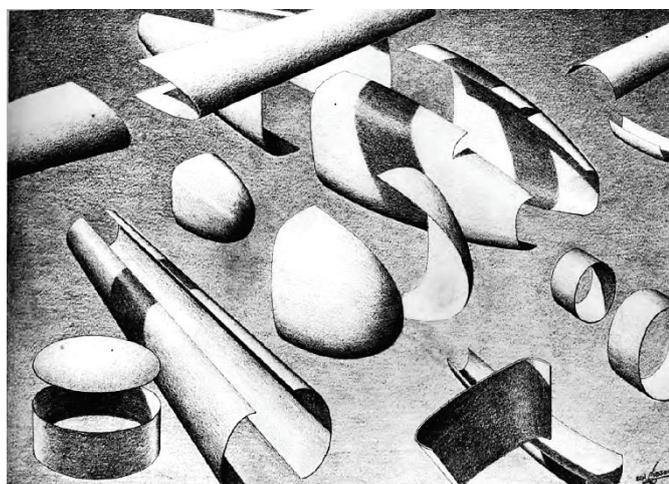


Abbildung 18: Werbung für "Plymold" (USA, 1943) (Reich, 1996)

Patente

Das Patent (Airplane wing) von Auld (1928) befasst sich mit Verbesserungen der Außenhaut von Tragflächen. Die Außenhaut war ein Verbundwerkstoff aus Furnieren und Aluminium oder anderen gleichwertigen Metallen, sowie einem Zelluloid. Das gesamte Schichtpaket wurde bei hohem Druck und 140° C verpresst und bildete ein sehr widerstandsfähiges und biegsames Material (Abbildung 19).

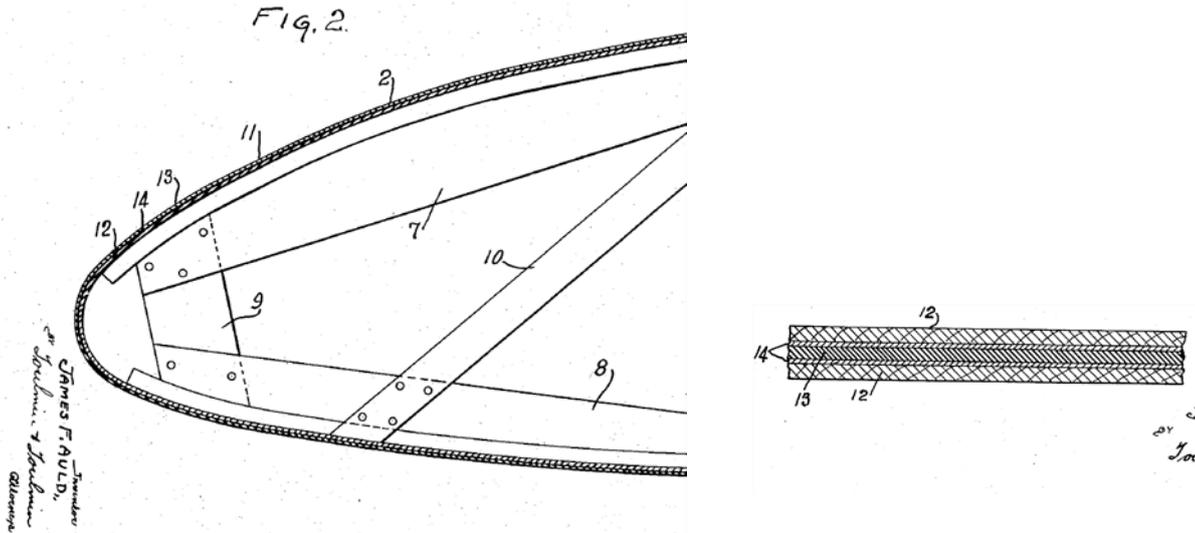


Abbildung 19: links: Querschnitt durch eine Flugzeugtragfläche; rechts: Materialaufbau (12 Holz, 13 Aluminium, 14 Zelluloid) (Auld, 1928)

Jensen (1941) beschreibt in seinem Patent (Method of making airplane structures) Profile aus Furnierschichtholz, welche im Flugzeugbau zum Einsatz kommen können. Ein Beispiel hierfür ist das in Abbildung 20 dargestellte U-Profil. Weiters verklebte er zwei U-Profile zu einer Art I-Profil, welches dann als Aussteifungselement in Flugzeugtragflächen diente (Abbildung 21).

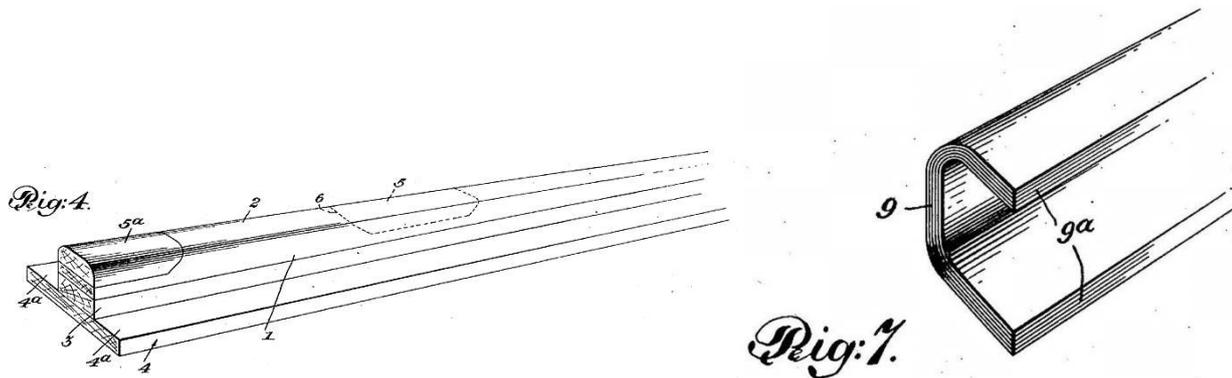


Abbildung 20: links: Matritze für ein U-Profil; rechts: fertiges U-Profil aus Furnierschichtholz (Jensen, 1941)

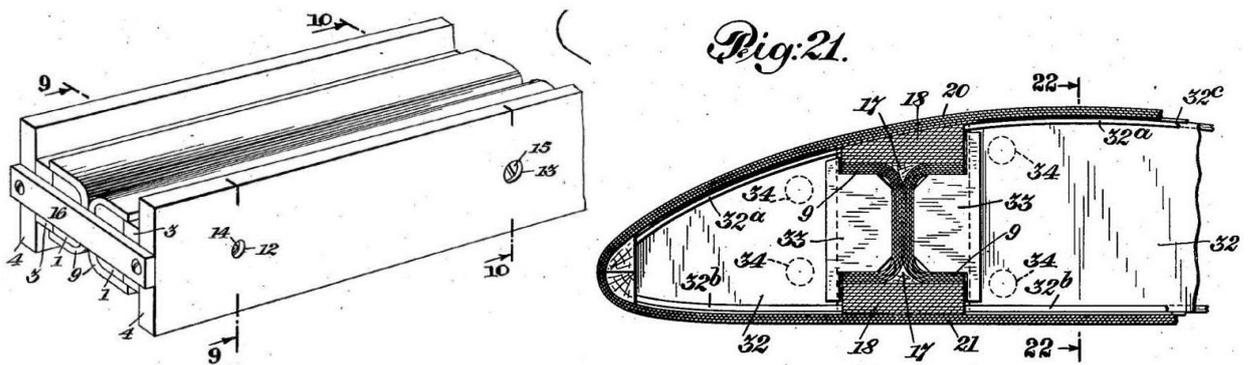


Abbildung 21: links: verpressen zweier U-Profile zu einem I-Profil; rechts: I-Profil als Tragflächenaussteifung (Jensen, 1941)

Atwood (1934) beschreibt in seinem Patent (Honeycomb wing construction for airplanes) die Erstellung von Tragflächen für Flugzeuge durch eine Konstruktion aus Zellen, welche aus Furnierschichtholz bestehen. Die Zellen wurden vorzugsweise aus Birkenfurnieren über eine Form gewickelt und mittels einer Aceton Lösung (beinhaltet zellulosisches Plastik) verklebt (Abbildung 22). Für Zellen im Randbereich wurden spezielle Formen verwendet, um die geschwungene Form der Tragflächen zu erreichen. Die Einzelzellen wurden aneinandergereiht und anschließend verklebt. Das Ergebnis war eine sehr leichte aber trotzdem widerstandsfähige Tragfläche (Abbildung 22).

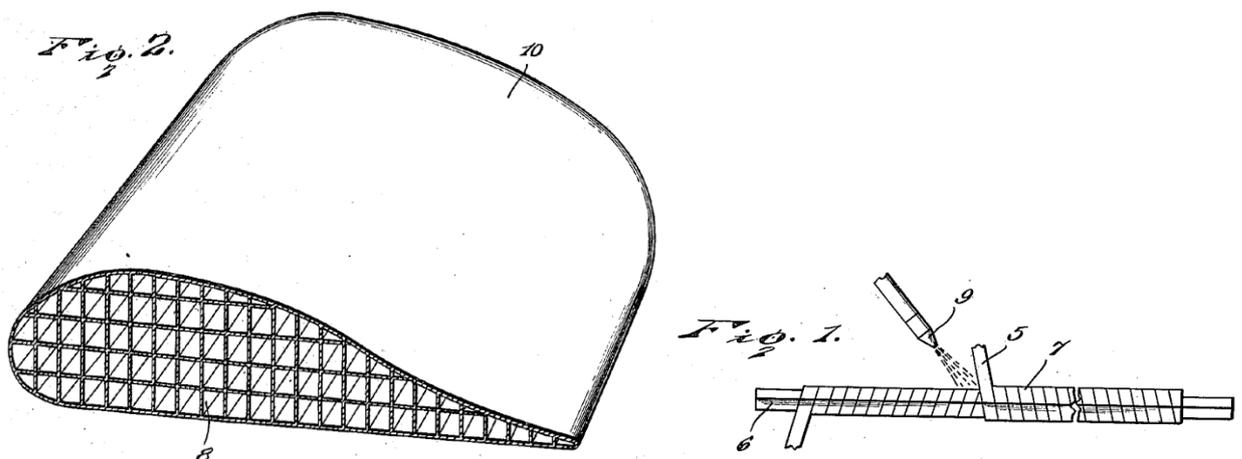


Abbildung 22: links: Tragflächen aus einer Wabenkonstruktion; rechts: wickeln der Einzelzellen über die gewünschte Form (Atwood, 1934)

2-3.3.2 Profile

Fischer (1941) erkannte bereits im Jahr 1941 das Potential von holzsparenden Konstruktionen. Er war der Überzeugung, dass durch geeignete Konstruktionen Holzeinsparungen von 25-30 % möglich sind. Unter anderem erkannte er das Potential von Furnieren, welche durch Messern und Schalen mit sehr geringen Verlusten hergestellt werden konnten. Wie beim „Flugzeugsperrholz“ bereits verwendet, wollte Fischer (1941) neben ebenen Platten, geformte Stücke und Profile aus verleimten Furnieren herstellen (Abbildung 23). Weitere Vorteile erkannte er vor allem in der Produktionszeit. Durch die geringe Dicke der Furniere dauerte der Trocknungsvorgang im Vergleich zu Brettern nur ausgesprochen kurz, wodurch gefällte Bäume rasch weiterverarbeitet werden konnten. Untersuchungen zeigten, dass vor allem die Rotbuche sehr gut dafür geeignet ist.

Eine sehr interessante Aussage von Fischer (1941) lautet:

„Es muss der Tag kommen, an dem man genormte Holzwinkel, Sparbalken, T- und andere Profile aus Furnieren genauso kaufen kann wie Stahlprofile“

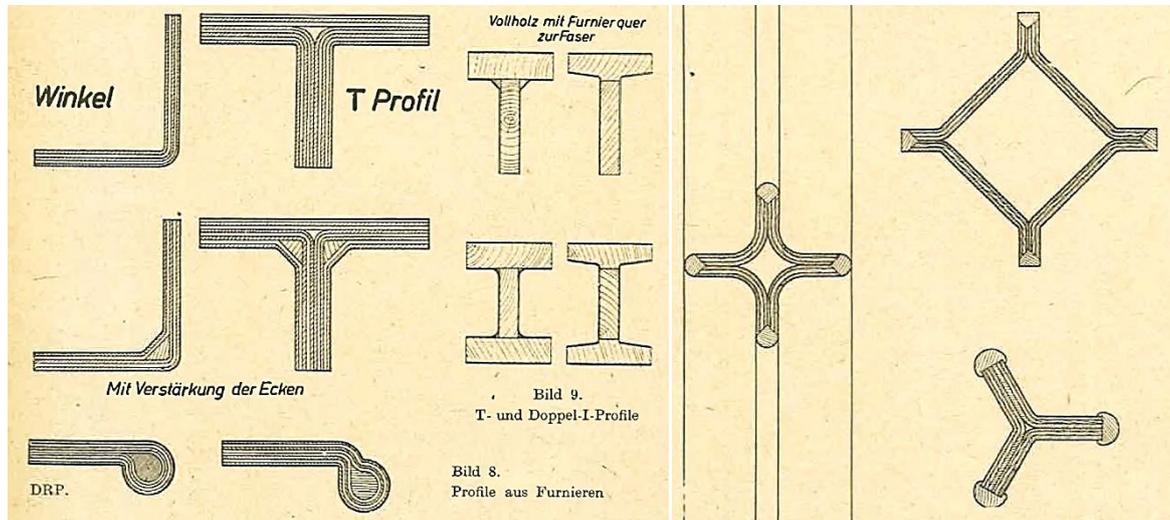


Abbildung 23: links: verschiedene Profile aus Furnieren; rechts: Säulen aus verleimten Furnieren (Fischer, 1941)

2-3.3.3 Maschinenbau

Kollmann (1936) beschreibt in seinem Buch einige Anwendungen von Holz im Maschinenbau. Ähnlich zum Flugzeugbau wird auch hier vom Einsatz von veredelten Hölzern gesprochen. Hierzu zählten unter anderem „Sperrhölzer“, „Pressschichtholz“ und „Biegeholz“. Abbildung 24 zeigt eine Zusammenstellung einiger Kenngrößen von Birken- und Buchenschichtholz sowie dem in Kapitel 2-3.1 beschriebenen Erzeugnis Lignofol.

Stoff	Raumgewicht r g/cm ³	Feuchtigkeitsgehalt u %	Druckfestigkeit σ_B kg/cm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/cm ²	Biegefestigkeit σ'_B kg/cm ²	Schubfestigkeit τ kg/cm ²	Bruchschlagarbeit a mkg/cm ²	Elastizitätsmodul E kg/cm ²	Schubmodul G kg/cm ²
Buche, vergütet (45 fach)	0,94	6,0	1350 540	1290 215	2200 360	320 200	—	185000 34000	15000
Birke, vergütet (50 fach)	1,00	6,5	1150 540	1280 383	2200 550	—	0,85 0,25	215000 48000	15000
Lignofol	1,40	—	750 1000	—	2750	—	0,9	250000 210000	—
Lignostone	1,42	6,5	1500 1080	2460	2700	—	1,4	280000	—

Abbildung 24: Festigkeitseigenschaften von veredelten Hölzern im Maschinenbau (Kollmann, 1936)

Abbildung 25 zeigt den Karosserieboden eines Autos (Fa. Auto-Union A.-G., DKW – Werk Spandau) aus 10 mm Sperrholz. Kollmann (1936) beschreibt hierbei die Vorteile folgend:

„Selbsttragend (also Rahmen entbehrlich); bei gleichem Gewicht höhere Festigkeit als Blechaufbau; Stabilität bei Drehbeanspruchung; Geräuschkämpfung; Schwingungsfreiheit; einfache Unterhaltung und gute Reparaturmöglichkeit“

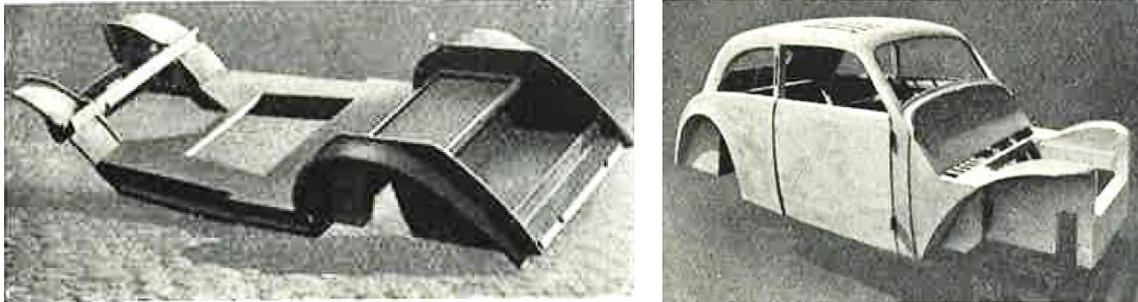


Abbildung 25: links: Karosserieboden aus Sperrholz; rechts: fertig verputzte Karosserie (Kollmann, 1936)

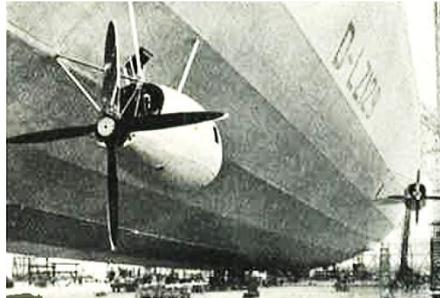


Abbildung 26: Holzschraube am D-LZ 129 Hindenburg (Kollmann, 1936)

2-3.3.4 Fassbau

Rüsch, Sander (1941) beschreibt in seinem Artikel die Herstellung eines bauchigen Dichtfasses aus Sperrholz. Hierzu wurden 2-3 mm dicke und 70-100 mm breite Furnierstreifen (Schäl furniere), auf eine Passform gewickelt. Diese wurden auf den Innenseiten mit Kunstharz bestrichen, überlappt und kreuzweise aufgebracht (Abbildung 27). Anschließend wurde das gesamte Fass mit einer beheizbaren Passform verpresst. Boden und Deckel bestanden ebenfalls aus Furniersperrholz. (Rüsch, Sander, 1941)

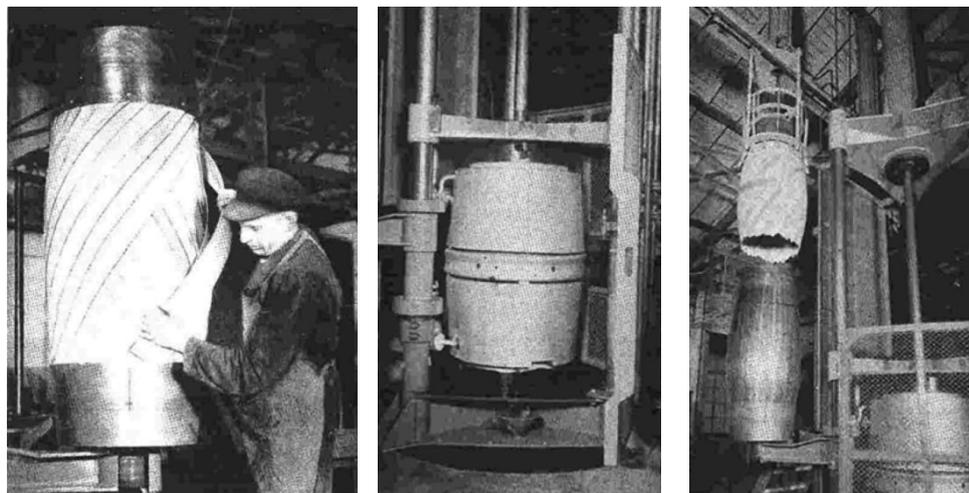


Abbildung 27: links: wickeln des Fasses mit Furnierstreifen; Mitte: Pressvorgang; rechts: fertiger Fassmantel (Rüsch, Sander, 1941)

2-3.3.5 Sonstiges

Weitere Anwendungsgebiete von Furnieren sind:

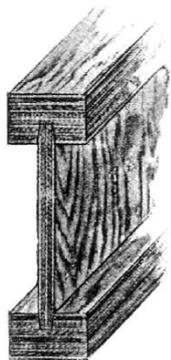
- Bootsbau
- Möbelbau
- Instrumentenbau
- Verpackungsindustrie
- Sportgerätebau usw.

2-4 1950 – HEUTE

2-4.1 ALLGEMEIN

Nach dem 2. Weltkrieg wurden Flugzeuge meist aus Metall gebaut und der Werkstoff Holz wurde sukzessive aus diesem Industriezweig verdrängt. Auf anderen Gebieten konnte allerdings ein vermehrter Einsatz von Furnierschichtholz und Furniersperrholz beobachtet werden. Im Folgenden wird nur mehr auf Furnierschichtholz (FSH) eingegangen. Im englischen Sprachraum wird dieses als Laminated Veneer Lumber (LVL) bezeichnet.

In den 70er-Jahren trafen sich Art TROUTNER und Harold THOMAS und entwickelten ein I-Profil aus Holz (truss joist). Dieses bestand aus einem Metallsteg und zwei Sperrholzflanschen. Da die Produktionskosten dafür relativ hoch waren, wurde es zu einem I-Profil aus reinem Holz weiterentwickelt. Man wollte es zu einem Massenprodukt machen. Es gab bereits früher Versuche Furnierschichtholz in größeren Mengen zu produzieren, man scheiterte allerdings immer am Herstellungsprozess. Schließlich gelang es TROUTNER gemeinsam mit Weyerhaeuser (Weyerhaeuser NR Company, USA) im Jahre 1971 eine Maschine zu entwickeln, welche kontinuierlich verleimtes Furnierschichtholz mit einer Dicke von 9,9 cm, einer Breite von 122 cm und einer Länge von 2440 cm zu fertigen. Das Produkt wurde mit dem Namen „Micro-Lam LVL“ auf den Markt gebracht (Abbildung 28). In Europa begann die Firma Finforest (heute: Mätsa Group; Espoo, Finnland) mit der industriellen Fertigung von Furnierschichtholz.



*Form-I
Industrial Products*



*MICRO=LAM
Laminated Veneer Lumber*



*Open Web Truss
Commercial Applications*



*Parallam
Parallel Strand Lumber*

Abbildung 28: Troutner's Erfindungen aus Furnierschichtholz (Reich, 1996)

Grund für diese Entwicklungen war die Notwendigkeit einer effizienteren Nutzung der Ressource Holz. Schaffer (1977) untersuchte in seiner Studie die Nutzung von Schäl furnieren, welche miteinander verklebt wurden. Als Vorteil sah er neben guten Festigkeitskennwerten vor allem die geringe Herstellungszeit durch den raschen Trocknungsvorgang sowie die Endlos-Produktion.

2-4.2 VERWENDUNG VON FURNIERSCHICHTHOLZ

2-4.2.1 Allgemein

Furnierschichtholz (FSH) ist ein Ingenieurholzprodukt. Es wird aus Furnieren hergestellt, welche meist durch Schälen bzw. auch durch Messern von Bäumen gewonnen werden. Diese werden anschließend getrocknet, in gleicher Faserrichtung orientiert und unter Druck miteinander verklebt. Zusätzlich kann die Verklebung bei erhöhter Temperatur erfolgen. Durch das Verkleben von mehreren Schichten, werden festigkeitsmindernde Merkmal der Einzelfurniere verteilt und es entsteht im Vergleich zum Ausgangsmaterial, ein homogeneres Material mit verbesserten mechanischen Eigenschaften. Ein weiterer Vorteil ist die quasi unlimitierte Länge, welche durch Fügen der Einzelfurniere realisiert werden kann. Durch die Verwendung von Baumstämmen mit geringem Durchmesser und geringerer Qualität, trägt es des Weiteren zu einer effizienten Nutzung der Holzreserven bei (Çolak et al., 2007).

Mombächer (1988) definiert Furnierschichtholz folgend:

„Furnierschichtholz (FSH) oder „Laminated Vener Lumber“ (LVL) werden platten- oder balkenförmige Holzwerkstoffe bezeichnet die aus mehreren überwiegend faserparallel verklebten Furnierschichten bestehen.“

Ähnlich der eben genannten Definition lautet jene nach ÖNORM EN 14374, 2005) folgendermaßen:

„Furnierschichtholz ist ein Verbund von Furnieren, in dem die Furniere vorwiegend in derselben Richtung ausgerichtet sind.“

Diese Definition schließt Furnierschichtholz mit Querlagen nicht aus. Die Anzahl der Furniere im Querschnitt muss mindestens fünf betragen, die Dicke der Einzelfurniere darf 6 mm nicht überschreiten.

2-4.2.2 Produkte

Auf die Produkte zweier europäischer Hersteller von Furnierschichtholz wird nun näher eingegangen:

- Kerto Furnierschichtholz LVL - Metsawood (Mätsa Group; Espoo, Finnland)
- BauBuche – Pollmeier (Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG; Creuzburg, Deutschland)

Kerto

Ist ein Furnierschichtholz aus Nadelholz (in der Regel Fichtenholz), wobei die einzelnen Schichten mit Phenolharz verklebt werden. Zum Einsatzbereich gehören neben Neubauten auch Reparaturen und Renovierungen. Die verschiedenen Kerto-Produkte (Kerto S, Kerto Q, Kerto T,...) werden aus 3 mm Schäl furnieren mit versetzten Stößen hergestellt. Die Produktion erfolgt im Durchlaufverfahren (Abbildung 30), wobei Platten bis zu einer Länge von 23 m realisiert werden können. (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013) In Tabelle 2 sind die mechanischen Kennwerte einer Kerto S Platte aufgelistet.



Abbildung 29: Kerto S, Furnierschichtholzplatte aus Fichte (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013)

KERTO-HERSTELLUNG

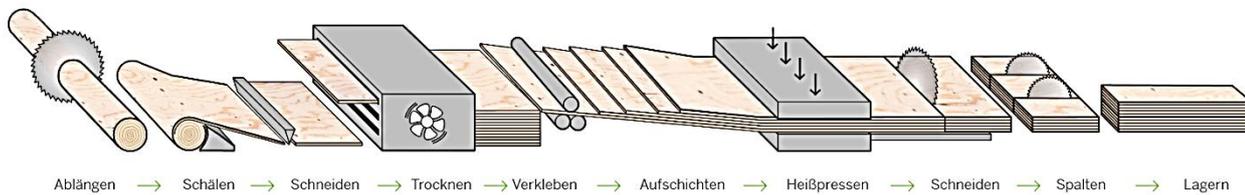


Abbildung 30: Herstellungsprozess Kerto (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013)

Tabelle 2: charakteristische Festigkeitswerte und E-Moduln für Kerto S in N/mm² (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013)

Plattenbeanspruchung		[N/mm ²]	Scheibenbeanspruchung		[N/mm ²]
Biegung \parallel zur Faser	$f_{m,0,k}$	50,0	Biegung	$f_{m,k}$	48,0
Biegung τ zur Faser	$f_{m,90,k}$	-	Zug \parallel zur Faser	$f_{t,0,k}$	38,0
Druck τ zur Faser	$f_{c,90,k}$	2,0	Zug τ zur Faser	$f_{t,90,k}$	0,8
Schub	$f_{v,k}$	2,3	Druck \parallel zur Faser	$f_{c,0,k}$	38,0
E-Modul	$E_{0,mean}$	13800	Druck τ zur Faser	$f_{c,90,k}$	6,0
Schubmodul	G_{mean}	500	Schub	$f_{v,k}$	4,4
			E-Modul	$E_{0,mean}$	13800
Rohdichte	ρ_k	480 kg/m ³	Schubmodul	G_{mean}	500

BauBuche

Im konstruktiven Holzbau kam in der Vergangenheit meist Nadelholz zum Einsatz. Unter anderem aufgrund des steigenden Vorrats an Laubholz im mitteleuropäischen Raum begann das deutsche Unternehmen „Pollmeier Massivholz GmbH & Co KG“ im Jahr 2011 mit der Entwicklung eines Furnierschichtholzes aus geschälten 3,5 mm dicken Buchenfurnieren. Im Jahr 2013 errichtete man schließlich das erste Furnierschichtholzwerk zur Laubholzverarbeitung. Durch die hohe Festigkeit von Buchenholz können schlankere Bauteile hergestellt werden. Neben Platten werden auch Balken, Möbel und Paneele für den Innenausbau hergestellt. (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, 2014a). In Abbildung 32 sind die mechanischen Kennwerte von BauBuche S und BauBuche Q aufgelistet.

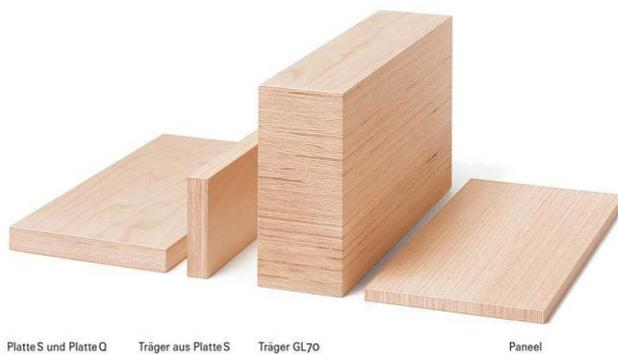


Abbildung 31: links: Produkte aus BauBuche; rechts: möglicher Einsatzbereich der Baubuche (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, 2014a)

	BauBuche S	BauBuche Q
Art der Beanspruchung	Furnierschichtholz Buchen-FSH längslagig	Furnierschichtholz Buchen-FSH querlagig
Nenndicke in mm	$20 \leq B \leq 80$	$20 \leq B \leq 80$
Festigkeitskennwerte		
Plattenbeanspruchung		
Biegung $f_{m,0,k}$	65	45
Druck $f_{c,90,k}$	10	10
Schub $f_{v,0,k}$	8	3,3
Schub (Roll) $f_{v,k}$	nicht deklariert	3,3
Scheibenbeanspruchung		
Biegung ^{a)} $f_{m,0,k}$	70	60
Zug zur Faser $f_{t,0,k}$	60	40
Zug ⊥ zur Faser $f_{t,90,k}$	1,5	17
Druck zur Faser $f_{c,0,k}$	41,6	24,2
Druck ⊥ zur Faser $f_{c,90,k}$	14	14
Schub $f_{v,0,k}$	8	9
Steifigkeitskennwerte		
Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$	16.800	11.800
Elastizitätsmodul $E_{0,05}$	14.900	10.700
Elastizitätsmodul $E_{90,mean}$	470	3.700
Schubmodul hochkant G_{mean}	760	890
Schubmodul flachkant G_{mean}	850	430
Rohdichte ρ_k	680	680

Abbildung 32: charakteristische Festigkeitswerte und E-Moduln der BauBuche S (ohne Querlagen) und Baubuche Q (mit Querlagen) (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, 2014b)

KAPITEL 3: CHARAKTERISIKA DER FICHTE, BUCHE UND BIRKE

In diesem Kapitel wird auf die makro- und mikroskopische Struktur von Nadel- und Laubholz eingegangen, da diese maßgebenden Einfluss auf die Herstellung von Furnieren und in weiterer Folge Furnierschichtholz hat. Des Weiteren soll eine kurze Beschreibung der Holzarten Buche, Birke und Fichte, samt ausgewählter mechanischer Kennwerte von fehlerfreiem Kleinproben den Vergleich mit den in weiterer Folge vorgestellten Werten aus den durchgeführten Prüfungen ermöglichen.

3-1 STRUKTUR DES HOLZES

Bei der Herstellung von Furnieren durch Schälén, kommt es durch eine nicht konstante Verteilung physikalischer Eigenschaften über den gesamten Stamm, zu unterschiedlichen Eigenschaften der Furniere in Abhängigkeit der Stelle, von welcher diese entnommen werden. So beeinflusst zum einen der makroskopische Aufbau des Querschnittes, und zum Anderen die unterschiedlichen Eigenschaften des Holzes längs des Stammes die mechanischen Eigenschaften beträchtlich. Zusätzlich hat der mikroskopische Aufbau durch die geringen Dicken der Furniere und der Beschädigung der Struktur beim Schälvorgang großen Einfluss auf selbige.

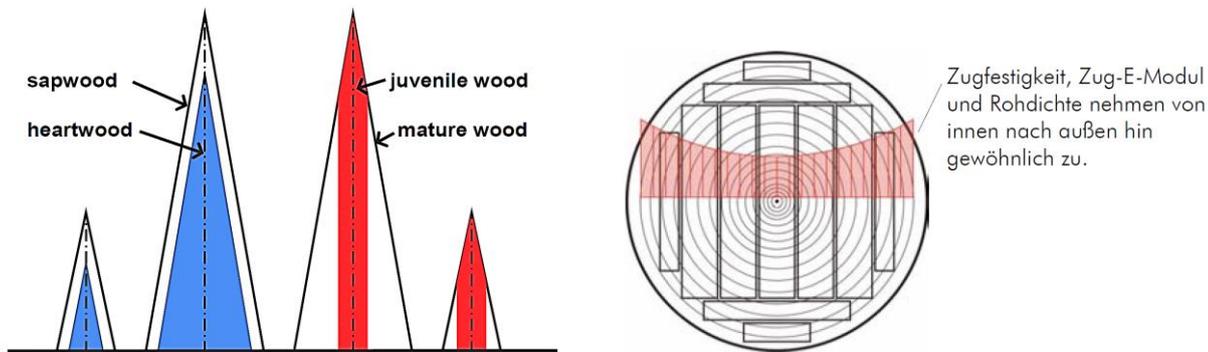


Abbildung 33: links: blau: Verteilung von Splint- und Kernholz längs der Stammachse, rot: Verteilung von juvenilem und adultem Holz (Brandner, Thiel, 2015); rechts: Verteilung von Zugfestigkeit, Zug-E-Modul und Rohdichte über den Querschnitt (Schickhofer, 2006)

3-1.1 MAKROEBENE

Generell werden bei Bäumen entsprechend ihrer Funktion drei Gewebearten unterschieden: Festigungs-, Leit- und Speichergewebe. Das Festigungsgewebe besteht bei Nadelhölzern aus Tracheiden, welche gleichzeitig dem Wasser- und Nährstofftransport dienen. Die etwas komplexer aufgebauten Laubhölzer besitzen Librifasern und zum Teil Fasertracheiden als festigende Elemente. Der Wassertransport wird von mehr oder weniger weitlumigen Gefäßen übernommen. Das Speichergewebe besteht sowohl bei Nadelhölzern als auch bei Laubhölzern aus Parenchymzellen. (Grosser, 1977)

Bei Betrachtung des Querschnitts eines Holzstammes, lässt sich bereits mit freiem Auge der makroskopische Aufbau des Holzes erkennen (schematische Darstellung in Abbildung 34). Hierzu zählen von außen nach innen betrachtet:

- die Rinde, bestehend aus Borke und Bast
- das Kambium, makroskopisch nicht erkennbar
- der Holzkörper, bestehend aus Splintholz
- die innenliegende Markröhre (Grosser, 1977)

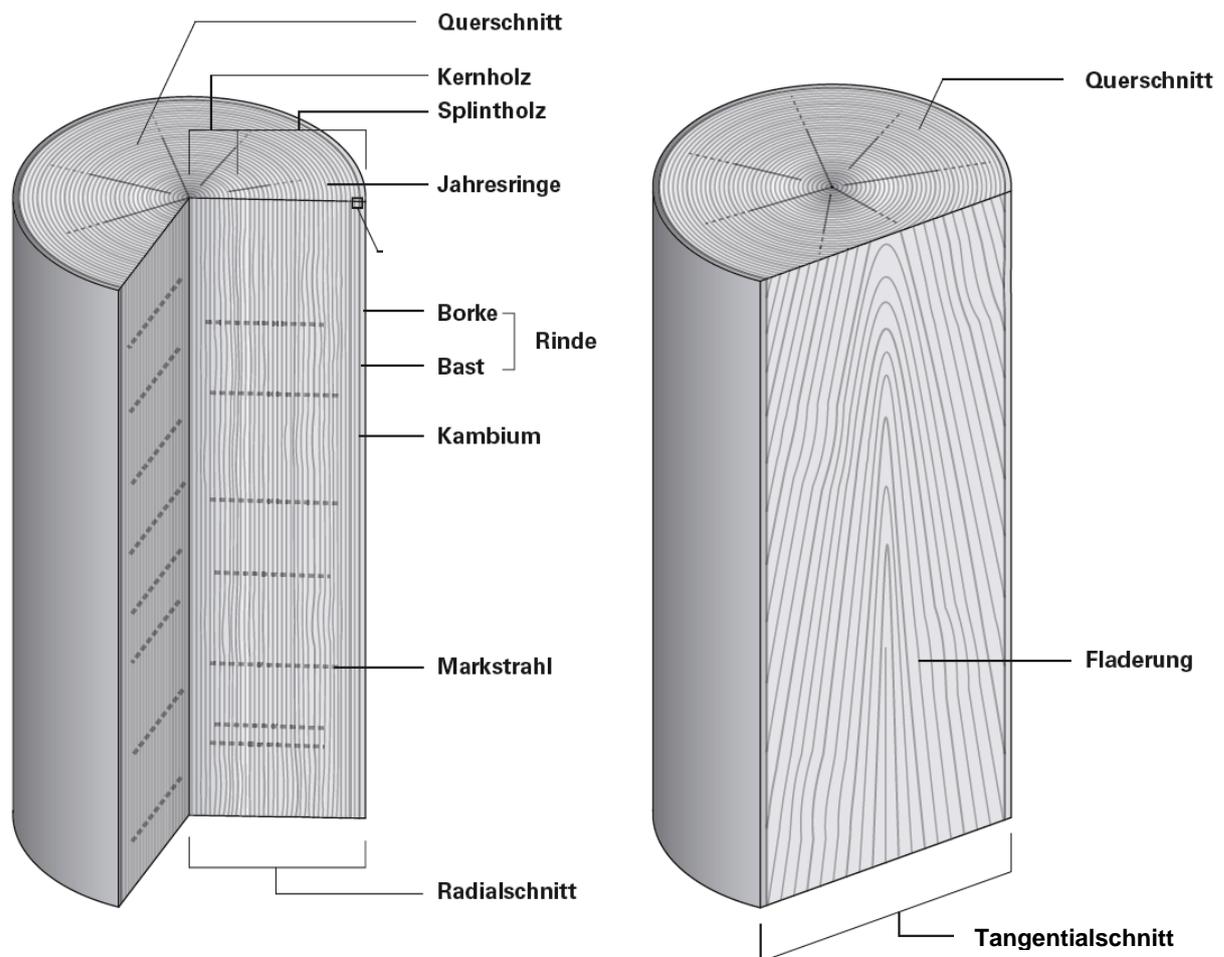


Abbildung 34: Quer-, Radial- und Tangentialschnitt durch einen Baumstamm (Moro et al., 2009)

Zuwachszonen und Jahrringe

In Klimagebieten mit ausgeprägten Jahreszeiten kommt es durch die winterliche Vegetationsruhe zu unterschiedlichen Zuwachsraten während eines Jahres (siehe Jahrringe im Querschnitt). Man unterscheidet generell zwischen Früh- und Spätholz. Bei selbigen unterscheiden sich die Zellen in Art, Größe, Anzahl und Verteilung. Das Spätholz weist eine höhere Rohdichte und Festigkeit sowie höhere Quell- und Schwindwerte als Frühholz auf. Die vornehmliche Aufgabe ist daher die Festigung der Struktur. Hauptaufgabe des Frühholzes ist der rasche Wassertransport. Die Ausprägung der Zuwachszonen ist abhängig von der Holzart und hat maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte. (Grosser, 1977)

Neben der Verteilung und Größe der Gefäße können bei gewissen Laub- und Nadelholzarten auch das Längsparenchym, Harzkanäle, Holzstrahlen oder Markflecken visuell wahrgenommen werden.

Holzstrahlen sind strahlenförmig zur Stammmitte gerichtet und kommen in unterschiedlicher Größe und Häufigkeit bei allen Laub- und Nadelhölzern vor. (Grosser, 1977)

Juveniles und adultes Holz

Als juveniles Holz wird jenes Holz bezeichnet, welches in unmittelbarer Nähe der Markröhre gebildet wird (je nach Holzart und Wachstumsbedingungen, 5-25 Jahrringe). Die physikalischen Eigenschaften (z.B. Rohdichte, Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften) des Holzes sind abhängig von der Holzart und unterscheiden sich zum adulten Holz durch: geringere Rohdichte; dünnere Zellwände und größere Zelllumen; geringerer Spätholzanteil; weniger Einlagerung von Kernstoffen. Ein weiteres Abgrenzungsmerkmal zum adulten Holz ist die rasche Änderung der Eigenschaften in radialer Richtung. (Jeske, 2010)

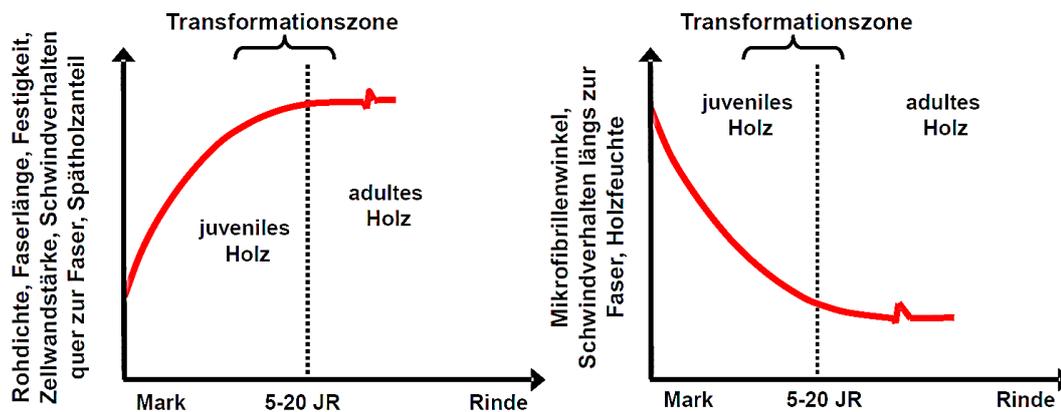


Abbildung 35: schematische Darstellung der Eigenschaften im Holz in radialer Richtung (Brandner, Thiel, 2015) in Anlehnung an Bendtsen (1978))

3-1.2 MIKROEBENE

Bei der Beschreibung der Mikrostruktur von Holz muss zwischen den entwicklungsgeschichtlich gesehen älteren Nadelholzarten und den jüngeren, höher entwickelten Laubholzarten unterschieden werden.

Nadelhölzer

Nadelbäume haben einen einfachen und regelmäßigen Aufbau, welcher sich letztlich aus zwei Zellarten zusammensetzt: den Tracheiden und Parenchymzellen, welche allerdings noch weiter unterteilt werden können. In Abbildung 36 sind die Längstracheiden, welche mit 90 bis 95 % den Großteil des Raumes einnehmen zu erkennen. Die restlichen 5-10 % werden von Längsparenchym und den radial angeordneten Holzstrahlen eingenommen. Eine Auflistung sämtlicher Zellarten samt Funktion ist in Tabelle 3 dargestellt.

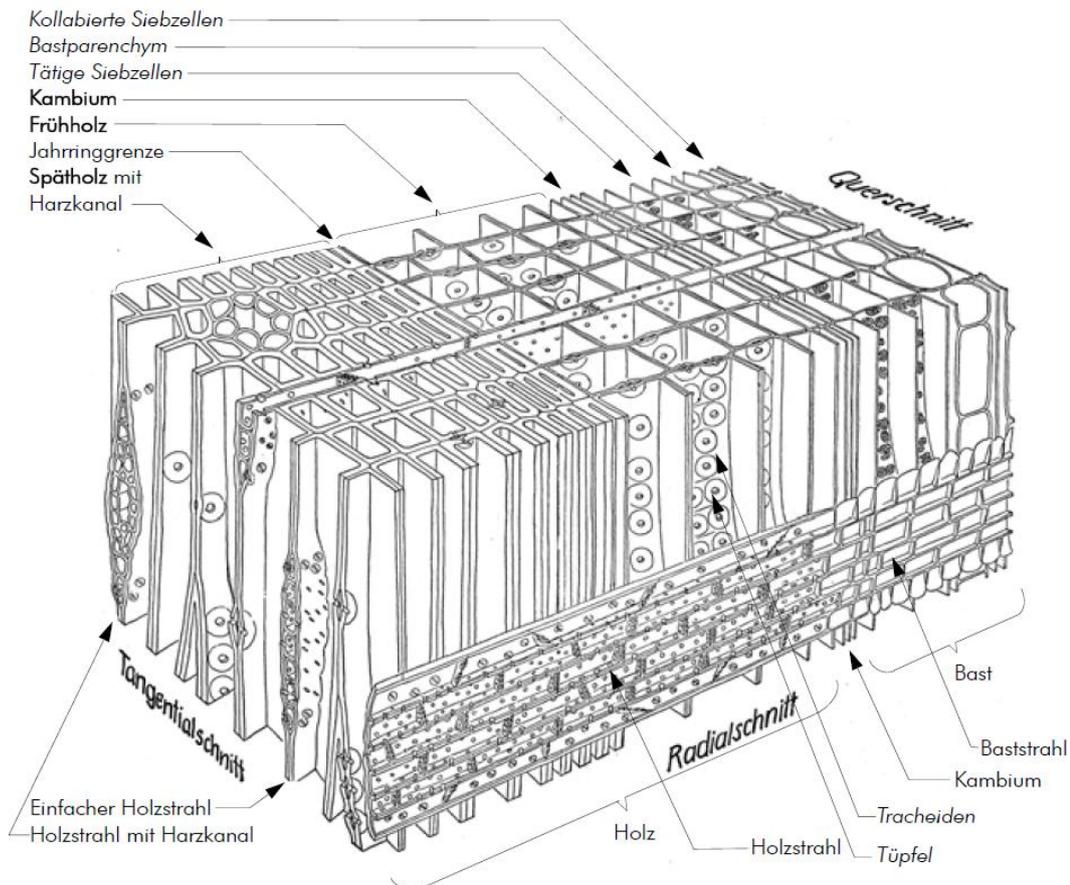


Abbildung 36: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast einer Lärche in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau, 1951)

Tabelle 3: Zellarten samt Funktionen von Nadelhölzern nach Grosser (1977)

	Zellarten	Funktion
axial ausgerichtet	Längstracheiden	
	Frühholztracheiden	Wasserleitung
	Spätholztracheiden	Festigung
	Längsparenchym	Speicherung
	Epithelzellen vertikaler Harzkanäle	Harzausscheidung
radial ausgerichtet (Holzstrahlen)	Quertracheiden (Holzstrahltracheiden)	Wasserleitung
	Strahlenparenchym	Speicherung
	Epithelzellen horizontaler Harzkanäle	Harzausscheidung

Beschreibung der einzelnen Zellarten

Längstracheiden:

Tracheiden werden mehrere Millimeter (1,3 – 4,8 mm bei Fichtenholz) lang und sind tote Holzelemente. Ihre Funktion ist die Wasserleitung und Festigung. Im Querschnitt sind Tracheiden in regelmäßigen radialen Reihen angeordnet, wobei die Durchmesser von Früh- bis Spätholz abnehmen, die Wanddicken allerdings zunehmen. Aufgrund dieser strukturellen Unterschiede sind deutliche Jahringgrenzen erkennbar.

Holzstrahlen:

Holzstrahlen sind für die Stoffleitung und Speicherung zuständig und durchziehen den Holzkörper als schmale radiale Bänder.

Längsparenchym:

Längsparenchym besteht aus dünnwandigen, meist rechteckig-prismatischen Zellen, welche für die Stoffspeicherung zuständig sind. Bei den bei uns heimischen Nadelhölzern ist Parenchym allerdings nur sehr schwach ausgebildet.

Harzkanäle:

Harzkanäle sind miteinander vernetzt und verlaufen längs und quer zur Stammachse. Horizontale verlaufen in den Holzstrahlen, vertikale überwiegend im Spätholz. Ihre Aufgabe ist die Harzausscheidung.

(Grosser, 1977)

Laubhölzer

Die höher entwickelten Laubholzarten haben im Vergleich zum Nadelholz einen deutlich komplexeren Aufbau. So übernehmen spezielle Zelltypen verschiedene Funktionen. In Abbildung 37 ist ein Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast der Birke dargestellt. Eine Auflistung sämtlicher Zellarten samt Funktion ist in Tabelle 4 abgebildet.

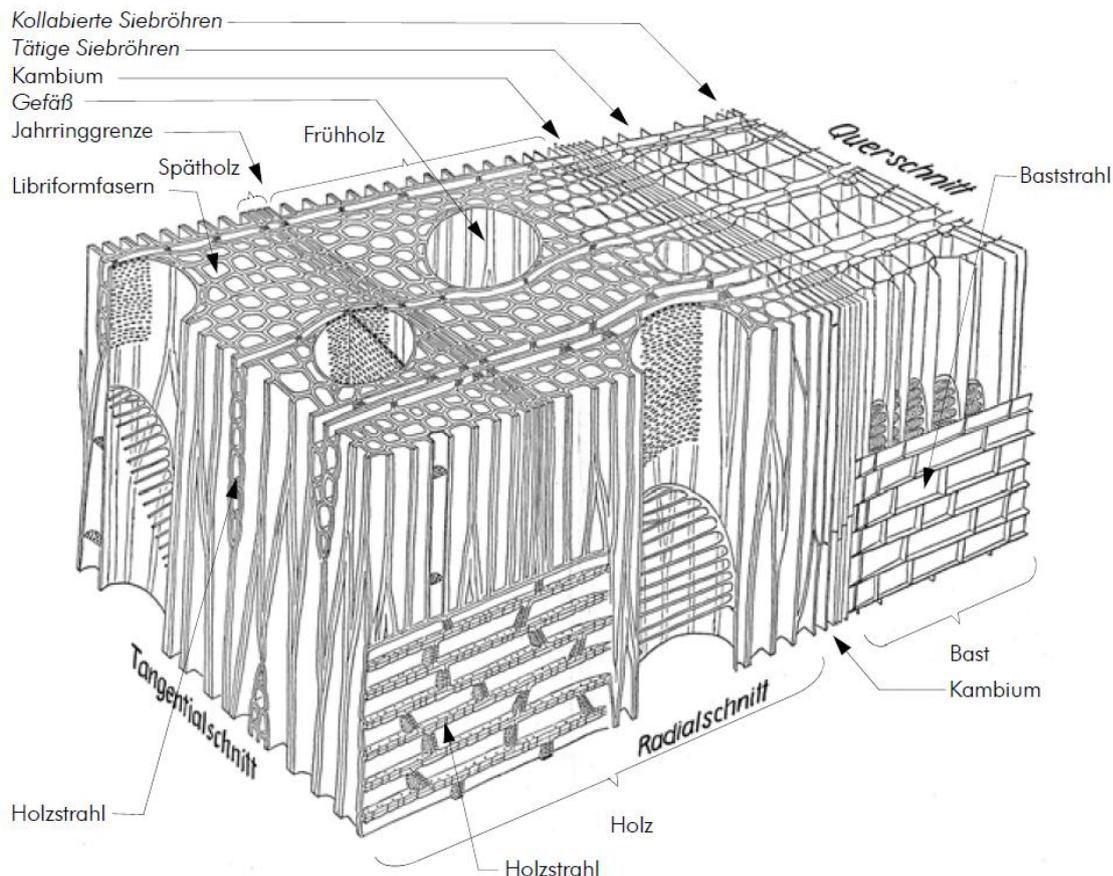


Abbildung 37: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast einer Birke in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau, 1951)

Tabelle 4: Zellarten samt Funktionen von Laubhölzern nach Grosser (1977)

	Zellarten	Funktion
axial ausgerichtet	Gefäße	Wasserleitung
	Gefäßtracheiden (vaskulare Tracheiden)	Wasserleitung
	vasizentrische Tracheiden	Wasserleitung
	Längsparenchym	Speicherung
	Libroformfasern	Festigung
	Fasertracheiden	Festigung
	Epithelzellen vertikaler Harzkanäle ^{a)}	Harzausscheidung
radial ausgerichtet (Holzstrahlen)	Strahlenparenchym	Speicherung
	Epithelzellen horizontaler Harzkanäle	Harzausscheidung

^{a)} kommen bei einheimischen Laubhölzern nicht vor

Beschreibung der einzelnen Zellarten

Gefäße:

Die Gefäße bestehen aus mehreren Gefäßgliedern, welche zu axial verlaufenden röhrenartigen Zellreihen verschmelzen. Die Wände der Gefäße sind verholzt und das Wasser kann ungehindert von Element zu Element fließen. Abhängig von der Holzart variiert die Länge von wenigen Zentimetern bis hin zu Gefäßen, welche sich über die gesamte Baumhöhe erstrecken. Die Gefäße sind weitlumig und an den Enden perforiert.

Bei Laubhölzern unterscheidet man aufgrund von Anordnungen und Größe der Gefäße drei Hauptgruppen:

- ringporige,
- halbringporige und
- zerstreutporige Hölzer (Abbildung 38)

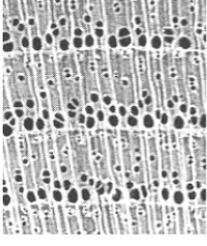
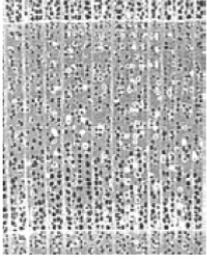
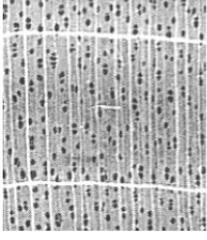
Anordnung	Frühholz	Spätholz	Abbildung	Beispiele
ringporig (Jahringgrenze deutlich)	besonders weite und zu einem ein-, zwei- oder mehrreihigen Ring angeordnete Gefäße	sehr viele kleine Gefäße; mehr oder weniger Übergangslos zum Frühholz		Esche, Außenbauhölzer: Eiche, Robinie, Edelkastanie
halbringporig (Jahringgrenze noch deutlich), Übergang von Ring- zur Zerstreutporigkeit	Gefäße reichlicher als im Spätholz, Durchmesser zum Spätholz hin i. d. R. abnehmend	Gefäße spärlicher und mit i. d. R. geringerem Durchmesser als im Frühholz		Kirschbaum, Nussbaum, einige tropische Holzarten
zerstreutporig (Jahringgrenze häufig undeutlich)	über den gesamten Jahrring wenige oder keine Unterschiede hinsichtlich der Verteilung und Größe der Gefäße			Rotbuche, Pappel, Birke, Rosskastanie, viele tropische Holzarten

Abbildung 38: Porigkeit von Laubhölzern (Schickhofer, 2006)

Längsparenchym (Parenchym):

Es dient der Speicherung. Das Längsparenchym ist bei den meisten Laubholzarten deutlich stärker angelegt als bei Nadelhölzern. Bezüglich der Form wird zwischen Parenchymsträngen und fusiformen Parenchymzellen unterschieden.

Holzstrahlen:

Im Gegensatz zu Nadelholz variiert die Zusammensetzung, Form und Dimension bei Laubhölzern sehr stark. Die Strahlen ziehen sich meist über 4-10 Zellreihen, können sich aber mitunter bei der Buche über bis zu 20 Reihen erstrecken. Holzstrahlen sind radial ausgerichtet.

Fasertracheiden:

Diese meist dickwandigen, gewöhnlich englumigen, an den Enden zugespitzte Zellen übernehmen sowohl Festigungs- als auch Leitungsfunktion.

Libroformfasern:

Ähnlich den Fasertracheiden, allerdings sind sie häufig etwas dicker und englumiger.

(Grosser, 1977)

3-1.3 BESCHREIBUNG DER HOLZARTEN BIRKE, BUCHE UND FICHTE

Nachfolgend findet sich eine Beschreibung der Holzarten Buche, Birke und Fichte. Neben der Baumbeschreibung wird auf spezielle Charakteristika im Aufbau, mechanische Kennwerte und physikalische Eigenschaften eingegangen.

Fichte

Baumbeschreibung: (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Name: Gemeine Fichte, *Picea abies* K.

Baumhöhe: bis 30 m – 50 m

Stammlänge: bis zu 20 m

Stamm – Mitteldurchmesser: bis 1,2 m

Stammform: gerade, schlank, vollholzig, im Freistand abholzig

Farbe: gelblichweiß bis rötlichweiß

Rinde: in der Jugend glatt und hellbraun; im Alter in dünnen Schuppen abblättern, rotbraun bis grau

Vorkommen (Schickhofer, 2006)

Europa: Mittel-, Südost- und Nordosteuropa

Österreich: ab 600 - 800 m Seehöhe

Makroskopische Strukturmerkmale

Querschnitt: Jahrringgrenze deutlich; Spätholz rötlichgelb, Frühholz weißlich; Übergang Frühholz-Spätholz innerhalb des Jahrringes überwiegend allmählich

Tangentialschnitt: Spätholzzonen bilden Flader, Radialschnitt: gestreifte Struktur

Mikroskopische Strukturmerkmale (Grosser, 1977)

Tracheiden: ringporig; Jahrringe deutlich voneinander abgesetzt; dickere Zellwände und kleinere Radialdurchmesser bei Frühholztracheiden

Holzstrahlen: harzgangführende Strahlen; selten über 20 Zellen hoch

Parenchym: spärlich vorhanden

Harzkanäle: vereinzelte vertikale Harzgänge im Spätholz

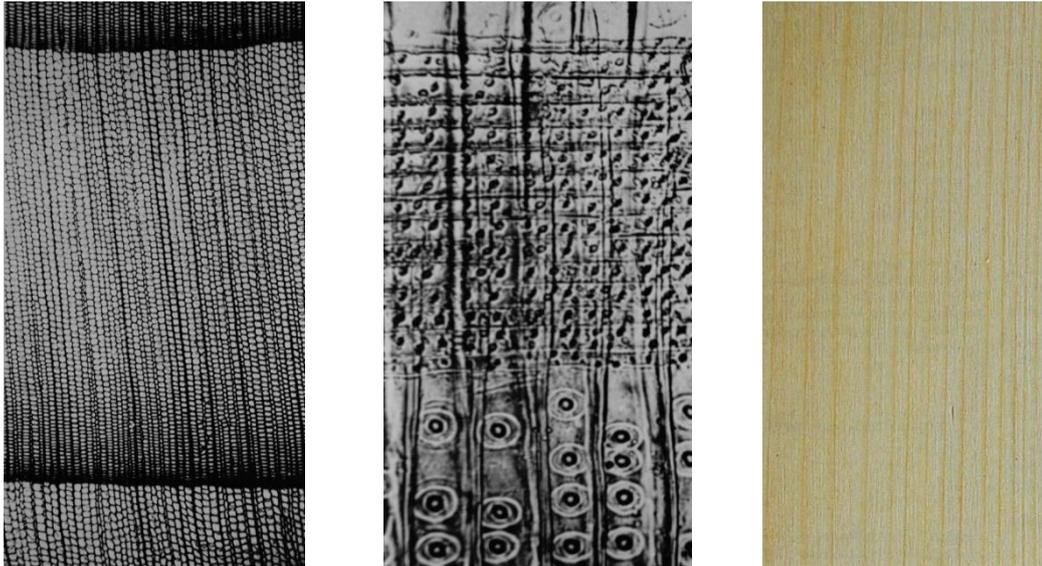


Abbildung 39: Makroskopische Struktur der Fichte; von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und ein Halbradialschnitt eines Massivholzes (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Mechanische Kennwerte

In Tabelle 5 ist eine Zusammenstellung der mechanischen Kennwerte von Kleinproben aus Fichtenholz aufgelistet nach Kollmann (1951), Ehrhart (2014) und ÖNORM B3012, 2003.

Tabelle 5: mechanische Kennwerte von Fichtenholz an fehlerfreien Kleinproben

Fichte					
$\rho_{15,mean}^{1)}$	kg/m ³	470	$f_{t,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	2,7
$E_{0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	11000	$f_{c,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	50,0
$E_{90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	550	$f_{c,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	5,8
$G_{090,12,mean}^{3)}$	N/mm ²	625	$f_{m,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	72,0
$G_{9090,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	95	$f_{v,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	6,7
$f_{t,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	90,0	$f_{v,90,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	1,9

¹⁾ ...Kollmann (1951) ²⁾ ...Ehrhart (2014) ³⁾... ÖNORM B3012, 2003

Physikalische Eigenschaften (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Darrdichte: 300 – 640 kg/m³

Rohdichte (u = 12-15%): 330 – 680 kg/m³

Porenanteil: ~ 71 %

Schwindsatz: längs = ~0,3 %; radial = ~3,5-3,7 %; tangential = ~7,0-8,8 %; Volumen = ~11,6 – 12,0 %

Natürliche Dauerhaftigkeit (ÖNORM EN 350-1, 1994), (ÖNORM EN 350-2, 1994)

Pilz: 5 (nicht dauerhaft)

Hausbockkäfer: SH (anfällig, auch Kernholz ist anfällig)

Anobium: SH (anfällig, auch Kernholz ist anfällig)

Termiten: S (anfällig)

Buche

Baumbeschreibung: (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Name: Rotbuche, *Fagus sylvatica* L.

Baumhöhe: bis 20 m (in Ausnahmefällen bis 35 m)

Stammlänge: bis zu 20 m

Stamm – Mitteldurchmesser: 0,9 – 1,0 m

Stammform: zylindrisch

Farbe: gelbrötlich bis rötlichbraun; Falschkern rot bis braun, wolkig abgestuft

Rinde: in der Jugend glatt, dünn, graugrün mit hellem Schimmer; im Alter silbergrau

Blätter: oval und ganzrandig

Vorkommen (Schickhofer, 2006)

Europa: West-, Mittel- und Südeuropa; im Norden in der Ebene und im Süden nur im Gebirge

Österreich: in Tallagen bis ca. 1400 m Seehöhe

Makroskopische Strukturmerkmale

Querschnitt: Jahrringgrenze deutlich erkennbar, Gefäße erst unter der Lupe erkennbar

Tangentialschnitt, Radialschnitt : große Holzstrahlen (mit bloßem Auge erkennbar) (Abbildung 40)

Mikroskopische Strukturmerkmale (Grosser, 1977)

Gefäße: zerstreutporig; Abnahme von Zahl und Größe zum Spätholz hin; 80-180 / mm², rundlich bis oval und polygonal im Querschnitt; Tangentialdurchmesser ~60-80 µm

Parenchym: reichlich, zwischen den Fasern des Grundgewebes verteilt

Holzstrahlen: 2 Arten von Holzstrahlen: einreihig und zwei- bis 25-reihig; meist homogen verteilt, auf Längsschnitten mehrere mm hoch

Fasern: dickwandig und überwiegend aus Libroformfasern; geringer Anteil an Fasertracheiden

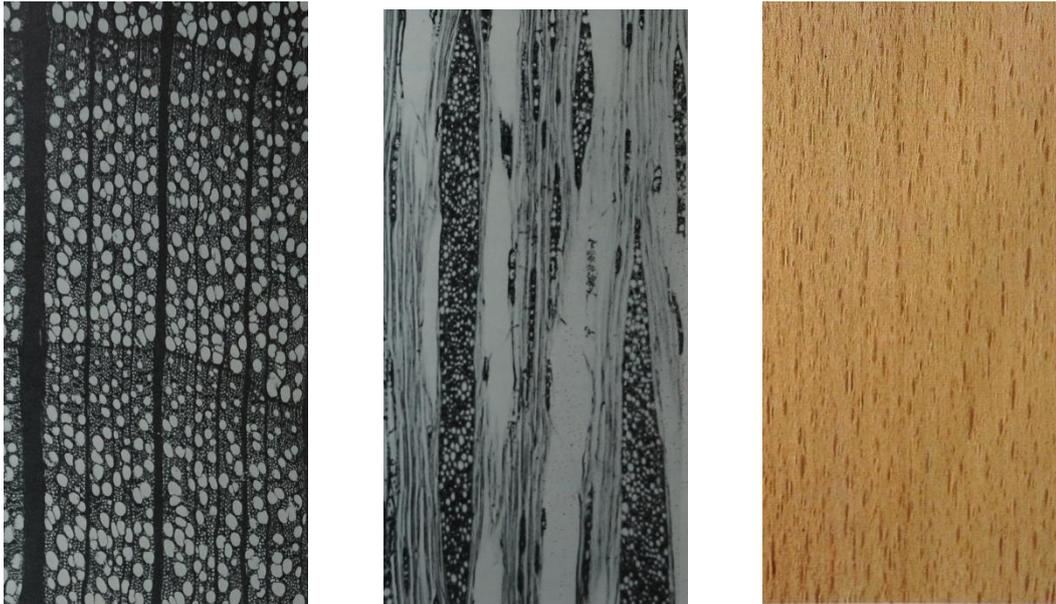


Abbildung 40: Mikro- und Makroskopische Struktur der Buche; von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und Messerfurnier (Tangentialschnitt) (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Mechanische Kennwerte

In Tabelle 6 ist eine Zusammenstellung der mechanischen Kennwerte von Kleinproben aus Buchenholz nach Kollmann (1951), Ehrhart (2014) und ÖNORM B3012, 2003 aufgelistet.

Tabelle 6: mechanische Kennwerte von Buchenholz an fehlerfreien Kleinproben

Buche					
$\rho_{15,mean}^{1)}$	kg/m ³	720	$f_{t,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	7,0
$E_{0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	16000	$f_{c,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	62,0
$E_{90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	1500	$f_{c,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	9,5
$G_{090,12,mean}^{3)}$	N/mm ²	1360	$f_{m,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	123,0
$G_{9090,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	344	$f_{v,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	8,0
$f_{t,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	135,0	$f_{v,90,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	5,4

¹⁾ ...Kollmann (1951) ²⁾ ...Ehrhart (2014) ³⁾ ... ÖNORM B3012, 2003

Physikalische Eigenschaften (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Darrdichte: 490 – 880 kg/m³

Rohdichte (u = 12-15%): 540 – 910 kg/m³

Porenanteil: ~ 55 %

Schwindsatz: längs = ~0,3 %; radial = ~5,8 %; tangential = ~11,8 %; Volumen = ~14,0 – 21,0 %

Natürliche Dauerhaftigkeit (ÖNORM EN 350-1, 1994), (ÖNORM EN 350-2, 1994)

Pilz: 5 (nicht dauerhaft)

Anobium: S (anfällig)

Termiten: S (anfällig)

Birke

Baumbeschreibung (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Name: Birke, *Betula pendula* R.

Baumhöhe: 20 – 25 m

Stammlänge: bis 15 m

Stamm – Mitteldurchmesser: 0,3 – 0,8 m

Stammform: zylindrisch, gelegentlich Verformungen am Stammfuß

Farbe: gelblichweiß, rötlichweiß bis hellbräunlich; im Alter fakultativer dunkelbrauner bis brauner Kern

Rinde: in horizontalen Bändern sich ablösend; weiß, glänzend; am unteren Stammteil tiefrissig, grobborkig, schwärzlich

Blätter: dreieckig bis rautenförmig, mit lang ausgezogener Spitze, ihr Rand ist doppelt gesägt

Vorkommen (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Europa, Asien bis Japan; Nordgrenze 65 °N ; Südgrenze bis in die Steppengebiete Russlands

Österreich: in Tallagen bis ca. 1400 m Seehöhe, häufig in Parkanlagen

Makroskopische Strukturmerkmale

Querschnitt: Jahrringgrenze mehr oder weniger deutlich, Gefäße und Holzstrahlen selbst unter der Lupe kaum erkennbar

Mikroskopische Strukturmerkmale (Grosser, 1977)

Gefäße: zerstreutporig und gleichmäßig über die Jahrringe verteilt; 30-50 / mm², rundlich bis eckig; Tangentialdurchmesser ~90 µm

Parenchym: zwischen den Fasern des Grundgewebes verteilt

Holzstrahlen: ein- bis vierreihig; Höhe variabel, bis 30 Zellen; dickwandige Zellen mit bräunlichen Inhaltsstoffen

Fasern: mittelwandig und überwiegend aus Librifasern



Abbildung 41: Makroskopische Struktur der Birke, von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und Schälfnur (Tangentialschnitt) (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Mechanische Kennwerte

In Tabelle 7 ist eine Zusammenstellung der mechanischen Kennwerte von Kleinproben aus Birkenholz nach Kollmann (1951), Ehrhart (2014) und ÖNORM B3012, 2003 aufgelistet.

Tabelle 7: mechanische Kennwerte von Birkenholz an fehlerfreien Kleinproben

Birke					
$\rho_{15,mean}^{1)}$	kg/m ³	650	$f_{t,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	7,0
$E_{0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	16500	$f_{c,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	51,0
$E_{90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	800	$f_{c,90,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	-
$G_{090,12,mean}^{3)}$	N/mm ²	1065	$f_{m,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	147,0
$G_{9090,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	179	$f_{v,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	12,0
$f_{t,0,12,mean}^{1)}$	N/mm ²	137,0	$f_{v,90,12,mean}^{2)}$	N/mm ²	3,5

¹⁾ ...Kollmann (1951) ²⁾ ...Ehrhart (2014) ³⁾ ... ÖNORM B3012, 2003

Physikalische Eigenschaften (Wagenführ, Scheiber, 1985)

Darrdichte: 460 – 800 kg/m³

Rohdichte (u = 12-15%): 510 – 830 kg/m³

Porenanteil: ~ 59 %

Schwindsatz: längs = ~0,6 %; radial = ~5,3 %; tangential = ~7,8 %; Volumen = ~13,7 – 14,2 %

Natürliche Dauerhaftigkeit (ÖNORM EN 350-1, 1994), (ÖNORM EN 350-2, 1994)

Pilz: 5 (nicht dauerhaft)

Anobium: S (anfällig)

Termiten: S (anfällig)

KAPITEL 4: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON EINZELFURNIEREN UND FURNIERSCHICHTHOLZ

4-1 ALLGEMEIN

Aufgrund der erheblichen Anzahl an Herstellungsschritten vom Baum zum Furnier, und in weitere Folge zum Endprodukt Furnierschichtholz, nehmen einige Parameter Einfluss auf die äußere Erscheinung und die mechanischen Kennwerte. Neben dem Ausgangsmaterial haben die Vorbehandlung und die Herstellung selbst einen großen Einfluss auf Farbe, Zeichnung und Struktur des Holzes. Da in der vorliegenden Arbeit der Einsatz von Furnieren als tragendes Element im Vordergrund steht, wird jedoch ausschließlich auf mechanische Kennwerte näher eingegangen. Auf den folgenden Seiten ist diese Thematik auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche aufgearbeitet. Im Speziellen werden die Einflüsse auf Buchen- und Birkenfurniere sowie Furnierschichtholz, welches aus diesen beiden Holzarten gefertigt ist, behandelt. Die Vergleichbarkeit der einzelnen Werte ist teils schwierig, da die Prüfungen zu etwaigen Einflussparametern meist an unterschiedlichen Probengrößen sowie nach unterschiedlichen Prüfverfahren durchgeführt wurden. Die Bezeichnung der Prüfkörpergröße von Einzelfurnieren sowie Furnierschichtholz wird in weiterer Folge mit $L \times B \times T$ festgelegt (Abbildung 42).

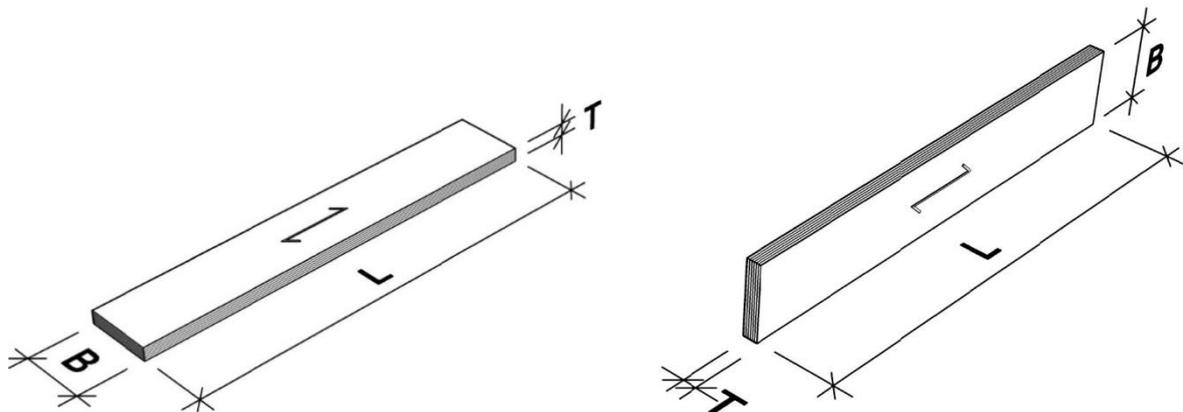
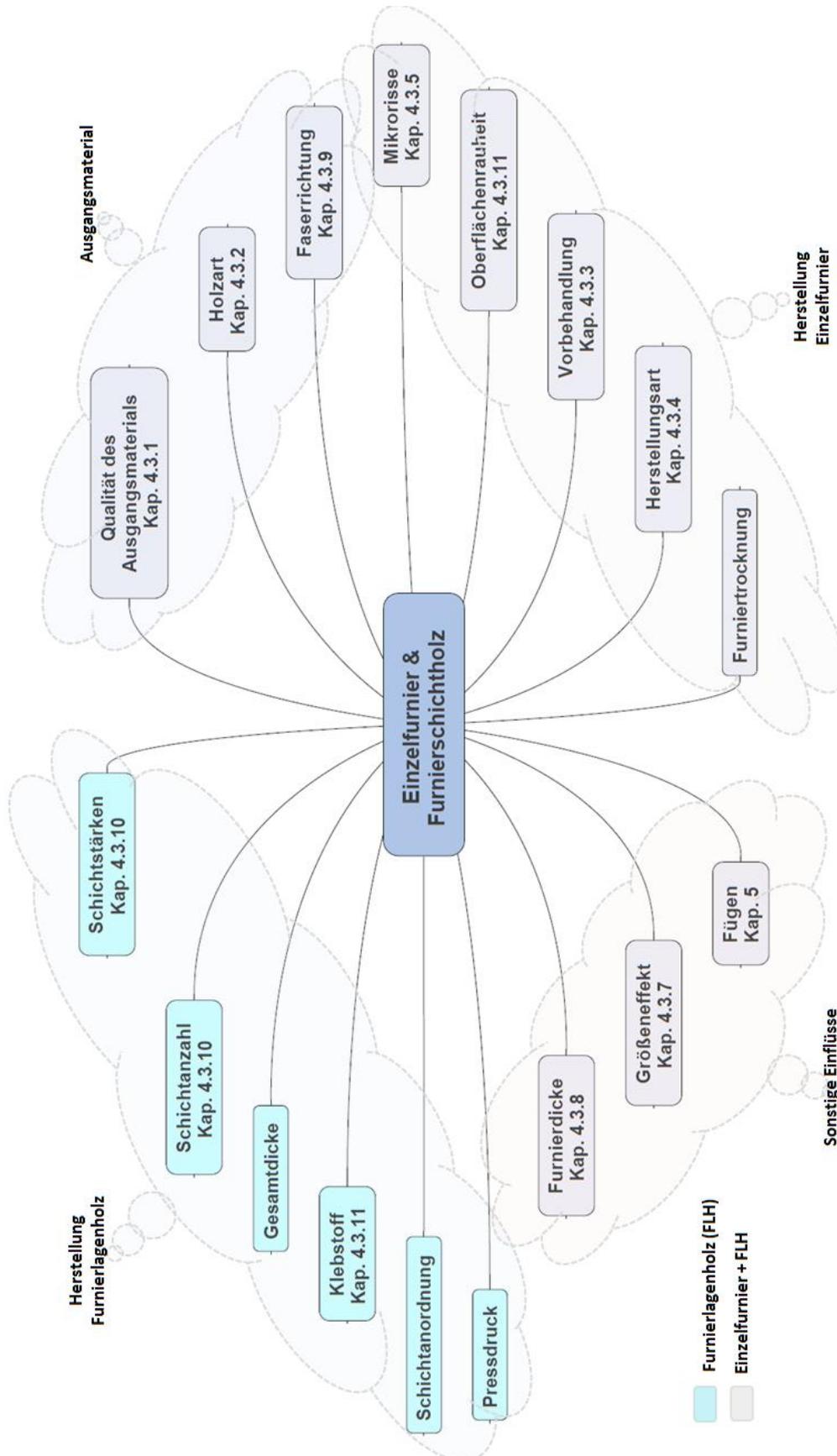


Abbildung 42: Bezeichnung der Abmessungen der Probekörper, Kennzeichnung der Faserrichtung des Deckfurniers bzw. der Längslagen (links: flachkant; rechts: hochkant)

Auf der nachfolgenden Seite soll einen Überblick über sämtliche Einflussparameter auf mechanische Eigenschaften von Einzelfurnieren und Furnierschichtholz gegeben. Weiters ist jeweils das Kapitel, in welchem näher darauf eingegangen wird, ausgewiesen.

4-2 ÜBERSICHT



4-3 EINFLÜSSE AUF MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

4-3.1 QUALITÄT DES AUSGANGSMATERIALS

Im Allgemeinen können Furniere aus nahezu jedem Holz gewonnen werden, wobei Hartholz durch bessere Biegeeigenschaften leichter zu schälen ist. Dadurch wird die Struktur des Holzes während der Herstellung weniger stark beschädigt.

Physikalische Kennwerte

Rohdichte: Ähnlich zu Vollholz ist auch bei Furnieren ein Zusammenhang zwischen Rohdichte und Festigkeit des Holzes gegeben. Abhängig von der Holzart ist dieser Zusammenhang unterschiedlich ausgeprägt. Die Rohdichte beeinflusst neben den mechanischen Kennwerten auch den Herstellungsprozess. So entsteht bei Hölzern geringerer Rohdichte eine rauere Oberfläche. Ein Nachteil bei dichteren Hölzern ist der größere Kraftaufwand bei der Herstellung, was in weiterer Folge zum vermehrten Auftreten von Schälrisse, sogenannten Mikrorisse führen kann (Details siehe Kapitel 4-3.5). (Lutz, 1971)

Fonselius (1997) zeigte den Zusammenhang von Rohdichte und E-Modul bzw. Biegefestigkeit an Furnierschichtholz aus Birke. Die Kennwerte nehmen annähernd linear mit der Rohdichte zu (Abbildung 43).

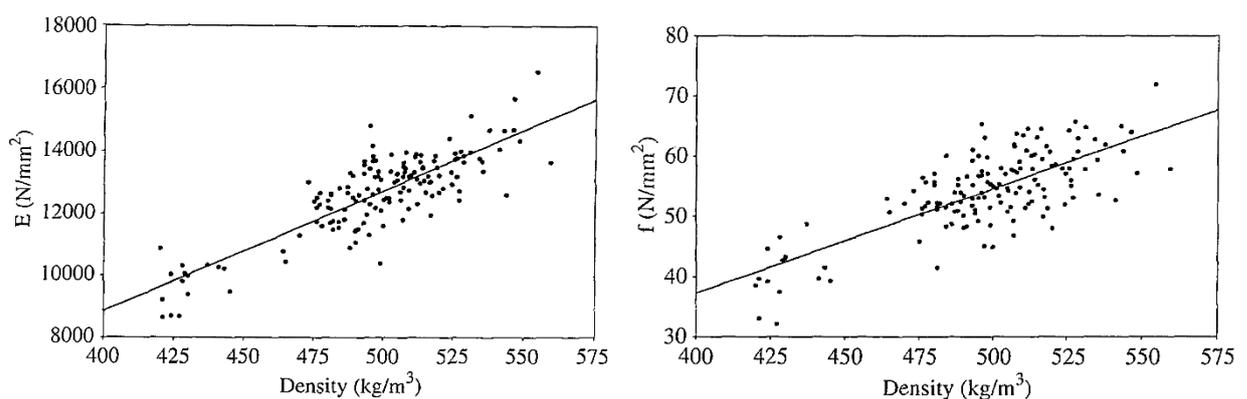


Abbildung 43: links: Zusammenhang von Rohdichte mit E-Modul (Korrelationskoeffizient = 0,838); rechts: Zusammenhang von Rohdichte Biegefestigkeit (Korrelationskoeffizient = 0,754) (Fonselius, 1997)

Dieser Zusammenhang wird von Saviana et al.(2009) bei Untersuchungen am Argentinian *Eucalyptus grandis* bestätigt.

Holzfeuchte: je höher der Feuchtegehalt, desto einfacher die Herstellung

Durchlässigkeit: hat Einfluss auf die Herstellung, Trocknung und Verklebungseigenschaften

Quellen bzw. Schwinden: je geringer das Quell- bzw. Schwindmaß, desto einfacher die Furnierherstellung

Holzstruktur: Da eine homogene Struktur von Vorteil ist, sind Holzarten mit zerstreutporigem Strukturaufbau besser für die Furnierherstellung geeignet.

Einflüsse mechanischer Kennwerte des Ausgangsmaterials

Da die mechanischen Kennwerte des Ausgangsmaterials ähnlich zu jenen des späteren Endprodukts sind, haben diese großen Einfluss. (Lutz, 1971)

4-3.2 HOLZART

Der Einfluss der Holzart auf die mechanischen Kennwerte am Furnier ist eindeutig gegeben. Die Werte an Einzelfurnieren sind jenen von Vollholz ähnlich, werden jedoch durch herstellungsbedingte Einflüsse und dem Aufbau des Holzes (mikroskopischer und makroskopischer Aufbau) stark beeinflusst. (Buchelt, Pfriem, 2011)

Pfriem, Buchelt (2011) untersuchte den Unterschied von Buchenfurnieren zu Buchenvollholz an Zugversuchen parallel und rechtwinklig zur Faser. Insgesamt wurden 80 Versuche an Einzelfurnieren (Probengröße: $L \times B \times T = 120 \times 14 \times 0,5$ mm), sowie 25 an Vollholz parallel (Probengröße: $200 \times 10 \times 4$ mm) und rechtwinklig (Probengröße: $90 \times 10 \times 4$ mm) zur Faser durchgeführt. Die Prüfkörper wurden aus einem 3 m Buchenstamm (*Fagus sylvatica* L.) gefertigt. Der Stamm wurde in vier Teile geteilt, wobei anschließend aus zwei Teilen die Vollholzproben und aus den anderen beiden Teilen Furniere durch Messern hergestellt wurden.

Die Ergebnisse dieser Versuche parallel zur Faser zeigen, dass sich die Zugfestigkeit von Furnierholz und Vollholz nicht signifikant unterscheidet. Allerdings hat Vollholz einen deutlich höheren E-Modul und eine etwas geringere Bruchdehnung als Furnierholz. Im Vergleich dazu nehmen Zugfestigkeit und E-Modul normal zur Faser teils markant ab. Auffallend ist, dass die Bruchdehnung rechtwinklig zur Faser etwas zunimmt (Abbildung 44).

Diese Veränderungen bei Furnierholz erklärt Buchelt, Pfriem (2011) durch die Beschädigung der Holzstruktur bei der Herstellung. Vor allem das Auftreten von Mikrorissen (siehe Kapitel 4-3.5) beeinflusst jene Kennwerte, welche rechtwinklig zur Faser ermittelt werden.

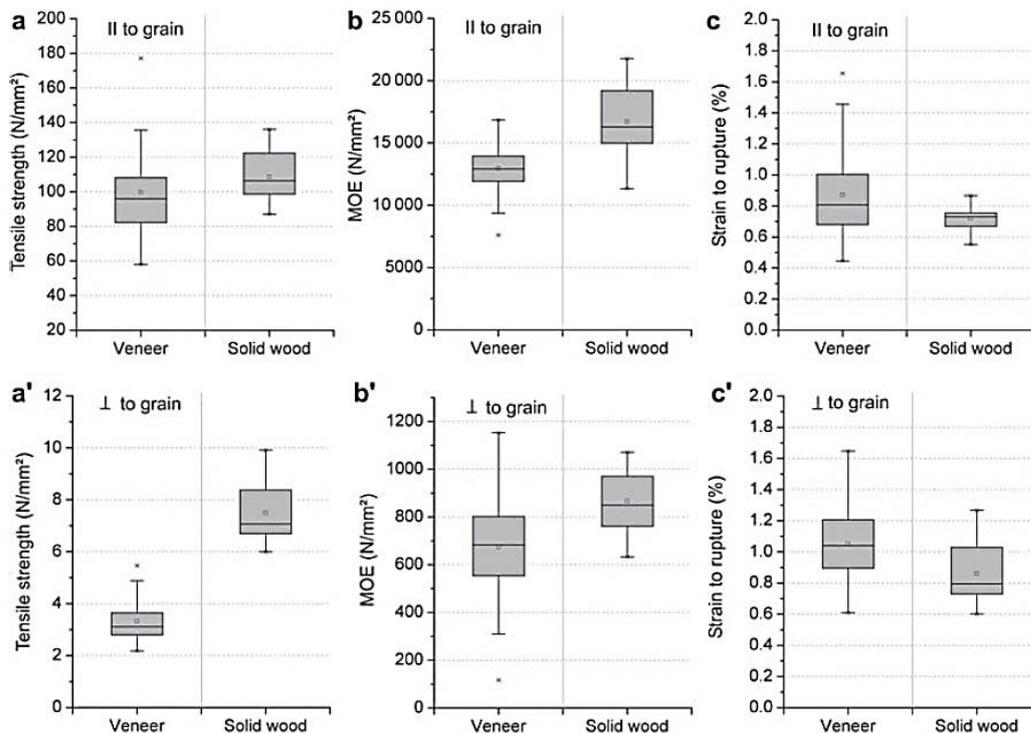


Abbildung 44: Vergleich von Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung parallel zur Faserrichtung (a, b und c) und rechtwinklig zur Faserrichtung (a', b' und c') (Buchelt, Pfriem, 2011)

4-3.3 VORBEHANDLUNG

Nazerian (2011) geht im Speziellen auf die Einflüsse von Wärmebehandlung, Holzart und dem Anteil an Frühholz in Furnierschichtholz ein. Bei dieser Untersuchung wurden Buche, Ahorn und Pappel verwendet. Die Furniere, welche aus den Stämmen geschnitten wurden, hatten die Abmessungen 360 x 150 x 9 mm wobei die Dicke in weiterer Folge durch Sandstrahlen auf 7 mm verringert wurde. Einige der Schichten wurden einer Temperaturbehandlung bei 120 °C bzw. 180 °C für 4 h unterzogen. Die fertigen Probekörper (Probengröße: L x B x T = 360 x 150 x 20 mm) bestanden aus drei Schichten und wurden mit Urea Formaldehyd (UF) verklebt. Nazerian (2011) stellte fest, dass durch eine Wärmebehandlung die chemische Zusammensetzung stark verändert wird. So verringert sich zum Beispiel der Anteil an Hemicellulose.

In Tabelle 8 ist das durchschnittliche Quell- und Wasserabsorptionsverhalten von Furnierschichtholz nach Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl Rohdichte als auch Quell- und Wasserabsorptionsverhalten mit steigender Temperatur abnehmen. Die erhöhte Rohdichte von Furnierschichtholz im Vergleich zu Vollholz lässt sich durch die Zusammendrückung während des Pressvorgangs sowie durch den Klebstoffanteil erklären. Ohne diese beiden Effekte (Zusammendrückung und Klebstoffeintrag) würde die Rohdichte abnehmen, da es wie schon erwähnt durch die Wärmebehandlung zu einem Verlust an Hemicellulose kommt.

Tabelle 8: durchschnittliches Quell- und Wasserabsorptionsverhalten von Furnierschichtholz nach Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Temperaturen; modifiziert nach Nazerian (2011)

Holztyp	Holzart	Temperatur [°C]	Dichte [g/cm ³]	RS ₂ [%]	RS ₂₄ [%]	TS [%]	LS [%]	WA ₂ [%]	WA ₂₄ [%]
juvenil	Buche	0	0,64	20,30	28,90	15,70	1,84	13,67	26,17
		120	0,63	17,70	20,70	14,70	1,60	13,67	26,50
		180	0,60	14,90	17,00	9,60	1,14	9,00	18,50
Übergangszone	Buche	0	0,65	18,00	27,80	11,70	1,15	11,33	20,67
		120	0,64	15,50	24,40	9,90	0,92	11,83	22,00
		180	0,62	11,50	19,80	7,10	0,93	9,17	18,00
adult	Buche	0	0,65	15,8	25,20	8,8	0,91	8,5	16,33
		120	0,66	13,7	22,7	7,5	0,8	7,83	14,5
		180	0,64	9,9	10,20	4,8	0,67	5,33	10,17

RS₂ bzw. RS₂₄: Dickenquellen nach 2h bzw. 24h; TS: Tangentialquellen; LS: Longitudinalquellen;
WA₂ bzw. WA₂₄: Wasserabsorption nach 2h bzw. 24h

In Tabelle 9 sind die Biegefestigkeit und der E-Modul parallel und rechtwinklig zur Klebefuge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es zu einem markanten Abfall dieser beiden mechanischen Kennwerte bei ansteigender Temperatur kommt. Grund dafür ist eine durch die Wärme verursachte zunehmende Verschlechterung des Verbundes zwischen den Mikrofibrillen. Der Anteil von juvenilen Holz bedingt ebenfalls einen Abfall der mechanischen Kennwerte. Ursache dafür ist der große Mikrofibrillenwinkel im juvenilen Holz. Zusammenfassend fand Nazerian (2011) heraus, dass Wärmebehandlung und der Anteil an juvenilem Holz (Holz im Zentrum des Stammes) diese mechanischen Kennwerte verschlechtert.

Tabelle 9: durchschnittliche Biegefestigkeit und E-Modul von Furnierschichtholz; modifiziert nach Nazerian (2011)

Holztyp	Holzart	Temperatur [°C]	MOR _v [MPa]	MOR _p [MPa]	MOE _v [MPa]	MOE _p [MPa]
juvenil	Buche	0	45,5	36,7	6604	7206
		120	39,7	32,0	6186	5729
		180	24,8	19,8	5668	4952
Übergangszone	Buche	0	73,2	67,7	11340	10937
		120	51,0	44,6	11063	10735
		180	30,8	25,9	9651	7313
adult	Buche	0	86,0	82,3	12891	12976
		120	62,1	61,3	12541	12276
		180	39,3	34,1	7723	7069

MOR: Biegefestigkeit; MOE: E-Modul; v: vertikal zur Verklebung;
p: parallel zu Verklebung

Çolak et al. (2007) untersuchte den Effekt von Dämpfen und Trocknungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Furnierschichtholz im Vergleich zu Vollholz. Die Probenahme erfolgte an gedämpfter Buche (*Fagus orientalis* L.) sowie an gedämpfter und ungedämpfter Fichte (*Picea abies*). Der Dämpfvorgang an Buche und Fichte erfolgte jeweils bei 60 °C für 20 h bzw. 12 h. Die Stämme wurden jeweils halbiert um aus einer Hälfte Furniere zu schälen und aus der zweiten Hälfte Vollholzproben herzustellen. Die Trocknung der Buchenfurniere erfolgt bei 110 °C für 5 Minuten und senkte den Feuchtegehalt von 40-50 % auf 5-7 %. Bei der zweiten Testreihe erfolgte die Trocknung über zwei Wochen bei 20 °C. Das Furnierschichtholz hatte eine Gesamtdicke von 16 mm und bestand aus 9 Schichten. Die Verpressung der mit UF - Klebstoff benetzten Furniere erfolgte bei 140 °C. Buchenfurniere wurden mit einem Pressdruck von 1,4 N/mm², Fichtenfurniere mit 0,8 N/mm² verpresst. Es wurden Biegeversuche parallel zur Faser (Probengröße: L x B x T = 300 x 20 x 16 mm) sowie Druckversuche (Probengröße: 20 x 30 x 16 mm) durchgeführt. (Çolak et al., 2007)

In Abbildung 45 sind die Druck- und Biegefestigkeit (nach DIN 52185 bzw. DIN 52186) parallel zur Faser von Buchenvollholz und Furnierschichtholz dargestellt. Zusätzlich wurde die Dauerhaftigkeit (Alterung) nach (ÖNORM EN 321, 2002) untersucht. Diese ist in Abbildung 45 als „Test“ bezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Festigkeiten von Furnierschichtholz im Gegensatz zu Vollholz zunehmen. Die Alterung (Spalte „Test“) hat auf Furnierschichtholz einen größeren Einfluss als auf Vollholz. (Çolak et al., 2007)

	Compression strength (N/mm ²)		Bending strength (N/mm ²)	
	Control	Test	Control	Test
Beech–solid wood	47.4 (1.5) ^a	47.1 (2.3)	98.2 (5.8)	97.8 (5.1)
Beech–LVL	52.4 (1.6)	51.8 (1.8)	107.8 (6.1)	104.4 (4.8)

^aValues in parenthesis are standard deviations.

Abbildung 45: Mittelwerte mechanischer Kennwerte von Buchenvollholz und Furnierschichtholz vor (Spalte „Control“) und nach dem Alterungsprozess (Spalte „Test“); Werte in Klammern zeigen die Standardabweichung (n=30) (Çolak et al., 2007)

In Abbildung 46 sind die Mittelwerte der Biegefestigkeiten an der Fichte dargestellt (schwarze Säulen: nach Alterungsprozess). Wobei SW-1 und SW-2 das ungedämpfte bzw. gedämpfte Vollholz darstellen und LVL-1 und LVL-2 das ungedämpfte bzw. gedämpfte Furnierschichtholz. LVL-3 ist ebenfalls gedämpft und wurde nach dem Schälen im Furniertrocknungssofen getrocknet. Man kann erkennen, dass Dämpfen einen beachtlichen Einfluss auf die Biegefestigkeit hat. Die Biegefestigkeit von Vollholz verringerte sich durch das Dämpfen um 21 %. Analog zur Buche (Abbildung 45) steigen die Biegefestigkeiten am Furnierschichtholz im Vergleich zu Vollholz an. Die Abnahme der Festigkeiten am gedämpften Furnierschichtholz im Vergleich zum ungedämpften liegt bei ~ 5 %. Eine Festigkeitsminderung durch den Alterungsprozess ist sehr gering. Die annähernd gleichen Werte von LVL-2 und LVL-3 zeigen, dass der Einfluss des Trocknungsprozesses sehr gering ist. (Çolak et al., 2007)

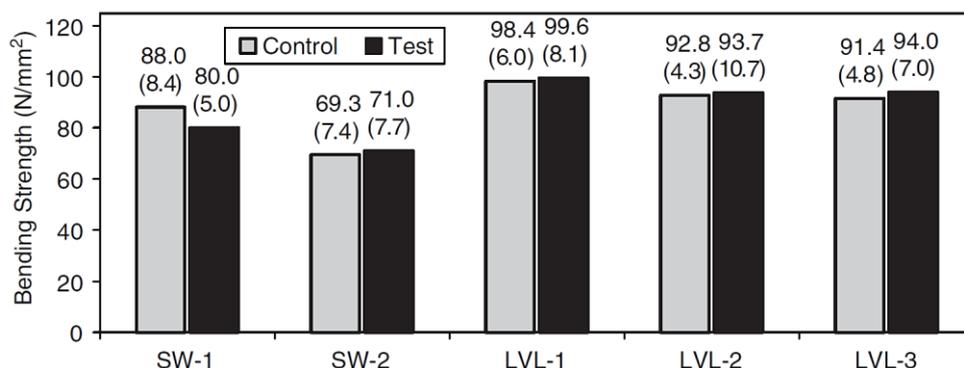


Abbildung 46: Mittelwerte der Biegefestigkeit von Fichten - Vollholz und Furnierschichtholz; Werte in Klammern zeigen die Standardabweichung (n=30) (Çolak et al., 2007)

Peker et al. (2015) untersuchte den Einfluss von Dämpfzeit, Trocknungstemperatur und Klebstoff auf die Biegefestigkeit von Fichte und Tanne. Die Baumstämme wurden bei 100 °C für unterschiedliche Dauer gedämpft und anschließend wurden 1,5 mm Furniere geschält. Als Klebstoff wurde Phenol Formaldehyd (PF) und Melamine-urea Formaldehyd (MUF) verwendet. Es wurden Furnierschichthölzer (Probengröße: L x B x T = 300 x 20 x 14 mm) mit neun Schichten hergestellt. Die Studie von Peker et al.(2015) bestätigt die oben beschriebenen Ergebnisse. Die mechanischen Kennwerte von Furnierschichtholz sind höher als jene von Vollholz. Allerdings stellte Peker et al. (2015) einen Abfall der Werte mit zunehmender Dämpfdauer fest (Abbildung 46). Weiters war zu erkennen, dass Furnierschichtholz mit einer PF Verklebung höhere Werte bezüglich der Biegefestigkeit liefert. (Peker et al., 2015)

4-3.4 HERSTELLUNGSART

Die Art der Herstellung beeinflusst die Struktur des Holzes auf unterschiedliche Weise und hat somit einen großen Effekt auf die späteren mechanischen Eigenschaften der Furniere. Untersuchungen von Buchelt, Pfriem (2011) sollten einen Vergleich von längs- und quergemesserten Furnieren der Holzart Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) anstellen. Der Stamm wurde in vier Teile geteilt. Zwei davon lagerten vor dem Messern für eine Woche in 80 °C warmen Wasser und wurden dann quergemessert und für 2 h bei 75-90 °C getrocknet. Aus den beiden anderen Teilen wurden nach einem Wasserbad von zwei Wochen bei 70 °C längsgemesserte Furniere hergestellt, welche anschließend für 2-3 Minuten bei 140 °C getrocknet wurden. Die Versuche erfolgten jeweils an ca. 80 Proben (Probengröße: L x B x T = 120 x 10 x 0,5 mm) je Herstellungsart und Richtung. Es erfolgten Zugprüfungen parallel und rechtwinklig zur Faser.

Die Ergebnisse der Prüfungen parallel zur Faserrichtung zeigen eine um 16% höhere Zugfestigkeit und einen signifikant höheren E-Modul bei längsgemesserten gegenüber quergemesserten Furnieren. Die Bruchdehnung ändert sich nur in geringem Maße. Auch der E-Modul ist bei längsgemesserten Furnieren etwas höher (Abbildung 47).

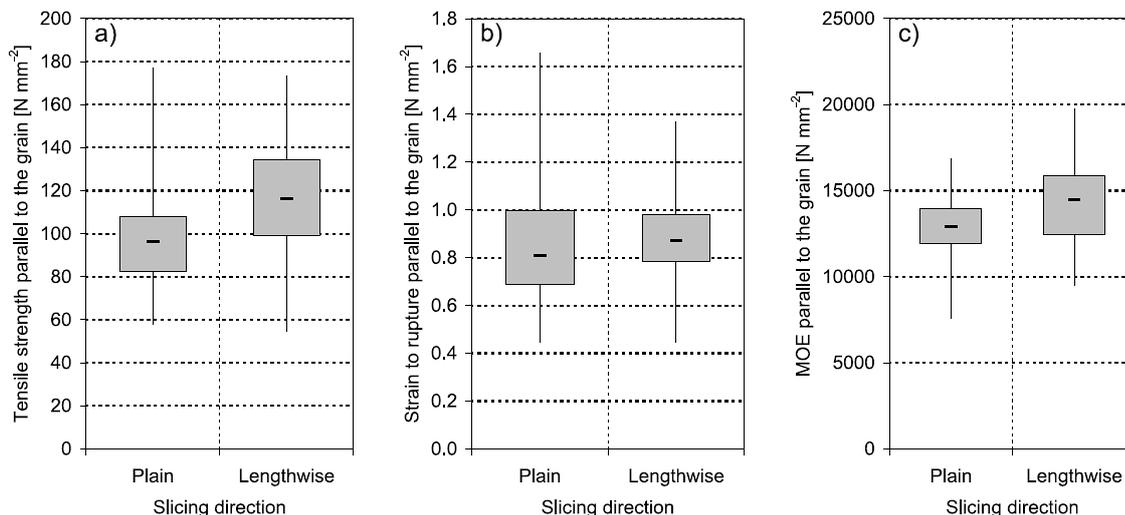


Abbildung 47: Vergleich von (a) Zugfestigkeit, (b) Bruchdehnung und (c) E-Modul von längs- und quergemesserten Furnieren parallel zur Faserrichtung (Pfriem, Buchelt, 2011)

Die Prüfungen rechtwinklig zur Faserrichtung zeigen ebenfalls einen Anstieg der Zugfestigkeit sowie der Bruchdehnung um über 20% von längsgemesserten im Vergleich zu quergemesserten Furnieren. Im Unterschied zu den Prüfungen parallel zur Faserrichtung nimmt der E-Modul von längsgemesserten Furnieren allerdings ab (Abbildung 48).

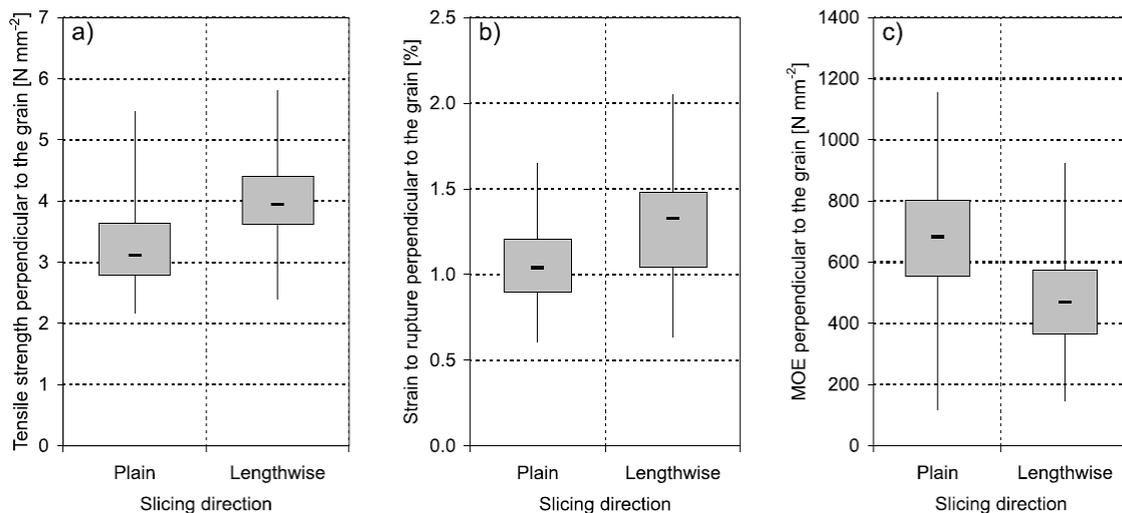


Abbildung 48: Vergleich von (a) Zugfestigkeit, (b) Bruchdehnung und (c) E-Modul von längs- und quergemesserten Furnieren senkrecht zur Faserrichtung (Pfriem, Buchelt, 2011)

Diese Studie zeigte, dass längsgemesserte Furniere im Allgemeinen eine höhere Festigkeit und bessere mechanische Eigenschaften haben als quergemesserte Furniere. Die bei der Herstellung entstehenden Mikrorisse, sind dafür verantwortlich. Der Abfall des E-Moduls in Querrichtung kann dadurch allerdings nicht erklärt werden. (Buchelt, Pfriem, 2011)

4-3.5 MIKRORISSE

Mikrorisse entstehen bei der Herstellung der Furniere und sind Risse in Furnier – Dickenrichtung (mikroskopische Aufnahme; Abbildung 49).



Abbildung 49: Seitenansicht von gerissenen Furnieren unter dem Mikroskop (Palubicki et al., 2010)

Bei der Beschreibung von Mikrorissen unterscheidet man die Tiefe der Risse sowie die Frequenz mit welcher sie auftreten.

Tiefe und Frequenz sind nach einer Studie von Thibaut, Beauchene (2004) abhängig von:

- Furnierdicke,
- Rohdichte,
- Prozesstemperatur und
- Energieaufwand beim Schälen.

Darmawan et al.(2015) erweiterte dies durch folgende Einflussparameter:

- Druckbalken (Roller nosebar, Abbildung 50),
- Vorbehandlung (Kochen und Dämpfen) und
- Messerwinkel.

Abbildung 50 zeigt das Auftreten von Mikrorissen im Herstellungsprozess.

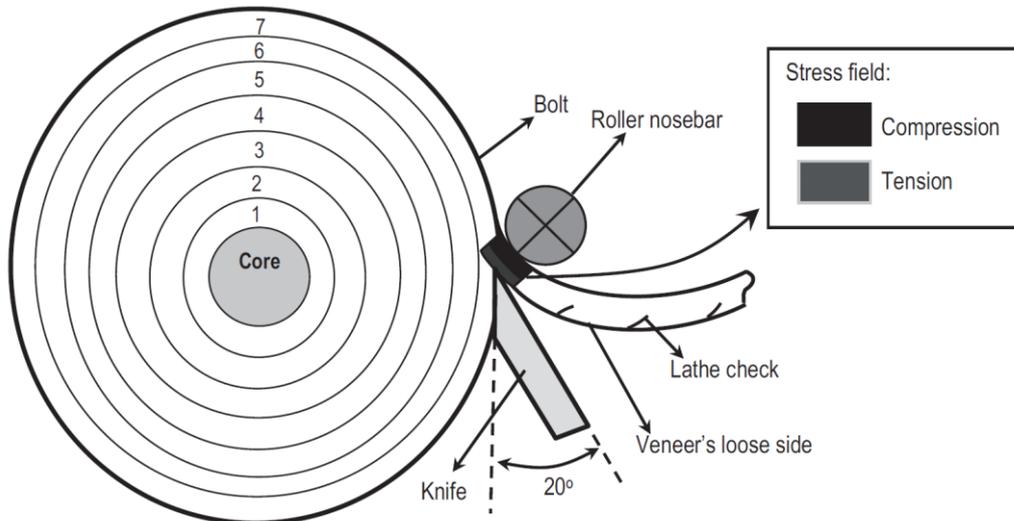


Abbildung 50: Schälvorgang (Darmawan et al., 2015)

Mikrorisse haben einen großen Einfluss auf Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Furniers. Außerdem erhöht sich der Klebstoffbedarf bei Furnierschichtholz mit der Häufigkeit von Mikrorissen. (Daoui et al., 2011)

Palubicki et al. (2010) und Denaud et al. (2007) untersuchten den Zusammenhang zwischen Furnierdicke und dem Auftreten von Mikrorissen. Je dicker die Furniere desto tiefer sind die Risse und umso geringer ist die Frequenz mit der sie auftreten. Diese Erkenntnis wird in Daoui et al. (2011) bestätigt. Palubicki et al. (2010) untersuchte in seiner Studie das Auftreten von Mikrorissen an unterschiedlichen Furnierdicken mit Hilfe digitaler Bildanalyse. In Abbildung 51 sind die Tiefen und Frequenzen von Mikrorissen bei unterschiedlicher Dicke der Furniere dargestellt (1,5 – 3,0 mm; 0,5 mm Schritte).

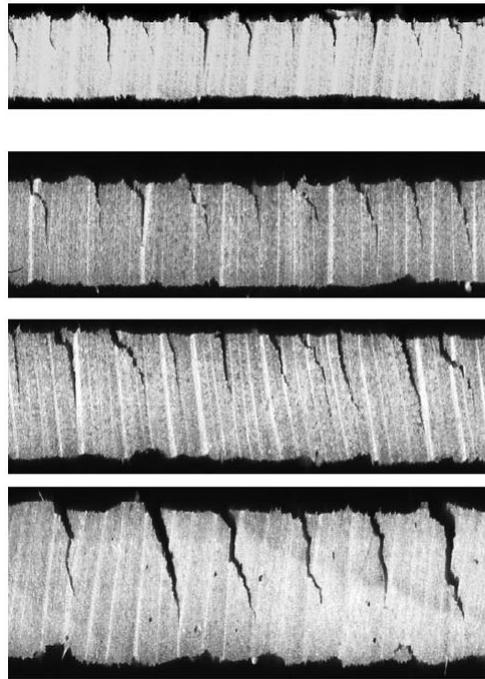


Abbildung 51: Mikrorisse bei unterschiedlichen Furnierdicken, von oben beginnend (1,5 mm; 2,0 mm, 2,5 mm; 3,0 mm)

Pot et al. (2014) untersuchte den Einfluss von Mikrorissen auf die mechanischen Eigenschaften von Furnierschichtholz mit Hilfe eines Finite Elemente Modells (FEM). Die Studie wurde an Buchenholz durchgeführt, da dieses durch zerstreutporigen Aufbau sehr gut für die Herstellung von Furnierschichtholz geeignet ist und somit vermehrt Verwendung in der Furnierschichtproduktion findet. Die Untersuchung der Tiefe und Frequenz von Mikrorissen wurde an Furnieren mit vier unterschiedlichen durch den Druckbalken erzeugten Kompressionsraten (Verhältnis der Kompressionshöhe zu Ausgangsdicke) von 0 %, 5 %, 10 % und 15 % durchgeführt. Die geprüften Furniere waren 3 mm dick. Die Untersuchung wurde mit Hilfe des SMOF-Apparates (Palubicki et al., 2010) durchgeführt (Prinzip des SMOF-Apparates: Das Furnier wird über eine Rolle mit einem spezifischen Durchmesser gebogen um die Risse zu öffnen und anschließend die Frequenz und Tiefe der Risse durch Fotogrammetrie bestimmt). Man konnte erkennen, dass der Einfluss auf den E-Modul in Längsrichtung nur sehr gering ist. Die Scherfestigkeit aus der Hochkantbiegeprüfung ist sehr stark beeinflusst, sofern die Risse nicht mit Klebstoff aufgefüllt sind. (Pot et al., 2014)

Darmawan et al. (2015) untersuchte den Einfluss der Kochdauer auf das Auftreten von Mikrorissen bei unterschiedlichen Furnierdicken und Schichtanzahl. Die Versuche wurden an Furnierschichtholz aus geschälter Albizia (*Paraserianthes moluccana*) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Mikrorisse sowohl die Festigkeit der Klebefuge als auch die Festigkeit und Steifigkeit des Furnierschichtholzes beeinflussen (Abbildung 52). Im Gegensatz zu Pot et al. (2014) stellten Darmawan et al. (2015) neben der Abnahme der Biegefestigkeit auch eine Abnahme von E-Modul bei erhöhter Frequenz von Mikrorissen fest.

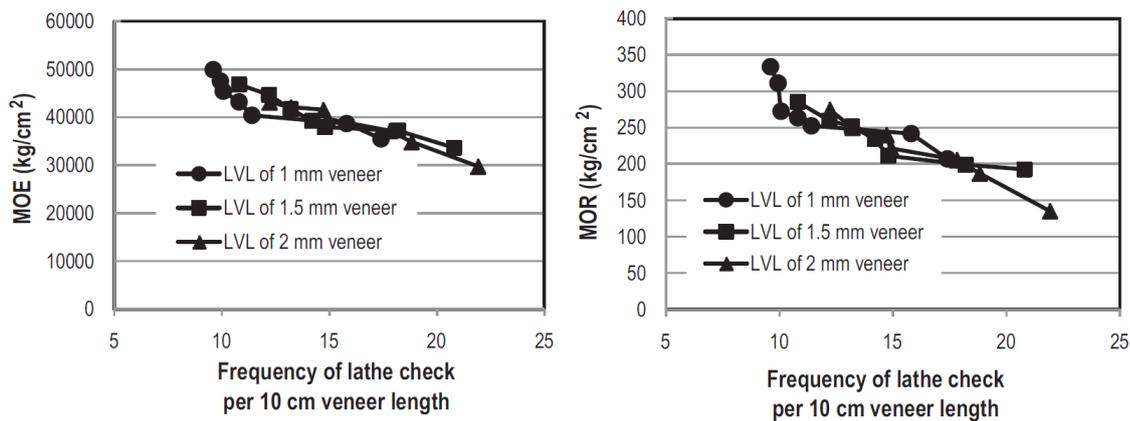


Abbildung 52: Zusammenhang von E-Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit von Furnierdicke und Frequenz von Mikrorissen (Darmawan et al., 2015)

Nach Daoui et al. (2011) können Mikrorisse durch hydrothermische Vorbehandlung in Kombination mit einer optimierten Druckbalkeneinstellung reduziert werden. Dies gestaltet sich jedoch schwieriger, je dicker die Furniere werden.

4-3.6 VORPRESSUNG

Gaff, Gasparik (2015) untersuchten den Einfluss von Verdichtung und zyklischer Belastung auf die Biegefestigkeit von Furnierschichtholz aus Buche (*Fagus sylvatica* L.). Die bei 95 °C gedämpften Baumstämme wurden geschält und zugeschnitten (Probengröße: L x B x T = 700 x 60 x 1,7 mm). Ein Teil der Furniere wurde wie in Abbildung 53 dargestellt mit 30 MPa auf eine Dicke von 1,5 mm verdichtet.

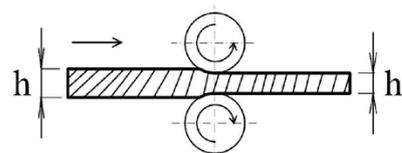


Abbildung 53: verdichten der Einzelfurniere (Gaff, Gasparik, 2015)

Anschließend wurden Prüfkörper mit unterschiedlicher Anordnung (Abbildung 54) der verdichteten Furniere hergestellt und ihre Biegefestigkeit ermittelt. Die Untersuchung zeigte, dass der Einfluss der Vorpressung der Einzelfurniere durchaus markant ist (Abbildung 54), wobei es beim Einlegen von nur einer verdichteten Zwischenlage zu einem geringen Abfall der Biegefestigkeit kommt. Typ D, welcher zur Gänze aus verdichteten Einzelfurnieren besteht, wies allerdings eine Erhöhung um über 20% auf und hat annähernd die gleichen Eigenschaften wie Typ E, welcher aus unverdichteten Furnieren mit PVC Zwischenlagen besteht. (Gaff, Gasparik, 2015)

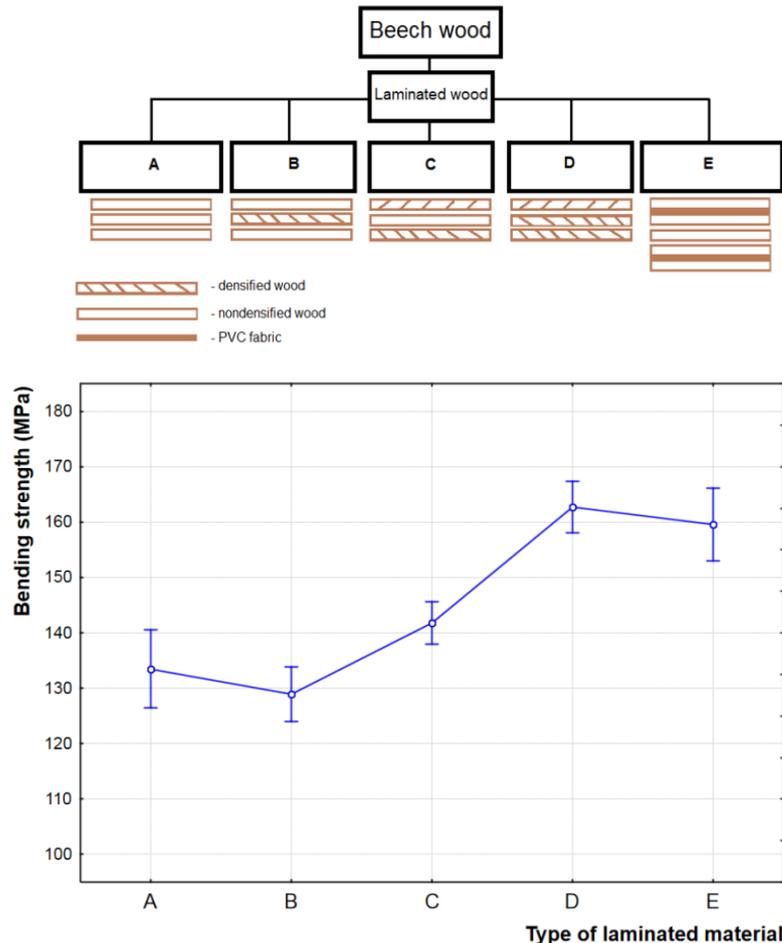


Abbildung 54: oben: Probekörperbezeichnung; unten: Mittelwerte der Biegefestigkeiten der unterschiedlichen Prüfkörper (Gaff, Gasparik, 2015)

Eine ähnliche Studie an Furnierschichtholz aus japanischer Weißbirke (*Betula platyphylla*) wurde von Xue, Hu (2013) durchgeführt. Auch hier wurde ein Anstieg von E-Modul und Biegesteifigkeit an verdichtetem Furnierschichtholz festgestellt.

4-3.7 GRÖSSENEFFEKT

Ähnlich zu Vollholz erkennt man auch bei Furnieren einen Zusammenhang zwischen Prüfkörpervolumen und Festigkeit. Vergleicht man die Festigkeiten von Vollholz mit unterschiedlichen Abmessungen bzw. Volumina derselben Holzart, so lässt sich erkennen, dass es mit zunehmenden Volumen zu einem Abfall der Festigkeiten kommt. Der Grund dafür ist das Auftreten von statistisch verteilten Diskontinuitäten und Rissen in verschiedenen Strukturebenen des Holzes. Diese haben abhängig von der Größe des Probekörpers unterschiedliche Auswirkungen auf den zum Bruch führenden Mechanismus. Daher wird dieser Effekt auch als „Größeneffekt“ bezeichnet (Abbildung 55). (Schickhofer, 2006)

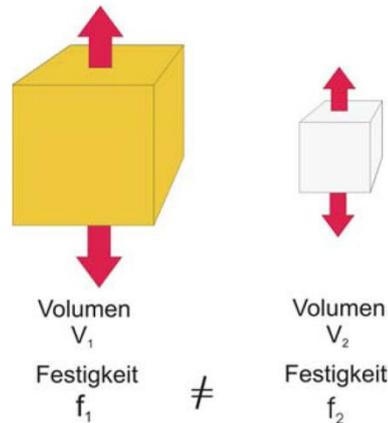


Abbildung 55: Darstellung des Größeneffekts (Schickhofer, 2006)

Fonselius (1997) untersuchte den Größeneffekt am Furnierschichtholz aus Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus silvestries*), welche direkt aus dem Produktionsprozess von Kerto (Mätsa Group, Finnland) stammten. Es wurden 4-Punkt-Biegeprüfungen nach ÖNORM EN 408, 2012) durchgeführt, wobei Länge, Breite und Dicke variiert wurden. Die Untersuchungen ergaben, dass die Dicke keinen Effekt auf Biege-, Zug und Druckfestigkeit hat. Durch die geringe Dicke ist die Menge an festigkeitsmindernden Merkmalen in Dickenrichtung konstant, vorausgesetzt eine ausreichende Anzahl an Furnierschichten ist vorhanden. Ist dies nicht der Fall, ist der Effekt, wie in Kapitel 4-3.10, beschrieben durchaus spürbar. Bei Breite und Länge ist der Größeneffekt vorhanden. Erklärbar ist dies durch die höhere Anzahl an Schwachstellen, welche bei größeren Prüfkörpern auftreten. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass der Größeneffekt auf den E-Modul und den Schubmodul keinen Einfluss hat. (Fonselius, 1997)

4-3.8 FURNIERDICKE

Um kleinere Biegeradien erreichen zu können, ist man stets bemüht dünnere Furniere zu verwenden. Allerdings wird es dadurch immer schwieriger, Kennwerte am Einzelfurnier zu bestimmen. So beschreibt Srinivasan et al. (2007), dass die Bestimmung der Biegefestigkeit von dünnen Furnieren nur mehr eine Abschätzung ist. Der Einfluss der Furnierdicke auf die mechanischen Eigenschaften wird zum Großteil durch den Einfluss der Herstellung (Einzelfurnier) bedingt. Dieser ist allerdings gering, da wie in Fonselius (1997) beschrieben, durch die kleinen Abmessungen keine zusätzlichen festigkeitsmindernden Merkmale hinzukommen.

Buchelt, Wagenführ (2008) führten Zug- und Biegeprüfungen an gemesserten Einzelfurnieren aus Buchen- und Eichenholz mit den Dicken $T = 0,35 \text{ mm}$ und $T = 0,5 \text{ mm}$ durch. In weiterer Folge wird nur auf die Ergebnisse der Buche eingegangen. Die Biegeversuche wurden als 3-Punkt-Biegeversuch durchgeführt, wobei der Abstand zwischen den Unterstellungen $9,5 \text{ mm}$ betrug (Probengröße: $L \times B \times T = 5 \times 14 \times T \text{ mm}$). Die Zugversuche wurden an einer Standard-Zugprüfmaschine durchgeführt (Probengröße: $120 \times 14 \times T \text{ mm}$). Aufgrund der geringen Steifigkeit und der großen daraus resultierenden Verformungen mussten die Prüfkörper für die Tests rechtwinklig zur Faser etwas verändert werden (Probengröße: $60 \times 6 \times T \text{ mm}$). Es wurden zumindest zehn Prüfungen je Test durchgeführt. Die Messung der Dehnungen erfolgte mit Hilfe eines Videoextensometers.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 56 dargestellt. Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss von Furnierdicke auf die mechanischen Festigkeiten gegeben ist, allerdings nicht markant ausfällt. So beträgt der Abfall von $0,36 \text{ mm}$ zu $0,48 \text{ mm}$ dicken Furnieren $\sim 14 \%$. Auffallend ist der Unterschied der ermittelten Werte zwischen Biegeprüfung und Zugversuchen. Damit bestätigt diese

Studie die Aussagen von Srinivasan et al. (2007), dass die Ermittlung des E-Moduls anhand von Biegeversuchen an Einzelfurnieren nicht optimal ist.

Buchelt, Wagenführ (2008) stellten weiters fest, dass der Einfluss der Furnierdicke bei Holzarten mit einer ringporigen Struktur (z.B.: Fichte) einen größeren Abfall der mechanischen Kennwerte mit sich bringt als bei zerstreutporigen (z.B.: Birke, Buche). Grund dafür ist die teils geringe Anzahl von Gefäßen und Strahlen (2-3) bei Furnieren kleiner 0,5 mm.

		Load parallel to the fibre Veneer thickness (mm) Tensile test/Bending test 0.36/0.36 0.48/0.49		Load perpendicular to the fibre Veneer thickness (mm) Tensile test/Bending test 0.41/0.36 0.52/0.47	
MOE (Nmm⁻²)					
Tensile test	Mean value	14 000	12 000	650	630
	Std.dev.	1000	600	20	20
Bending test	Mean value	8000	7000	750	830
	Std.dev.	2000	600	100	180
Strength (Nmm⁻²)					
Tensile test	Mean value	86.8	71.0	7.3	7.9
	Std. dev.	16.2	9.4	0.7	1.0
Bending test	Mean value	130.2	135.8	19.6	19.0
	Std.dev.	17.8	15.9	3.0	4.7
Deflection (mm)	Mean value	1.1	0.9	1.4	1.1
	Std.dev.	0.2	0.1	0.1	0.1

Std.dev. = standard deviation

Abbildung 56: Ergebnisse aus Zug- und Biegeversuch an Buchenfurnieren (Buchelt, Wagenführ, 2008)

4-3.9 FASERRICHTUNG

Buchelt, Wagenführ (2008) untersuchten neben dem Einfluss von Dicke auch die Auswirkung der Faserrichtung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung an Buchenholz. Ähnlich zu Vollholz, zeigen die Ergebnisse der Biegeprüfungen parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Faserrichtung hat somit einen großen Einfluss auf die mechanischen Festigkeiten. Die durchgeführten Zugprüfungen ergaben einen ähnlichen Trend. Auch in diesem Fall sind die Festigkeits- und Steifigkeitswerte in Querrichtung nur etwa 5 % - 10 % zu jenen parallel zur Faser. (Buchelt, Wagenführ, 2008)

Kraemer (1929) untersuchte den Einfluss der Faserrichtung auf die Zugfestigkeit von Birkenfurnieren. Die Prüfungen (Probengröße: L x B x T = 230 x 15 x 0,5 mm) wurden an Einzelfurnieren durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 57 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bereits eine Abweichung von 5 ° zur Faserrichtung die Zugfestigkeit halbiert. (Kraemer, 1929)

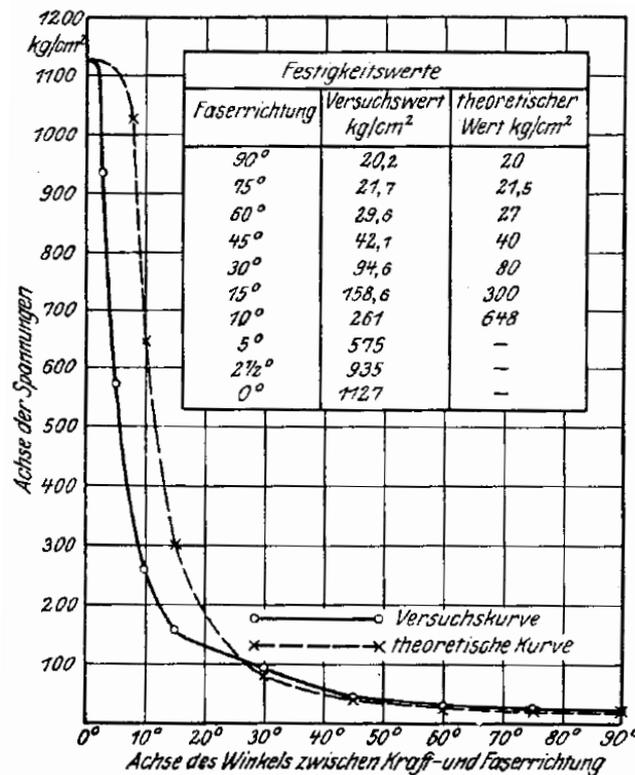


Abbildung 57: Zugfestigkeit der Birke in Abhängigkeit der Faserrichtung (Kraemer, 1929)

4-3.10 SCHICHTSTÄRKEN UND SCHICHTANZAHL

Im Sinne einer ökologischen und klebstoffreduzierten Produktion sind dickere Furniere von Vorteil (Melo, Del Menezzi, 2014). Wie bereits in den vorigen Kapiteln beschrieben, muss man dabei jedoch auch mit einigen Nachteilen vorlieb nehmen. (Daoui et al., 2011)

Daoui et al. (2011) beschäftigten sich mit dem Einfluss der Furnierdicke auf Furnierschichtholz bei Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.). Sämtliche Furniere wurden von einem Stamm geschält. Variiert wurden drei Dicken (1,0 mm; 3,0 mm; 5,0 mm) sowie zwei Temperaturniveaus (20°C; 70°C). Geschält wurde jeweils mit und ohne Druckbalken. Die Proben (Probengröße: L x B x T = 500 x 20 x 20 mm) wurden mit Melamin-urea-formaldehyd (MUF) bei 0,8 MPa verpresst. Durchgeführt wurden ein 4-Punkt- und ein 5-Punkt-Biegeversuch. In Abbildung 58 dargestellt ist der E-Modul (gelbe Dreiecke) und die Biegefestigkeit (schwarze Rechtecke). Die weiters vorhandenen Linien zeigen eine zerstörungsfreie E-Modul-Messung. Die Studie von Daoui et al. (2011) zeigt einen tendenziellen Abfall der mechanischen Kennwerte bei Zunahme der Furnierdicke. Dieser Effekt wird auch in Untersuchungen von Kunesh (1978) und Youngquist et al. (1984) bestätigt. Der Grund dafür dürfte die bessere Verklebung der Haarrisse bei dünneren Furnieren durch den größeren Leimanteil sowie geringere Beschädigungen im Herstellungsprozess sein. Man beachte, dass teilweise auch eine Zunahme der mechanischen Kennwerte beobachtet wurde, was wahrscheinlich mit der Herstellung der Proben zusammenhängen dürfte. (Daoui et al., 2011)

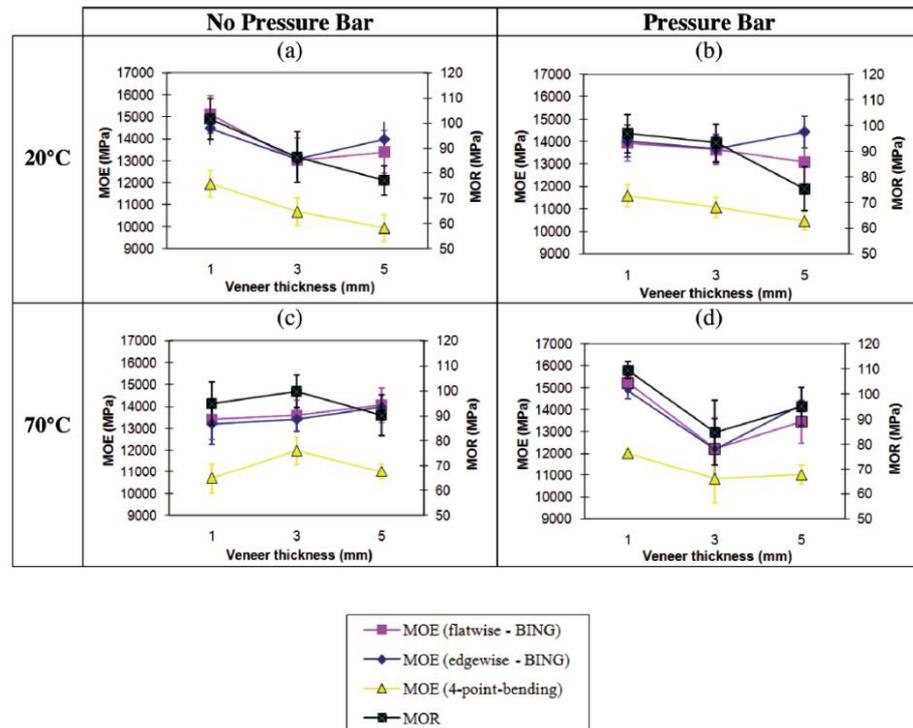


Abbildung 58: E-Modul und Biegesteifigkeit von Furnierschichtholz mit unterschiedlicher Dicke, Kochtemperatur und Pressdruck des Druckbalkens (Daoui et al., 2011)

Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Furnierdicke führten Melo, Del Menezzi (2014) durch. Die Prüfungen erfolgten am Plantagenbaum *Schizolobium amazonicum* und ergaben ebenfalls einen Trend zur Festigkeitsabnahme bei Furnierschichtholz mit dickeren Einzelfurnieren, wobei Melo, Del Menezzi (2014) der Meinung sind, das aufgrund des geringeren Klebstoffbedarfs dickere Furniere trotz der Abnahme der mechanischen Kennwerte effizienter und wirtschaftlicher einsetzbar sind.

4-3.11 KLEBSTOFF UND OBERFLÄCHENRAUHEIT

Bal, Bektas (2012) untersuchten Furnierschichthölzer hergestellt aus Buche (*Fagus orientalis* L.), Pappel (*Populus x euramericana* I-214) und Eukalyptus (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex maiden). Als Klebstoff wurde UF, MUF und PF verwendet. Es wurden sowohl Flachkant- als auch Hochkantprüfungen durchgeführt. Die Furniere wurden aus fünf Buchenstämmen durch Schälern hergestellt. Davor wurden die Stämme bei 80 °C für 50 Stunden gedämpft. Nach dem Schälern wurden die 3 mm dicken Furniere auf 7±1 % Holzfeuchtigkeit getrocknet. Die Einzelfurniere wurden mit ca. 200 g/m² Leim beaufschlagt und zu 7-schichtigen Platten verpresst, aus welchen in weiterer Folge die Probekörper (Probengröße: L x B x T = 300 x 20 x 20 mm) geschnitten wurden.

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte erfolgte anhand von 3-Punkt-Biegeprüfungen. Die besten Biegeeigenschaften wurden bei Buchen-Furnierschichtholz, verklebt mit PF, gemessen (Tabelle 10), wobei die Unterschiede, die sich durch die verschiedenen Klebstoffe ergeben, nicht signifikant sind. Nach Bal, Bektas(2012) können diese durch die Dichteschwankungen im Ausgangsmaterial bedingt sein. Die Steifigkeitswerte bei den Flachkant-Biegeprüfungen waren höher als jene bei den Hochkantprüfungen. (Bal, Bektas, 2012)

Auch in einer Studie von Peker et al. (2015) (Prüfkonfiguration siehe Kapitel 4-3.3) ergab die Verklebung von Furnierschichtholz mit PF-Klebstoff höhere Werte im Vergleich zu jenem mit MUF-Klebstoff.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Mittelwerte von E-Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit des Klebstoffsystems (Bal, Bektas, 2012)

		UF		UF		UF	
		MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE
		[N/mm ²]					
Buche	hochkant x	85,14	7877	89,22	8194	93,03	8302
	s	7,39	693	4,17	352	6,17	478
	flachkant x	95,41	8773	89,43	7948	100,80	9087
	s	8,33	701	2,16	420	10,14	587

MOE...E-Modul; MOR...Biegefestigkeit; x...Mittelwert; s...Standardabweichung

Die Rauheit der Oberfläche hat nicht unbedingt Auswirkungen auf mechanische Kennwerte, allerdings großen Einfluss auf den Klebstoffbedarf und die Festigkeit der Klebefuge. Daoui et al. (2011) beobachtet folgendes Verhalten:

Die Rauheit der Oberfläche nimmt zu mit

- der Furnierdicke,
- bei der Verwendung eines Druckbalkens,
- wenn keine hygrothermische Behandlung stattfand und
- an der mit Mikrorissen durchzogenen Seite.

Die Rauheit kann des Weiteren durch folgende Faktoren beeinflusst werden: die Jahrringbreite, Anteil von Früh und Spätholz, Holzstrahlen, Äste, Reaktionsholz, spezifische Zellstruktur und Furnierdicke. Zusätzlich spielen auch die Vorbehandlung und die Herstellungsparameter eine große Rolle. (Dundar et al., 2008)

Dundar et al. (2008) untersuchte in seiner Studie unter anderem den Einfluss von Oberflächenrauheit von gemessertem Makore-Furnier und geschältem Buchenfurnier (*Fagus orientalis* L.). Folgend wird ausschließlich auf die Untersuchungen an der Buche eingegangen. Vor der Herstellung wurde der Stamm bei 80°C für 36 Stunden gedämpft. Alle Proben wurden von einem Buchenstamm geschält und anschließend zugeschnitten (Probengröße: L x B x T = 150 x 150 mm). Insgesamt wurde die Oberflächenrauheit an 30 Proben mit Hilfe eines mechanischen Profilometers gemessen.

Die Oberflächenrauheit spielt vor allem im Klebprozess eine große Rolle. Je glatter die Oberfläche, desto geringer der Klebstoffbedarf und desto höher die Festigkeit der Klebefuge. Durch den Einfluss auf den Klebstoffbedarf, gibt es auch einen Zusammenhang zwischen Rauheit und Herstellungskosten sofern die Furniere weiterverarbeitet werden.

Eine weitere Studie von Einflüssen auf die Zugfestigkeit normal zur Faserrichtung und die Scherfestigkeit an Furnierschichtholz aus geschälter Birke wurde von Bekhta et al. (2012) durchgeführt. Seine Untersuchungen ergaben, dass durch Vorpressen der Einzelfurniere die Oberflächenrauheit verbessert wird. Dadurch kann der Leimbedarf um bis zu 40 % gesenkt werden. Weiters kann auch der Pressdruck um bis zu 45 % reduziert werden.

KAPITEL 5: FÜGEN VON FURNIEREN

Diese Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten, Einzelfurniere zu verlängern, geben und umfasst eine geschichtliche Betrachtung sowie die unterschiedlichen Arten des Fügen.

5-1 GESCHICHTLICHE BETRACHTUNG

Erste Verbesserungen in der Verbindungstechnik von Furnieren gab es um 1880, als man mit Hilfe von Klebestreifen die Kanten aneinander heftete. Diese Streifen waren aus zähem, geschmeidigem und dünnem Kraftpapier hergestellt. Da diese Streifen beim Verleimen störten, war dieses Verfahren eher unzufriedenstellend. Ab den 30iger Jahren des 20. Jahrhunderts entstanden schließlich die ersten Maschinen. Man unterschied zwischen Maschinen zur Längsverleimung (Fugen parallel zur Vorschubrichtung) und Maschinen zur Querverleimung (Fugen senkrecht zur Vorschubrichtung).

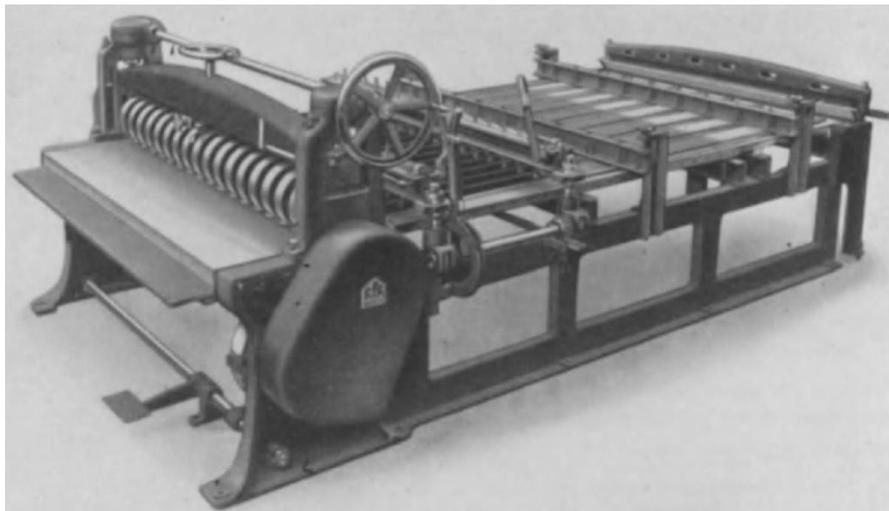


Abbildung 59: Furnierfügemaschine aus den 30iger Jahren (Klotz, 1940)

Vorreiter (1963) beschreibt folgende Möglichkeiten Furniere zu verbinden (Abbildung 60):

- Stumpfer Stoß: Eine sehr einfache Ausführung, welche allerdings sehr geringe Leimfugenfestigkeit mit sich bringt.
- Überlappung: Überlappungslänge ist meist das 4-5 fache der Furnierdicke. Die hierbei entstehende Überhöhung kann entweder durch nachträgliches Abschleifen (A) oder durch hohe Pressdrücke verhindert werden (B).
- Schäftung: Ist eine sehr hochwertige aber aufwändige Ausführungsweise. Der Schäftungslänge sollte in etwa $b \sim 4d$ betragen (C).
- Falzen: Es wird ein Doppelfalz in die Furniere geschliffen. Da dies sehr aufwändig ist (D) gibt es weiters die Möglichkeit, nach dem Anschleifen der Furniere diese mit eine schmalen Furnierstreifen (E) zu verbinden.

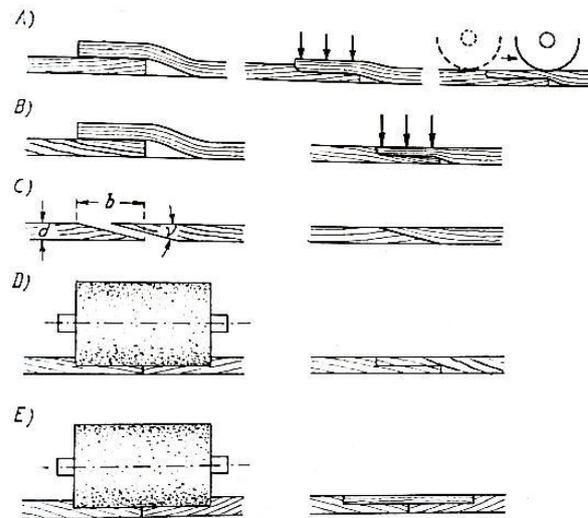


Abbildung 60: Fügearten nach Vorreiter (1963)

5-2 FÜGEN AM FURNIERSCHICHTHOLZ

Für die Herstellung von Platten oder anderen Erzeugnissen aus Furnieren ist es nötig, Einzelfurniere zu verlängern. Generell unterscheidet man Fügen in Faserrichtung, sowie rechtwinklig dazu. Abhängig von der Art der Herstellung (Schälen, Messern, Sägen) und den Dimensionen des Baumes erhält man unterschiedliche Abmessungen der Einzelfurniere, welche anschließend zur besseren Ressourcennutzung, aber auch um die benötigten Abmessungen des Furnierschichtholzes erreichen zu können, verlängert werden müssen. Durch den Umstand, dass Furnierschichtholz meist aus Schäl furnieren hergestellt wird, ist vor allem die Verlängerung in Faserrichtung (Fügen quer zur Faser) notwendig. Folgend wird auf Fügearten eingegangen, welche häufig in der Produktion von Furnierschichtholz für den konstruktiven Einsatz Verwendung finden.

5-3 ARTEN

5-3.1 STUMPF

Stumpfstöße sind sehr einfach herzustellen, eignen sich allerdings nur bedingt für Furniere, welche als tragendes Element eingesetzt werden. Es ist nahezu keine Kraftübertragung möglich. Meist kommt diese Methode im Möbelbau oder für Querlagen, welche als nichttragend angesehen werden, zum Einsatz.

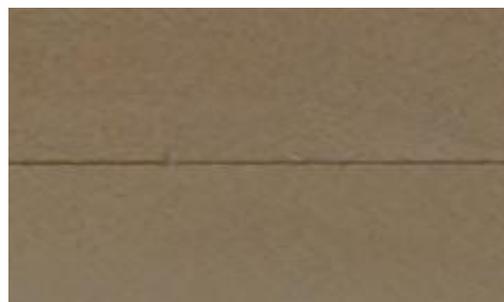


Abbildung 61: Stumpfer Stoß

Furnierband

Nachdem die Furniere exakt geschnitten wurden, werden sie Stumpf aneinandergelegt und mit einem Furnierband verbunden. Das mit Wasser benetzte Furnierband haftet nach der Austrocknung am Holz. Anschließend werden die beiden Teile über dem Klebestreifen zusammengeklappt, die freigelegten Stöße mit Klebstoff bestrichen und mit dem durchs Rückklappen entstehenden Pressdruck verleimt. Das Klebeband wird meist im Anschluss durch Schleifen entfernt.



Abbildung 62: Furniere verbunden mit Fugenband; rechts: Furnierband

Vernähen

Auch hierbei müssen die Furniere exakt geschnitten sein. Anschließend werden diese aneinandergelegt und durch einen heißen Leimfaden vernäht. Abbildung 63 zeigt eine Handmaschine zum Vernähen von Furnieren der Fa. Kuper (Heinrich Kuper GmbH & Co. KG). Der Leimfaden wird erhitzt und kreuzweise über die beiden Furnierenden geführt. Durch die Abkühlung erhärtet der Faden und stellt so die Verbindung her.

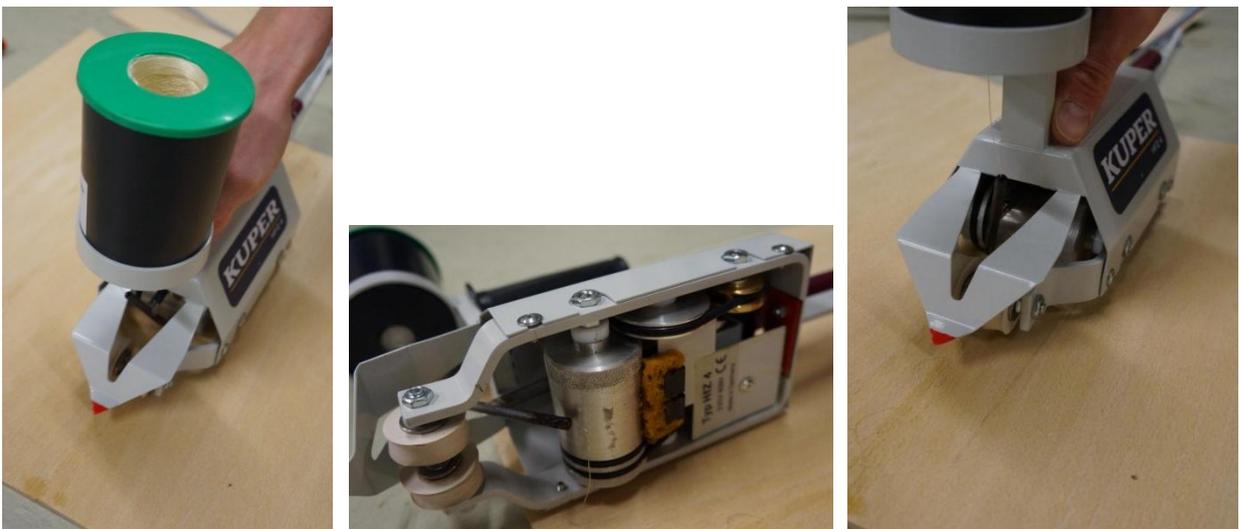


Abbildung 63: Furnierhandklebegerät der Fa. Kuper

5-3.2 ÜBERLAPPUNG

Ist eine sehr häufige Art Furniere zu verbinden. Hierbei werden die Furniere überlappt, der Überlappungsbereich wird mit Klebstoff bestrichen und anschließend verpresst. Problematisch ist die dadurch bedingte Zunahme der Dicke bei wenig komprimierbaren Holzarten.



Abbildung 64: Überlappungsstoß bei einer Furnierschichtholzplatte "Microlam"

5-3.3 SCHÄFTUNG

Die Schäftung ist eine hochwertige Art Furniere zu verbinden. Hierbei müssen die Furniere zuerst unter einem Winkel geschäftet und anschließend analog zur Überlappung verklebt und verpresst werden. Die Schäftungslänge bzw. der Schäftungswinkel ist abhängig von der Festigkeit der Klebefuge sowie der Herstellbarkeit.



Abbildung 65: Schäftung bei einer Furnierschichtholzplatte "Kerto S"

KAPITEL 6: MATERIAL UND METHODEN

6-1 ALLGEMEIN

Im ersten Teil dieses Kapitels wird auf die bei den Prüfungen verwendeten Materialien eingegangen. Hierzu zählen die Herstellung der Furniere im Furnierwerk der Fa. Merkscha Furnirnica (Merkscha Furnirnica d.o.o., Celje, Slowenien) sowie Angaben zu den verwendeten Klebstoffarten. Es folgt eine genaue Beschreibung der unterschiedlichen durchgeführten Prüfungen. Diese beinhaltet Angaben zu Prüfkonfiguration und Messeinrichtung, Prüfkörpergeometrie und Herstellung, den Prüfablauf sowie die Ermittlung der gewünschten Werte. Im Zuge dieser Arbeit wurden fünf unterschiedliche Arten von Prüfungen an Einzelfurnieren bzw. Furnierschichtholz durchgeführt:

- Zugprüfungen an Kleinproben
- Zugprüfungen nach EN 408
- Hochkantbiegeprüfungen nach EN 408
- Schubversuche nach Ehrhart (2014)
- Schubversuche nach Hirschmann (2011)

6-2 PRÜFKONZEPT

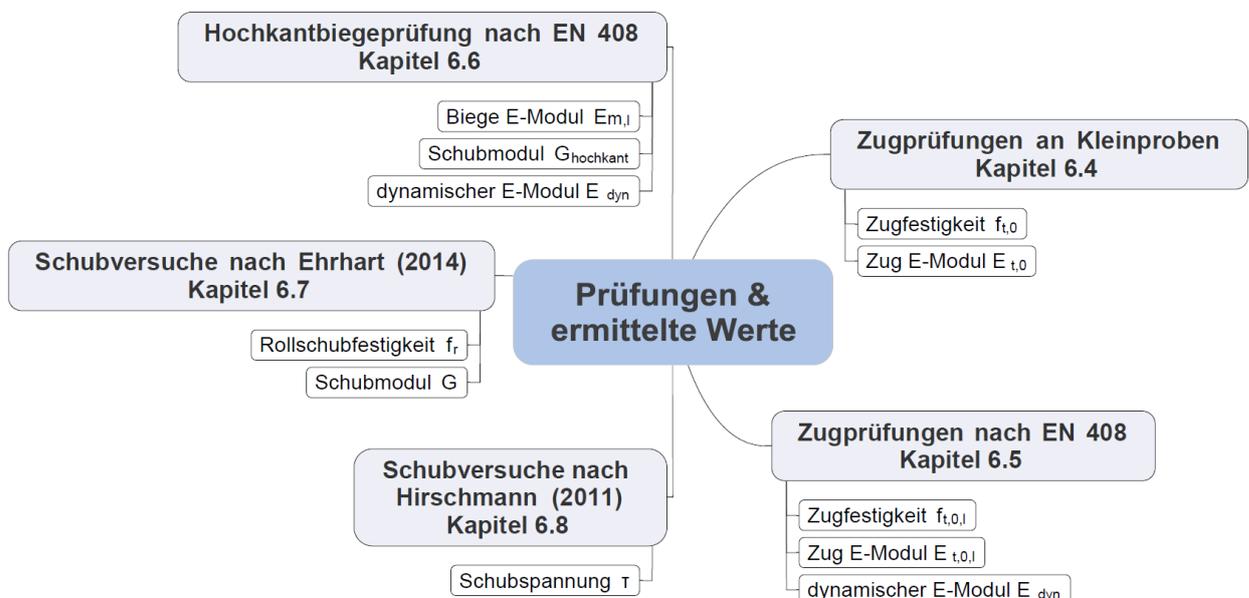


Abbildung 66: Durchgeführte Prüfungen und ermittelte Werte

6-3 MATERIAL

6-3.1 FURNIERE

Das Ausgangsmaterial für sämtliche Prüfungen wurde im Furnierwerk der Fa. Merkscha Furnirnica (Merkscha Furnirnica d.o.o., Celje, Slowenien) hergestellt (Abbildung 67). Vor dem Schälen bzw. Messern mussten die Stämme in Wasser gekocht werden. Nach dem Auftrennen der Baumstämme durchliefen die Furniere einen Trocknungsvorgang und wurden in weiterer Folge mit einer Holzfeuchte von ~7-9 % ausgeliefert. Es wurden Fichten-, Birken- und Buchenstämme zu Furnieren unterschiedlicher Herstellungsart sowie Dicke verarbeitet. Die Produktion der Furniere erfolgte nach üblichen Herstellungsverfahren, wobei genaue Parameter (Kochdauer und Kochtemperatur, Pressdruck des Druckbalkens, Trocknungstemperatur und Trocknungsdruck, etc.) nicht bekannt sind. Für die Verwendung von Furnieren im konstruktiven Bereich, besteht hierbei noch Optimierungspotential (genauerer zu Einflüssen der Herstellung auf mechanische Eigenschaften siehe Kapitel 4-3).



Abbildung 67: oben: Messern eines Fichtenstammes; unten: Schälen eines Fichtenstammes im Furnierwerk "Merkscha furnirnica"

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Prüfungen wurden ausschließlich Schälurniere unterschiedlicher Dicke der Holzarten Fichte, Buche und Birke verwendet (Tabelle 11).

Tabelle 11: verwendete Furniere

Holzart	Herstellungsart	Dicke [mm]
Buche	geschält	3,0 / 1,5
Birke	geschält	1,5
Fichte	geschält	1,5

6-3.2 KLEBSTOFF

Bei der Fertigung der Prüfkörper wurden zwei Arten von Klebstoff verwendet, ein Melaminharzklebstoff (MUF) und ein Polyurethanklebstoff (1 K-PUR). Folgend eine Beschreibung der Eigenschaften sowie der vom Hersteller vorgegebenen Verwendungsvorschriften.

Melaminharzklebstoff

Beim Melaminharzklebstoff der Firma Dynea (Dynea As, Lillestrom, Norwegen) handelt sich um einen Zweikomponentenklebstoff, bestehend aus Harz (Prefere 4546) und Härter (Prefere 5022). Sobald diese beiden Komponenten miteinander vermischt werden, beginnt die Reaktion der Aushärtung. Das Mischungsverhältnis von Harz zu Härter wurde mit 100:30 gewählt, wodurch sich bei einer Temperatur von 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit eine Verarbeitungszeit (offene Zeit) von ~25 Minuten ergibt. Bei dem gerade erwähnten Mischverhältnis beträgt die Rohdichte ~1,25 g/cm³. Die empfohlene Auftragsmenge laut Hersteller beträgt 320-500 g/m² bei einer erforderlichen Nachhärtezeit (Nachhärtung) von ~24 h. Der Hersteller empfiehlt bei der Verklebung von Harthölzern einen Pressdruck von 0,8-1,2 N/mm². (Dynea AS, 2012)

Polyurethanklebstoff

Verwendet wurde ein Polyurethanklebstoff Purbond HB S309 der Firma Henkel (Henkel Central Eastern Europe GmbH, Wien). Dabei handelt es sich um einen flüssigen Einkomponentenklebstoff mit einer Rohdichte von ~1,16 g/cm³, welcher unter Einfluss von Material- und Luftfeuchte aushärtet. Um eine optimale Aushärtung zu gewährleisten, sollte die Holzfeuchte der zu verbindenden Teile mindestens 8 % betragen. Die maximale Verarbeitungszeit (offene Zeit) beträgt ~30 Minuten bei einer empfohlenen Auftragsmenge von 140-180 g/m². Es ist eine Mindestpresszeit, bei einem Pressdruck von 0,6 - 1,0 N/mm², 20 °C, 65 % Luftfeuchtigkeit sowie einer Holzfeuchte von 12 %, von ~75 min einzuhalten. Die vom Hersteller empfohlene Nachhärtezeit beträgt 4 Stunden. (Purbond, 2011)

6-4 ZUGPRÜFUNG AN KLEINPROBEN

6-4.1 ALLGEMEIN

Ziel dieser ersten Versuchsreihe war es, den Einfluss unterschiedlicher Fügearten, sowie den Einfluss der Schichtanzahl bei Furnierschichtholz zu ermitteln. Hierzu wurden Zugversuche an Kleinproben mit Schäftung, Überlappung, sowie ohne Stoß durchgeführt. Weiters wurde zwischen 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau unterschieden (Tabelle 12). Neben der Ermittlung der Zugfestigkeit in Faserrichtung wurde auch der E-Modul in Faserrichtung bestimmt.

Tabelle 12: Zugversuche an Kleinproben

Aufbau	Holzart	Verbindungsart	Anzahl
1-schichtig	Buche	Ohne Stoß	5
	Buche	Schäftung	5
3-schichtig	Buche	Ohne Stoß	5
	Buche	Schäftung	5
	Buche	Überplattung	5

6-4.2 PRÜFKONFIGURATION UND MESSEINRICHTUNG

Die Prüfungen erfolgten an einer Zwick Universal 250 – Zugprüfmaschine der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Ulm, Deutschland). Der Krafteintrag erfolgt über Klemmbacken, welche durch ihre Konizität den Pressdruck mit zunehmender Kraft erhöhen. Für die hier zur Verfügung stehenden Klemmbacken, mussten die Einzelfurniere in diesem Bereich (Abbildung 68, grau hinterlegt) auf eine Stärke von mindestens 9 mm aufgedoppelt werden (Abbildung 68). Der Pressdruck der Klemmbacken ergab sich durch die Dicke des Prüfkörpers im Einspannbereich und konnte nicht explizit gesteuert werden. Eine schematische Darstellung der genauen Prüfkfiguration ist in Abbildung 68 anhand der Prüfung eines Einzelfurniers dargestellt. Die Maschine misst neben der Kraft auch den globalen Weg zur Bestimmung der Dehnungen. Zur genauen E-Modulbestimmung wurden mittig, beidseitig DD1 – Dehnungsmesser (Messung auf 1/1000 mm genau) angebracht (Abbildung 68), welche mittels kleiner Metallspitzen an den Prüfkörpern hafteten.

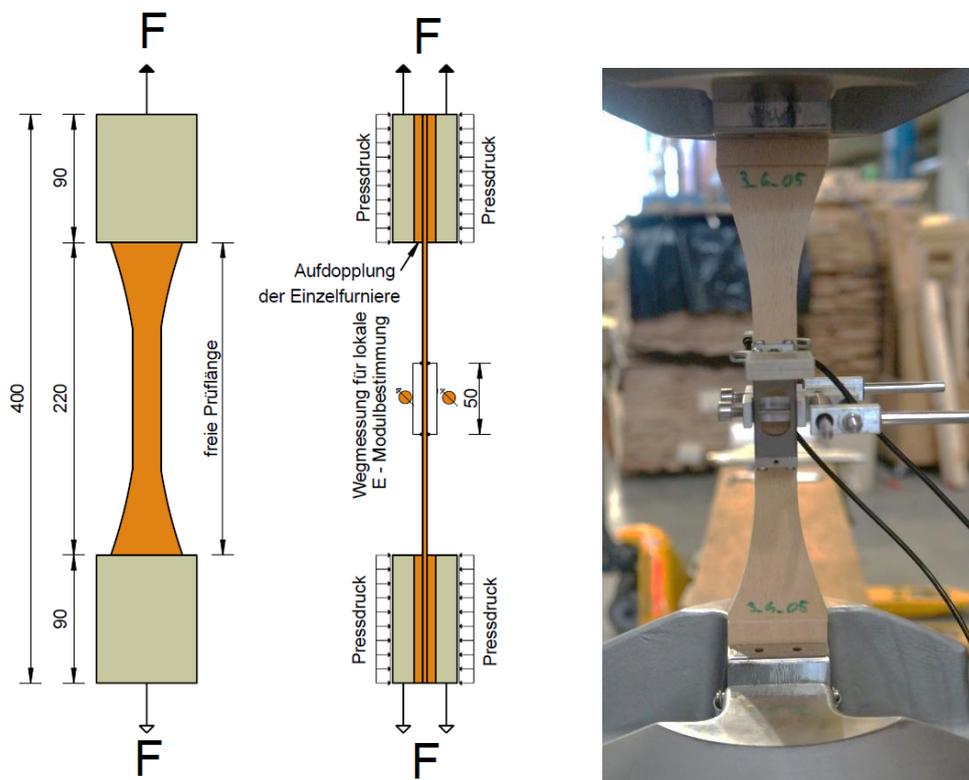


Abbildung 68: links: Prüfkfiguration Kleinproben; rechts: Anbringung der DD1 am Prüfkörper, Maße in mm

6-4.3 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE UND HERSTELLUNG

6-4.3.1 Prüfkörpergeometrie

Die Prüfkörpergeometrie und Längenverhältnisse wurden in Anlehnung an jene von Kollmann et al. (1975) gewählt (Abbildung 69). Die Prüfkörper hatten eine Gesamtlänge von 400 mm und eine Gesamtbreite von 50 mm. Der Mittelbereich wurde auf einer Länge von 100 mm auf eine Breite von 20 mm verjüngt. Damit sollte sichergestellt werden, dass ein Versagen in diesem Bereich stattfindet. Um möglichst geringe Kerbspannungen im Bereich der Querschnittsverringering zu erhalten, führte man diesen mit einem Ausrundungsradius von 350 mm aus.

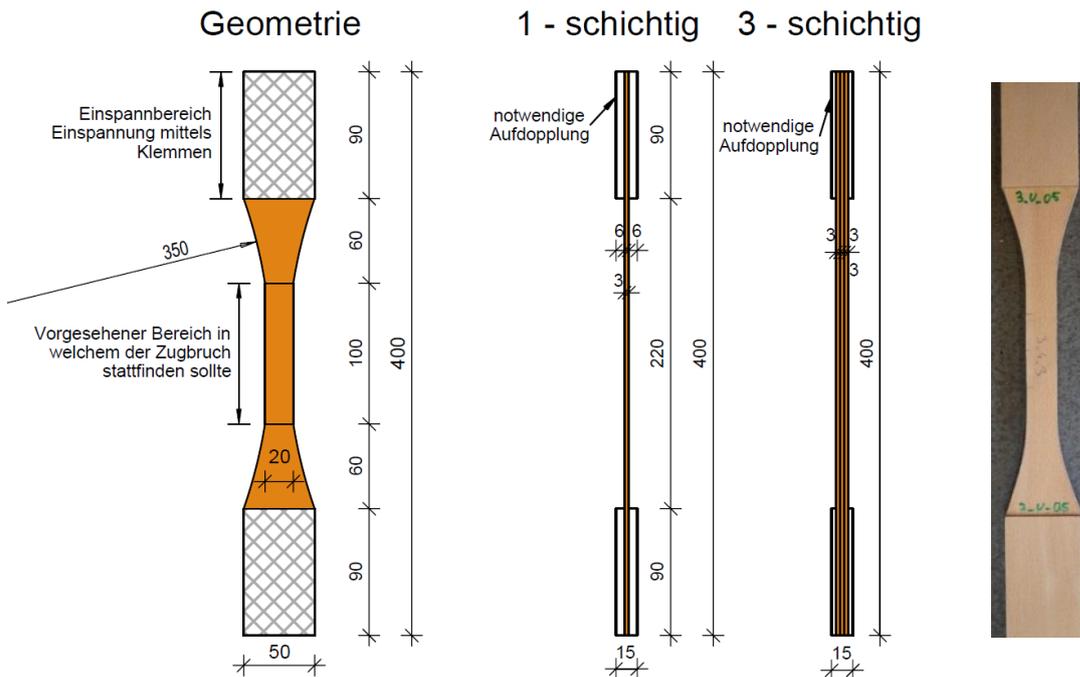


Abbildung 69: Abmessungen der Prüfkörper für die Zugversuche an Kleinprobe, Maße in mm

6-4.3.2 Arten von Prüfkörpern

Ohne Stoß

Hergestellt wurden jeweils 5 Prüfkörper ausgeführt als Einzelfurnier, sowie fünf mit einem 3-schichtigen Aufbau (Abbildung 70).

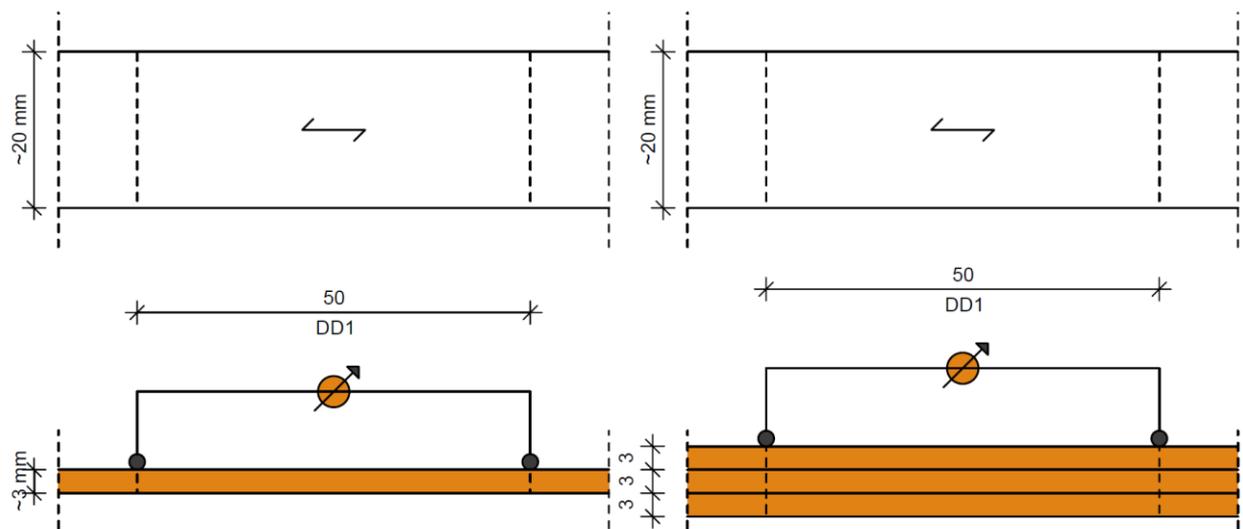


Abbildung 70: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, ohne Stoß, Maße in mm

Schäftung

Hier wurden ebenfalls fünf 1-schichtige sowie fünf 3-schichtige Probekörper hergestellt. Der Stoß der Furniere wurde mittels Schäftung in der Mitte des Prüfkörpers ausgeführt. Beim 3-schichtigen Aufbau sind die beiden äußeren Furniere jeweils durchgehend und das Mittelfurnier ist analog zum 1-schichtigen

Prüfkörper im Mittelbereich geschäftet (Abbildung 71). Die Schäftungslänge wurde mit einem Verhältnis von 1/20 gewählt. Somit ergab sich eine Schäftungslänge von 60 mm.

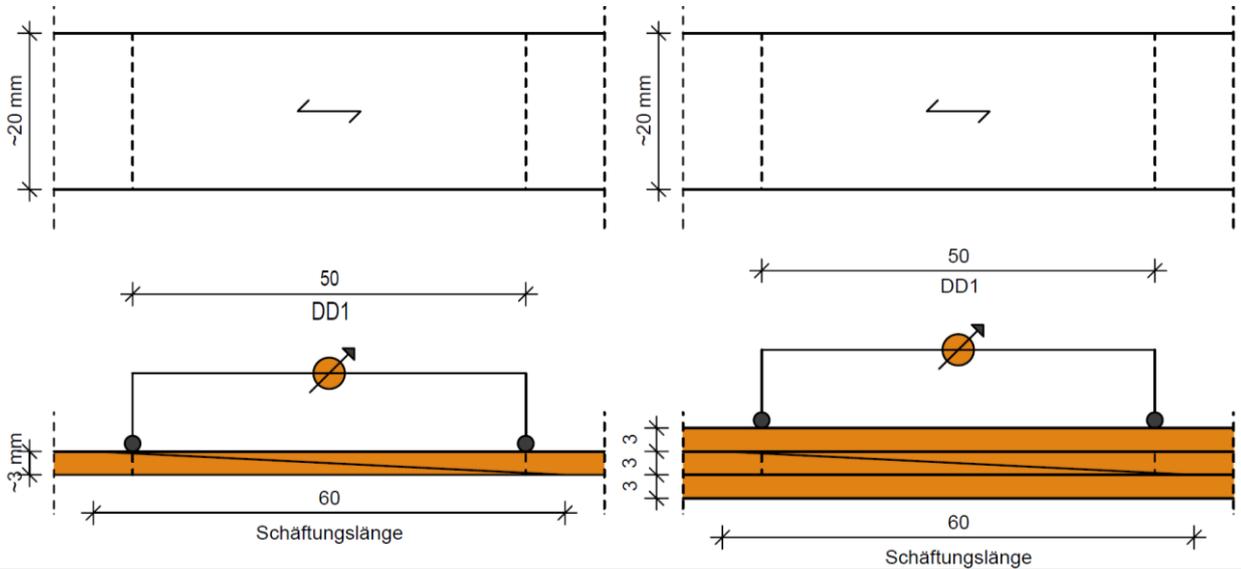


Abbildung 71: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, mit Schäftung, Maße in mm

Überlappung

Es wurden fünf 3-schichtige Prüfkörper mit Überlappungsstoß hergestellt. Die Überlappungslänge ergab sich durch die Haftfestigkeit der Klebefuge und wurde mit 30 mm Länge ausgeführt (Abbildung 72).

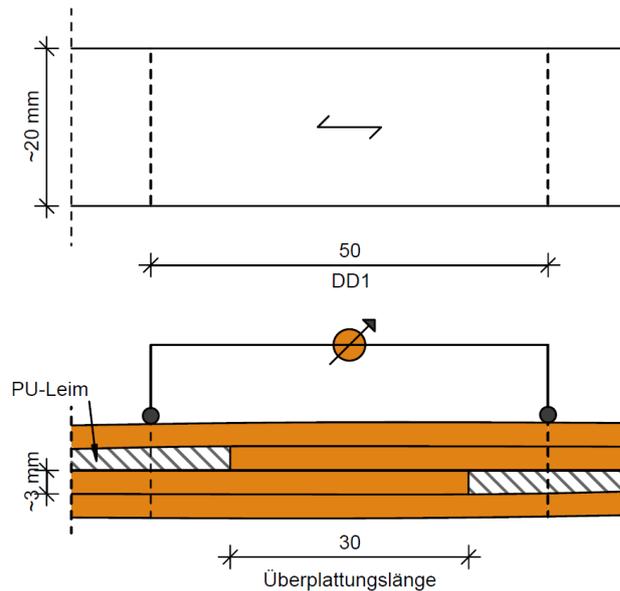


Abbildung 72: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, mit Überlappung, Maße in mm

6-4.3.3 Prüfkörperbezeichnung

Die Bezeichnung der Prüfkörper setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Beispiel:

- 1-schichtig: Z_G_01
- 3-schichtig: Z3_G_01

Z, Z3: Zugprüfung (3...3-schichtig)

G: Fügeart (G...ohne Stoß; S...mit Schäftung; U...mit Überlappung)

01: fortlaufende Nummer

6-4.3.4 Herstellung

Ausgangsmaterial für die Prüfkörperherstellung waren 3,0 mm dicke Schälurniere der Buche. Sämtliche für die Prüfkörper benötigte Furniere wurden von einem Buchenstamm entnommen. Um eine einheitliche Holzfeuchte zu gewährleisten, lagerten die Furniere vor der Prüfkörperherstellung in einer Klimakammer bei Normklima (Temperatur: 20 °C; Luftfeuchtigkeit: 65 %). Die Furniere der 3-schichtigen Prüfkörper wurden anfangs mit einem Übermaß zugeschnitten und anschließend mit PU-Klebstoff (Purbond HB S309, genaueres siehe 6-3.2) bei einem Pressdruck von 1 N/mm² verklebt. Der Klebstoff wurde mittels Pinsel aufgetragen, wobei die zu verklebenden Teile vor dem Klebstoffauftrag befeuchtet wurden. Um die gewünschte Geometrie (Verjüngung) zu erhalten, wurden die Prüfkörper mit einer Bandsäge grob vorgeschritten und anschließend mit einer Bandschleifmaschine auf die in Abbildung 69 dargestellte Form geschliffen. Im letzten Herstellungsschritt mussten die Prüfkörper in Dickenrichtung aufgedoppelt werden, um die Mindestdicke, welche sich durch die zur Verfügung stehenden Klemmbanken ergibt, zu erreichen.

6-4.4 PRÜFABLAUF

Vor dem Einbau des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wurde der Prüfkörper beschriftet, um die spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu erleichtern. Anschließend wurde der Prüfkörper vertikal ausgerichtet, zwischen die Klemmbanken gegeben und mit geringem Klemmdruck verspannt, um diesen zu fixieren. Die Anbringung der DD1-Messinstrumente zur Bestimmung der lokalen Dehnungen erfolgte durch ein Klemmsystem, welches kleine Metallspitzen in den Prüfkörper drückte und somit die Messung ermöglichte. Bei Erreichen von ca. 50 % der im Vorhinein berechneten Maximallast nahm man diese ab, um Schäden an den präzisen Messgeräten zu verhindern. Zur Berechnung der Maximallast wurden Werte von fehlerfreiem Vollholz nach Kollmann (1951) verwendet. Im Anschluss wurde der Prüfkörper weiter bis zum Versagen belastet. Die Kraftaufbringung erfolgte weggesteuert. Durch die unterschiedlichen Prüfkörper ergaben sich Belastungsgeschwindigkeiten zwischen 0,5 mm/min und 0,8 mm/min, um die in der Norm geregelte Zeit bis zum Erreichen der Maximallast von 300±120 s einzuhalten (Tabelle 13). Das Auftreten von Initialrissen sowie das Bruchbild wurden bei jeder Prüfung protokolliert.

Tabelle 13: Prüfgeschwindigkeit, $F_{0,5}$ und Prüfzeit

Bezeichnung	G_0x	S_0x	3_G_0x	3_S_0x	3_U_0x
v [mm/min]	0,7	0,5	0,8	0,8	0,6
0,5 F_{est} [kN]	6,0	4,0	12,0	12,0	10,0
$t_{F_{max,mean}}$ [s]	251	276	289	307	260

Während jeder Prüfung wurden folgende Parameter aufgezeichnet:

- Prüfzeit [s]
- Standardkraft [N]
- Traversenweg [mm]
- Wegaufnehmer 1 und 2 [mm]

6-4.5 ERMITTLUNG DER ZUGFESTIGKEIT IN FASERRICHTUNG

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte nach ÖNORM EN 789, 2005. Laut Norm muss die Einspannvorrichtung gelenkig und selbstausrichtend sein, um die Übertragung eines Biegemoments auf den Prüfkörper zu verhindern. Dies konnte durch die vorhandene Prüfmaschine nicht vollkommen gewährleistet werden. Allerdings wurde beim Einbau des Prüfkörpers darauf geachtet, dass beide Einspannvorrichtungen parallel ausgerichtet waren, um einen möglichen Einfluss gering zu halten.

Bestimmung der Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit $f_{t,0}$ wurde nach Gleichung 6.1 berechnet:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (6.1)$$

$f_{t,0}$	Zugfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]
F_{max}	maximal aufgebrachte Zugkraft [N]
A	Fläche des Versagensquerschnitts [mm ²]

6-4.6 ERMITTLUNG DES E-MODULS IN FASERRICHTUNG

Nach ÖNORM EN 789, 2005 ist die Verformung mit einer Genauigkeit von 1% zu ermitteln. Für die Berechnung des E-Moduls ist der Mittelwert der Ablesungen auf 0,005 mm gerundet zu verwenden. Mit den Messergebnissen ist eine Last-Verformungskurve zu zeichnen und im Kurvenabschnitt zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ eine Regressionsanalyse durchzuführen (Abbildung 73).

Bestimmung des E-Moduls

Der Zug E-Modul wurde nach folgender Gleichung berechnet.

$$E_t = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_1}{(u_2 - u_1) \cdot A} \quad (6.2)$$

- E_t E-Modul aus Zugprüfung parallel zur Faser [N/mm²]
- l_1 Länge des Messbereichs der lokalen Wegmessung (Abbildung 74) [mm]
- $F_2 - F_1$ Zunahme der Kraft zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ (Abbildung 73) [N]
- $u_2 - u_1$ Zunahme der Verformung entsprechend $F_2 - F_1$ unter Anwendung einer linearen Regressionsanalyse (Abbildung 73) [mm]
- A Querschnittsfläche in welcher die lokale Wegmessung stattfindet [mm²]

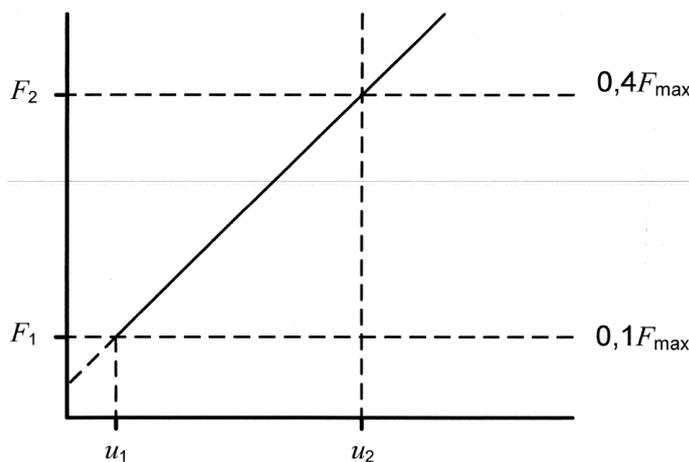


Abbildung 73: Last - Verformungskurve innerhalb des Bereichs der elastischen Verformung (ÖNORM EN 789, 2005)

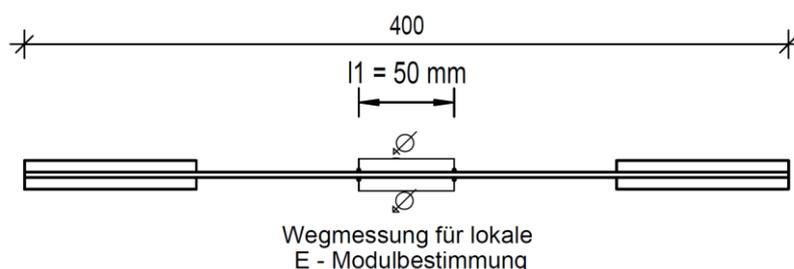


Abbildung 74: Abmessungen zur Bestimmung des E-Moduls

6-5 ZUGPRÜFUNG NACH EN 408

6-5.1 ALLGEMEIN

Die ÖNORM EN 14374, 2005 verweist bei der Bestimmung der Zugfestigkeit in Faserrichtung auf die ÖNORM EN 408, 2012. Somit wurden sämtliche Prüfungen nach den Vorgaben dieser Norm durchgeführt. Es sollte die Zugfestigkeit sowie der E-Modul in Faserrichtung bestimmt werden. Aufgrund unterschiedlicher Schichtanordnung unterschied man zwei Prüfserien (Tabelle 14).

Serie 1: Ziel der ersten Versuchsreihe war es, den Unterschied der Holzarten Buche, Birke und Fichte zu ermitteln. Insgesamt wurden 13 Prüfungen an 12-schichtigem Furnierschichtholz, bestehend aus 1,5 mm dicken Einzelfurnieren, durchgeführt. Um einen Vergleichswert zu erhalten, führte man zusätzlich fünf Prüfungen an 6-schichtigem Buchen-Furnierschichtholz bestehend aus 3,0 mm dicken Einzelfurnieren durch. (Tabelle 14)

Serie 2: Der Aufbau wurde so gewählt, um mechanische Kennwerte für das von Loik (2015) entwickelte UHPP-Trapezprofil zu erhalten. Die Prüfungen erfolgten an 11-schichtigem Furnierschichtholz, bestehend aus 1,5 mm dicken Einzelfurnieren der Buche. Fünf Probekörper bestanden aus elf Längslagen, weitere fünf aus neun Längslagen sowie zwei Querlagen. (Tabelle 14)

Tabelle 14: Serien an Zugversuchen

Serie	1.1	1.2	2.1	2.2
Anzahl	13	3	5	5
Holzart	Bu, Bi, Fi	Bu	Bu	Bu
Schichtdicke [mm]	1,5	3,0	1,5	1,5
Schichtanzahl	12	6	11	11
Gesamtdicke [mm]	18,0	18,0	16,5	16,5
Querlagen	nein	nein	nein	ja (2)

Bu...Buche; Bi...Birke; Fi...Fichte

6-5.2 PRÜFKONFIGURATION UND MESSEINRICHTUNG

Die Prüfungen wurden an der Zugprüfmaschine *lignum_z_850* durchgeführt. Der Krafteintrag erfolgt beidseitig über Klemmbacken, wobei der Pressdruck abhängig von der Holzart war (Buche, Birke: 3,5 N/mm²; Fichte: 2,5 N/mm²). Eine schematische Darstellung der Prüfkongfiguration ist Abbildung 75 zu sehen. Die Maschine misst neben der aufgetragenen Last auch den Weg zur Berechnung des globalen E-Moduls. Zur Bestimmung des lokalen E-Moduls wurden an den beiden Seitenflächen des Prüfkörpers Wegaufnehmer mit einer Bezugslänge von 750 mm (5b) befestigt.

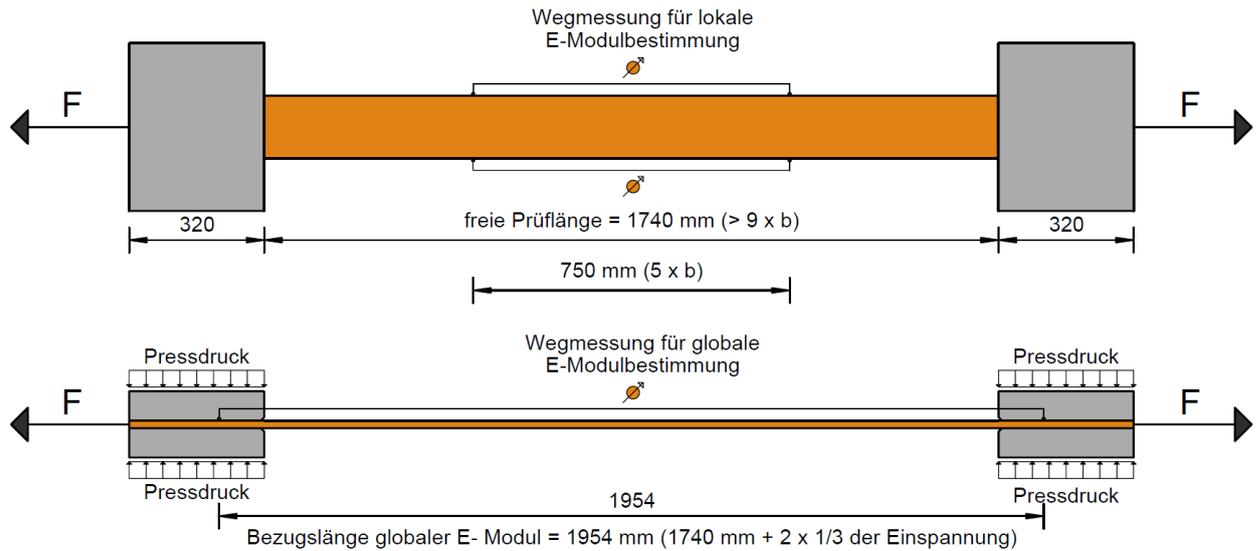


Abbildung 75: Prüfkonfiguration für Zugprüfungen nach EN 408, Maße in mm

Abbildung 76 zeigt im linken Bild die Anbringung der lokalen Wegmessung mittels Schrauben. Alternativ wurde die Wegmessung an drei Prüfkörpern mit Klemmen angebracht (Abbildung 76, rechtes Bild), um einen möglichen Einfluss der Schrauben in den Seitenfläche zu ermitteln.

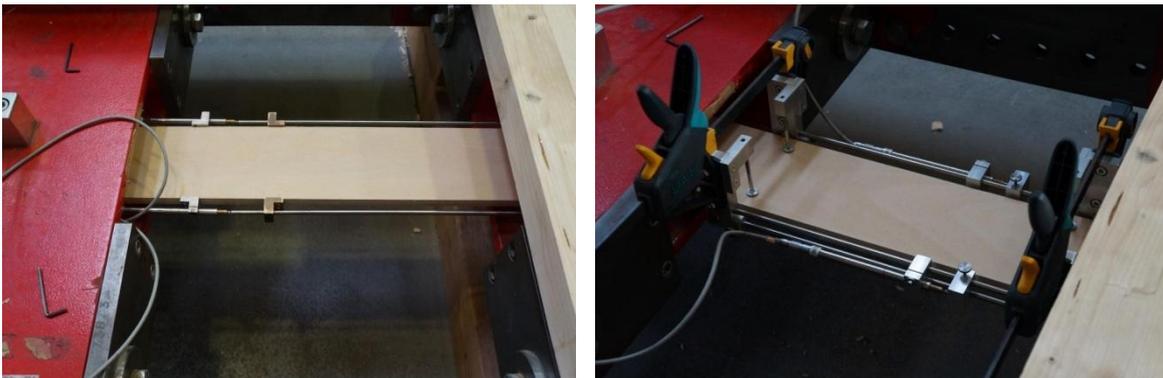


Abbildung 76: Anbringung der lokalen Wegmessung; links: Befestigung mit Schrauben; rechts: Befestigung mit Klemmen

6-5.3 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE UND HERSTELLUNG

6-5.3.1 Prüfkörpergeometrie

Die ÖNORM EN 14374, 2005 schreibt eine Mindestlänge von 1000 mm zwischen den Einspannbacken vor. Des Weiteren ist nach ÖNORM EN 408, 2012 eine Mindestlänge vom 9-fachen des größeren Querschnittsmaßes einzuhalten. An der zur Verfügung stehenden Zugprüfmaschine sind allerdings nur Zugprüfungen ab einer Länge von 2400 mm möglich. Somit ergaben sich die in Abbildung 77 dargestellten Abmessungen von 2400 mm x 150 mm. Die Gesamtdicke der Prüfkörper, sowie die Dicke der Einzelfurniere, variierte in Abhängigkeit der einzelnen Prüferien.

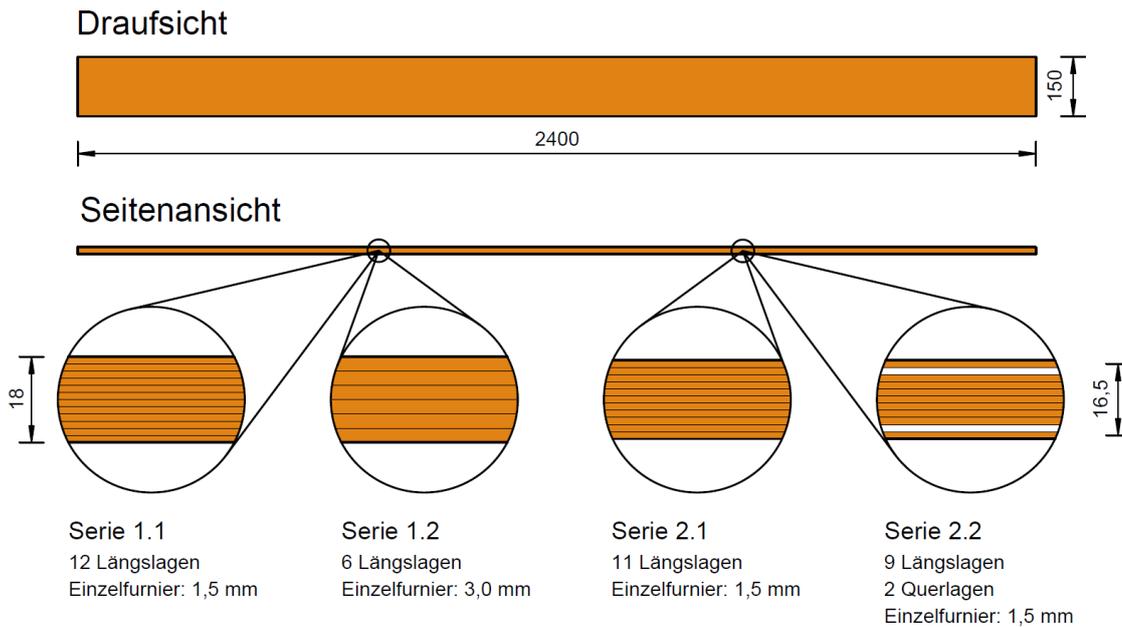


Abbildung 77: Abmessungen der Prüfkörper für die Zugprüfung, Maße in mm

6-5.3.2 Prüfkörperbezeichnung

Die Bezeichnung der Prüfkörper setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Beispiel:

- Bi_12n_01
- Bu_11n_QL_01

Bi: Holzart (Bi...Birke; Bu...Buche; Fi...Fichte)

12n: Schichtanzahl (12 Schichten)

QL: Querlagen vorhanden (ja, nein)

01: fortlaufende Nummer

6-5.3.3 Herstellung

Die Herstellung der Prüfkörper wird stellvertretend für alle Zug- und Hochkantbiegeprüfungen an der Serie 1.1 genauer beschrieben.

Serie 1.1

Ausgangsmaterialien für die Prüfkörperherstellung waren 1,5 mm dicke Schälurniere der Holzarten Buche, Fichte und Birke, welche wie in Kapitel 6-3.1 beschrieben, im Furnierwerk geschält wurden, wobei die Einzelfurniere der jeweiligen Serien stets aus nebeneinander gelagerten Furnierpaketen entnommen wurden. Es ist daher davon auszugehen, dass diese auch aus ähnlichen Bereichen des Stammes entnommen wurden. Um eine einheitliche Holzfeuchte zu erreichen, lagerten diese vor der Weiterverarbeitung in einer Klimakammer bei Normklima (Temperatur: 20 °C; Luftfeuchtigkeit: 65 %). Es wurden jeweils fünf Prüfkörper aus Birken- und Buchenfurnieren, sowie drei aus Fichtenfurnieren hergestellt. Im ersten Schritt wurden Einzelfurniere mit den Abmessungen von 250 mm x 180 mm aus verschiedenen großen Furnierplatten geschnitten und zufällig zu Stapeln mit je zwölf Einzelfurnieren

aufgeteilt. Die Verklebung erfolgte mit einem Melaminharzklebstoff (MUF-Klebstoff, Kapitel 6-3.2) bei einem Mischungsverhältnis von Harz zu Härter von 100:30. Der durchschnittliche Leimbedarf aller Serien betrug in etwa 260-300 g/m². Der Klebstoff wurde mit einer Walze gleichmäßig auf die Einzelfurniere aufgebracht. Anschließend kamen die mit Klebstoff versehenen Furnierstapel in die Presse und wurden mit einem Pressdruck von 0,6 N/mm² für 4 Stunden gepresst. Im letzten Arbeitsschritt mussten die Prüfkörper auf die Prüfgeometrie von 2400 mm auf 150 mm zugeschnitten werden. (Abbildung 78)



Zuschneiden der Einzelfurniere



Leimauftrag



Leimauftrag mittels Walze



Furnierstapel kurz vor dem Pressvorgang



Herstellen der exakten Geometrie



Fertiger Prüfkörper

Abbildung 78: Herstellungsprozess der Prüfkörper für Zug- und Hochkantbiegeversuche

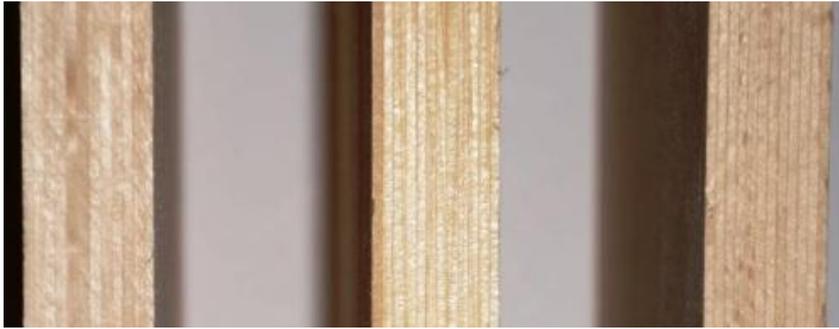


Abbildung 79: 12-schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Furnieren, Querschnitt; v.l.n.r.: Birke, Fichte und Buche

Serie 1.2

Die Herstellung erfolgte analog zu jener der Serie 1.1 und unterschied sich nur durch einen 6-schichtigen Aufbau aus 3,0 mm geschälten Buchenfurnieren (Abbildung 80).

Aufbau des Furnierschichtholzes



Abbildung 80: 6-schichtiger Aufbau aus 3,0 mm Buchenfurnieren, Querschnitt

Serie 2.1

Diese Serie bestand aus fünf Prüfkörpern mit 11-schichtigem Aufbau, hergestellt aus 1,5 mm dicken Buchenfurnieren (Abbildung 81). Im Unterschied zur Serie 1 wurden diese mit einem Pressdruck von 0,8 N/mm² beaufschlagt.

Aufbau des Furnierschichtholzes



Abbildung 81: 11-schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Buchenfurnieren, Querschnitt

Serie 2.2

Es wurden fünf Prüfkörper mit einem 11-schichtigem Aufbau hergestellt, wobei zwei Querlagen eingebaut wurden. Diese wurden in der 2. und 10. Schicht angeordnet und sind in Abbildung 82 als dunklere Schichten erkennbar. Aufgrund der Länge der Prüfkörper von 2400 mm mussten diese längs der Faser gefügt werden. Der Stoß wurde als stumpfer Stoß ausgeführt, jedoch nicht verklebt, sondern mit einem Furnierband gefügt. Die Pressung der Einzelfurniere erfolgte mit einem Pressdruck von 0,8 N/mm².

Aufbau des Furnierschichtholzes



Abbildung 82: links: 11- schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Buchenfurnieren, Querschnitt, inklusiver zweier Querlagen; rechts: fügen der Längslagen mittels Furnierband

6-5.4 PRÜFABLAUF

Vor dem Einbau des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wurde der Prüfkörper beschriftet, um die spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu erleichtern. Die Befestigung des Gestänges für die lokale Wegmessung (Bezugslänge 750 mm) erfolgte mit 3,0 x 20,0 mm Schrauben an den beiden Seitenflächen des Prüfkörpers (Abbildung 83, links). Aufgrund der Prüfmaschinenengeometrie musste dieses leicht ausmittig angebracht werden (um 12,5 cm aus der Mitte verschoben), wobei dies keine weiteren Einflüsse auf die Messung hat. Nach der zentrischen Ausrichtung des Prüfkörpers zwischen den Klemmbanken wurde der Prüfkörper, abhängig von der Holzart, mit einem Klemmdruck von 2,0 bzw. 3,5 N/mm² fixiert (Abbildung 83, rechts). Die lokale Wegmessung wurde abhängig von der Prüfserie bei unterschiedlichen Lastniveaus (ca. 50 % der errechneten Maximallast) vom Prüfkörper entfernt, um Beschädigungen an den sensiblen Wegmessern zu verhindern (Tabelle 15). Die Abschätzung der Maximallast erfolgte anhand von Werten an fehlerfreiem Vollholz nach Kollmann (1951). Anschließend wurde der Prüfkörper bis zum Versagen weiterbelastet.

Tabelle 15: Klemmdruck und $F_{0,5,est}$ der unterschiedlichen Prüfserien

Serie	Holzart	Klemmdruck	$F_{0,5,est}$
		[N/mm ²]	[kN]
1.1	Buche	3,5	150
	Birke	3,5	150
	Fichte	2,5	80
1.2	Buche	3,5	150
2.1	Buche	3,5	150
2.2	Buche	3,5	100

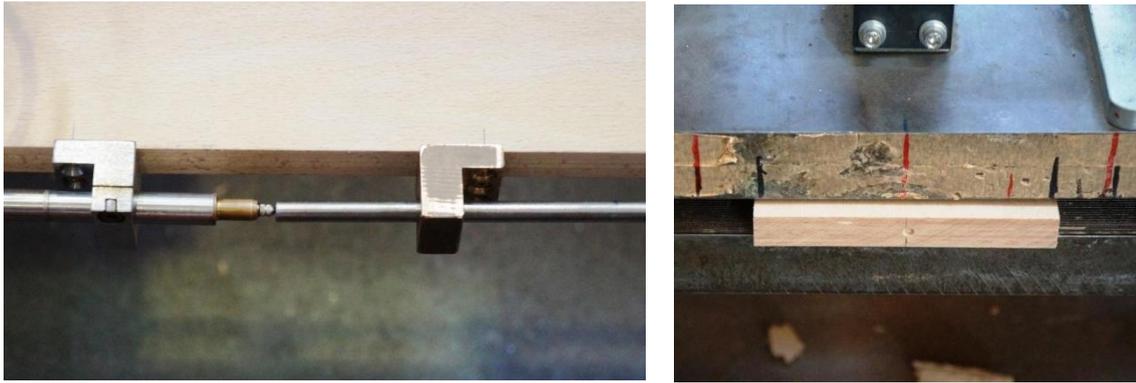


Abbildung 83: links: Befestigung der Wegaufnehmer; rechts: Prüfkörper zentriert zwischen den Klemmbacken

Während jeder Prüfung wurden folgende Parameter aufgezeichnet:

- Prüfzeit [s]
- Standardkraft [N]
- globaler Weg [mm]
- lokaler Weg, Wegaufnehmer 1 und 2 [mm] (bis $0,5 F_{est}$)

6-5.5 ERMITTLUNG DER ZUGFESTIGKEIT IN FASERRICHTUNG

Die Ermittlung der Zugfestigkeit in Faserrichtung erfolgte analog zu jener der Kleinproben (siehe Kapitel 6-4.5).

6-5.6 ERMITTLUNG DES E-MODULS IN FASERRICHTUNG

Auch diese erfolgte analog zu jener der Kleinproben (siehe Kapitel 6-4.5). Allerdings erfolgt die Berechnung des E-Moduls mit einer Genauigkeit des Regressionskoeffizienten von 0,9999.

6-5.7 DYNAMISCHER E-MODUL MITTELS ULTRASCHALL

Der dynamische E-Modul wurde an sämtlichen Prüfkörpern der Zug- und Hochkantbiegeversuche bestimmt. Zur Ermittlung des dynamischen E-Moduls $E_{dyn,US}$ mittels Ultraschall benötigt man die Länge, die Rohdichte, die Feuchtigkeit sowie die Ultraschalllaufzeit. Die Bestimmung erfolgte auf Basis der Ultraschallgeschwindigkeit nach den Gleichungen 6.3 und 6.4. (Schickhofer, 2006)

$$v = \frac{l}{t} \cdot 10^6 \quad (6.3)$$

v	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
l	Prüfkörperlänge [m]
t	Ultraschalllaufzeit [μ s]

$$E_{dyn} = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (6.4)$$

E_{dyn}	dynamischer E-Modul [N/mm ²]
v	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
ρ	mittlere Rohdichte zum Zeitpunkt der Messung [kg/m ³]

6-6 HOCHKANTBIEGUNGEPRÜFUNG NACH EN 408

6-6.1 ALLGEMEIN

Die ÖNORM EN 14374, 2005 verweist bei der Bestimmung des Schubmoduls bei Hochkantbiegung auf die ÖNORM EN 408, 2012. Neben der Ermittlung des Schubmoduls anhand von Schubfeldern, wurde der lokale E-Modul bei Hochkantbiegung am 4-Punkt-Biegeversuch bestimmt. Ähnlich zu den gerade eben beschriebenen Zugprüfungen wurden hier ebenfalls zwei Prüfserien durchgeführt.

Serie 1: Die erste Versuchsreihe sollte einen Vergleich der Holzarten Buche, Birke und Fichte darlegen. Insgesamt wurden 13 Prüfungen an 12-schichtigem Furnierschichtholz durchgeführt.

Serie 2: Wie bereits bei den Zugprüfungen erwähnt, sollten auch hiermit Materialkennwerte für das von Loik (2015) entwickelte UHPP-Trapezprofil ermittelt werden. Die Prüfungen erfolgten an 11-schichtigem Furnierschichtholz aus 1,5 mm dicken Buchenfurnieren. Fünf Probekörper bestanden aus elf Längslagen, weitere fünf aus neun Längslagen sowie zwei Querlagen.

Tabelle 16: Serien an Hochkantbiegeprüfungen

Serie	1.1	2.1	2.2
Anzahl	13	5	5
Holzart	Bu, Bi, Fi	Bu	Bu
Schichtdicke [mm]	1,5	1,5	1,5
Schichtanzahl	12	11	11
Gesamtdicke [mm]	18,0	16,5	16,5
Querlagen	nein	nein	ja (2)

Bu...Buche; Bi...Birke; Fi...Fichte

6-6.2 PRÜFKONFIGURATION UND MESSEINRICHTUNG

Die ÖNORM EN 408, 2012 zur Ermittlung des Schubmoduls anhand eines Schubfeldes schreibt als Mindestlänge des Prüfkörpers die 19-fache Querschnittshöhe vor. Der Mindestabstand zwischen den Auflagern muss der 18-fachen Querschnittshöhe entsprechen, darf allerdings um den 3-fachen Betrag der Prüfkörperhöhe verringert werden (Abbildung 84).

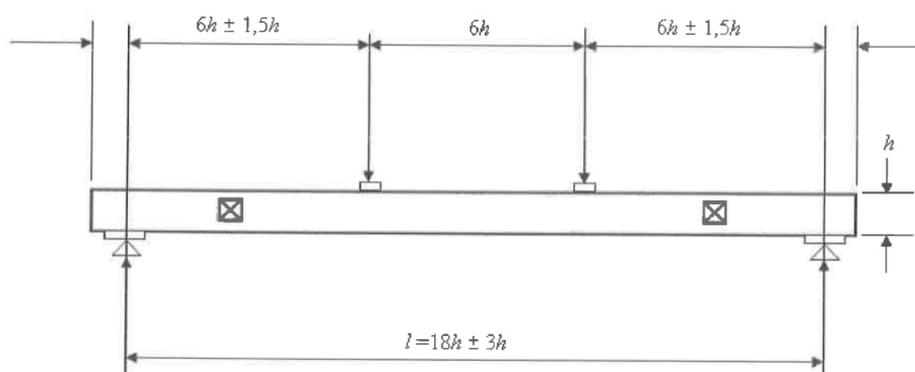


Abbildung 84: Prüfanordnung für die Prüfung des Schubfeldes nach ÖNORM EN 408, 2012

Da die Einzelfurniere nur in limitierten Längen vorhanden waren, entschied man sich die Spannweite auf das Mindestmaß von 15h zu verringern. Durch das große Verhältnis von Höhe zu Dicke war es nötig,

mehrere Kipphalterungen anzubringen, um Biegedrillknicken am Prüfkörper zu verhindern und dadurch genaue Messungen zu ermöglichen. Die Anordnung der Kipphalterungen, Auflager und Lasteinleitungen sowie die Positionierung der Messeinrichtungen sind der Abbildung 85 zu entnehmen.

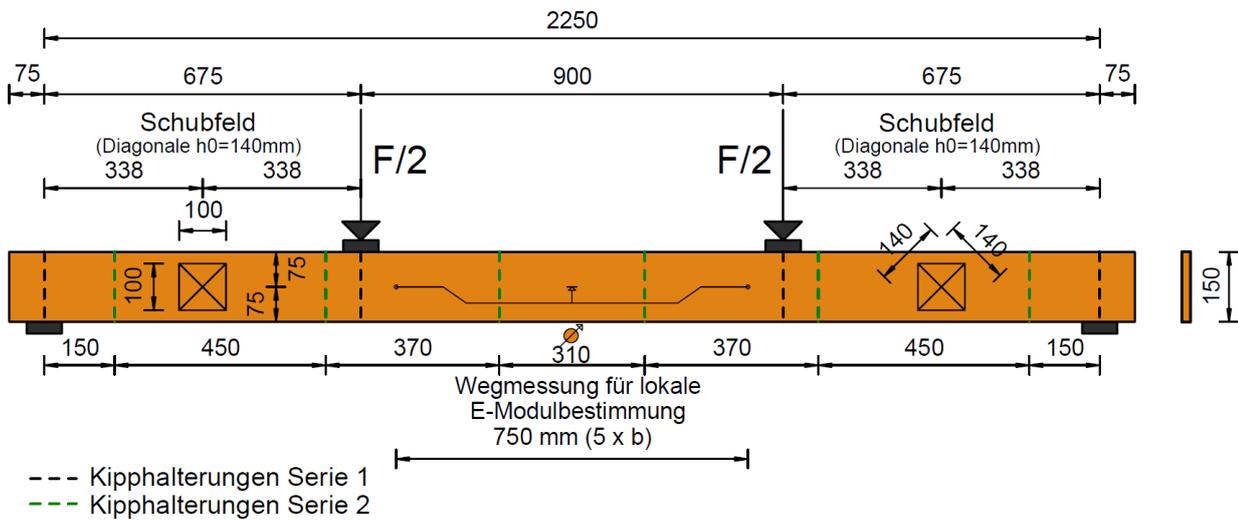


Abbildung 85: schematische Darstellung der Prüfkonfiguration der Hochkantbiegeprüfungen, Maße in mm



Abbildung 86: Prüfkonfiguration bei Hochkantbiegeprüfungen

Schubfeld:

Die Messungen des Schubfeldes erfolgten beidseitig mittels DD1-Wegaufnehmern, welche Messungen mit einer Genauigkeit von 1/1000 mm erlauben. ÖNORM EN 408, 2012 gibt vor, dass sich der Mittelpunkt des Schubfeldes auf halber Strecke zwischen Auflager und Kräfteinleitung befinden muss. Die Diagonale des Schubfeldes hatte eine Länge von 140 mm. Kleine Metallspitzen an den

Messinstrumenten wurden durch Federn gegen den Prüfkörper gepresst und ermöglichten dadurch die Messung der Verzerrungen (Abbildung 87).

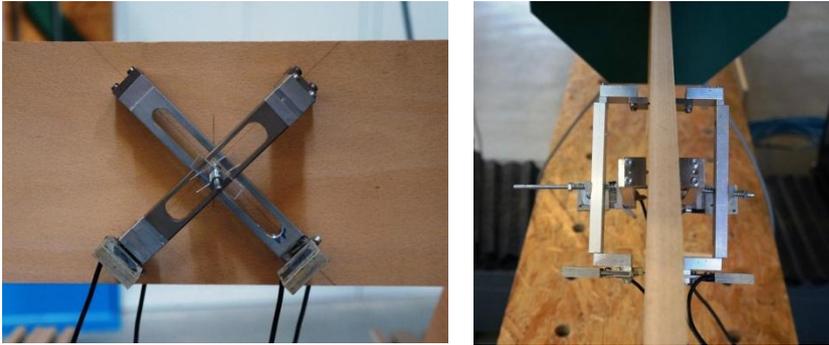


Abbildung 87: Messeinrichtung zur Messung von Verzerrungen am Schubfeld

Lokale Wegmessung

Die Messung der lokalen Durchbiegung zur Bestimmung des E-Moduls erfolgte in der Mitte des Prüfkörpers über eine Länge von 750 mm (5b). Aufgrund abweichender Anordnung der Kipphalterungen, mussten die Messgestänge bei Serie 1 und 2 unterschiedlich angebracht werden.



Abbildung 88: links: lokale Wegmessung Serie 1; rechts: lokale Wegmessung Serie 2

Kipphalterungen

Wie bereits erwähnt, waren aufgrund des großen Dicke zu Höhe - Verhältnisses Kipphalterungen nötig um Biegedrillknicken zu verhindern. Nach ÖNORM EN 408, 2012 müssen diese so ausgelegt sein, dass eine weitestgehend reibungsfreie Durchbiegung des Prüfkörpers möglich ist. Bei den Prüfungen der Serie 1 wurden diese jeweils an den Lasteinleitungsstellen sowie den Auflagern angebracht (Abbildung 89). Da der Abstand der Kipphalterungen an der Serie 1 bereits grenzwertig war, wurden für die 2. Prüferie neue Kipphalterungen angefertigt. Dadurch konnte der Abstand verringert werden, die Messung der lokalen Durchbiegung aber trotzdem über eine Länge von 750 mm realisiert werden. Des Weiteren erlaubte die Ausführung mit Rollen eine nahezu reibungsfreie Durchbiegung.



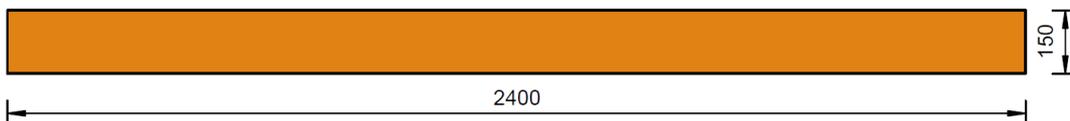
Abbildung 89: links: Kipphalterungen der Serie 1; rechts: Kipphalterungen der Serie 2

6-6.3 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE UND HERSTELLUNG

6-6.3.1 Prüfkörpergeometrie

Nach ÖNORM EN 408, 2012 ist eine Mindestlänge der Auflagerpunkte von $15h$ gefordert. Somit ergibt sich bei einer Höhe von 150 mm eine Mindestlänge von 2250 mm des Prüfkörpers. Diese Prüfungen dienen rein der Ermittlung des Schubmoduls sowie des E-Moduls und wurden somit nur bis zu 50 % der errechneten Maximallast belastet, welche anhand von Werten nach Kollmann (1951) von fehlerfreiem Holz bestimmt wurde. Dadurch konnten die Prüfkörper zusätzlich für Zugprüfungen verwendet werden. Um die dort geforderten Abmessungen einhalten zu können, wurden ebenfalls die Abmessungen 2400 mm x 150 mm gewählt. Die Aufbauten des Furnierschichtholzes unterscheiden sich je nach Prüfserie und sind in Abbildung 90 dargestellt.

Draufsicht



Seitenansicht

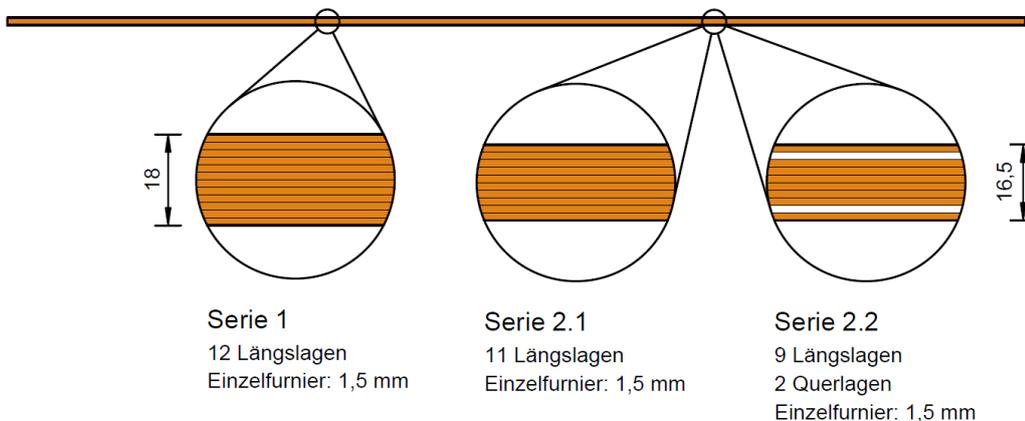


Abbildung 90: Abmessungen der Prüfkörper für die Hochkantbiegeprüfungen, Maße in mm

6-6.3.2 Prüfkörperbezeichnung

Die Bezeichnung der Prüfkörper setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Beispiel:

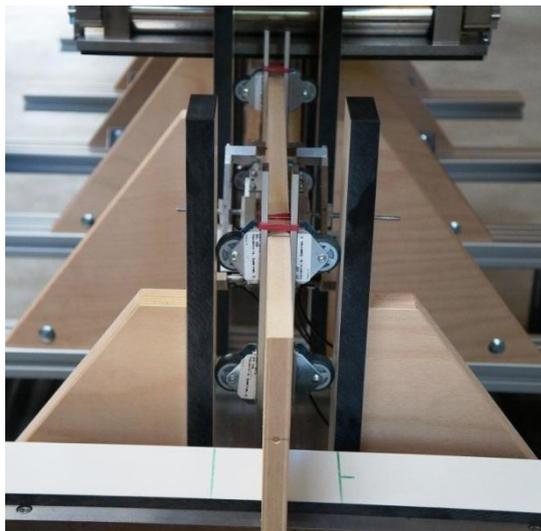
- Bi_12n_01
 - Bu_11n_QL_01
- Bi: Holzart (Bi..Birke; Bu..Buche; Fi..Fichte)
12n: Schichtanzahl (12 Schichten)
QL: Querlagen vorhanden (ja, nein)
01: fortlaufende Nummer

6-6.3.3 Herstellung

Die Herstellung erfolgte analog zu jener in Kapitel 6-5.3.3 beschrieben.

6-6.4 PRÜFABLAUF

Die Prüfungen erfolgten an einer Zwick Universal 250 – Prüfmaschine. Vor dem Einbau des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wurde der Prüfkörper beschriftet, um die spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu erleichtern. Nach der Laufzeitmessung mittels Ultraschall zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls, wurden alle für die Messungen benötigten Punkte angezeichnet sowie erforderliche Bohrungen durchgeführt. Nachdem der Prüfkörper mittig in die Maschine eingebracht wurde, erfolgte die Befestigung der in Kapitel 6-6.2 beschriebenen Kipphalterungen. Die lokale Wegmessung erfolgte beidseitig über ein Gestänge, welches an zwei Nägeln mit einem Abstand von 750 mm aufgehängt wurde. Die Verzerrung des Schubfeldes wurde mittels DD1 Messinstrumenten gemessen, welche durch eine Schraube am Prüfkörper befestigt waren (Abbildung 91).



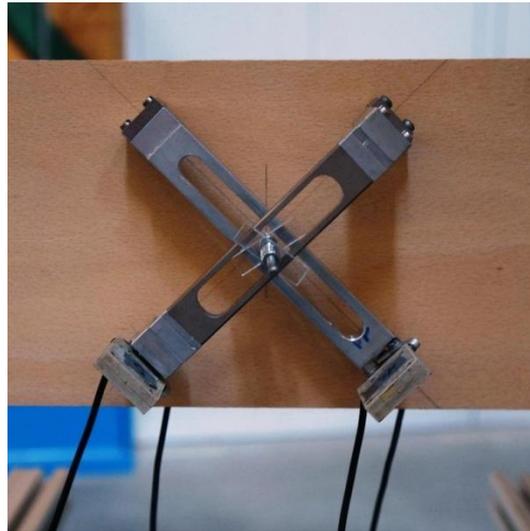
Anbringen der Kipphalterung



Befestigung der lokalen Wegaufnehmer



Wegaufnehmer WA 10



Schubfeld

Abbildung 91: Anbringung von Kipphalterungen und Messinstrumenten

Die Belastung erfolgte weggesteuert und wurde mit einer Hysterese durchgeführt. Als Belastungsgeschwindigkeit für die Belastung wurde $v = 5 \text{ mm/min}$ gewählt, die Entlastung mit $v = 0 \text{ mm/min}$. In der ersten Belastungsphase wurde auf 7 kN belastet und auf $1,4 \text{ kN}$ entlastet. In der zweiten Belastungsphase wurde erneut auf 7 kN belastet (Abbildung 92).

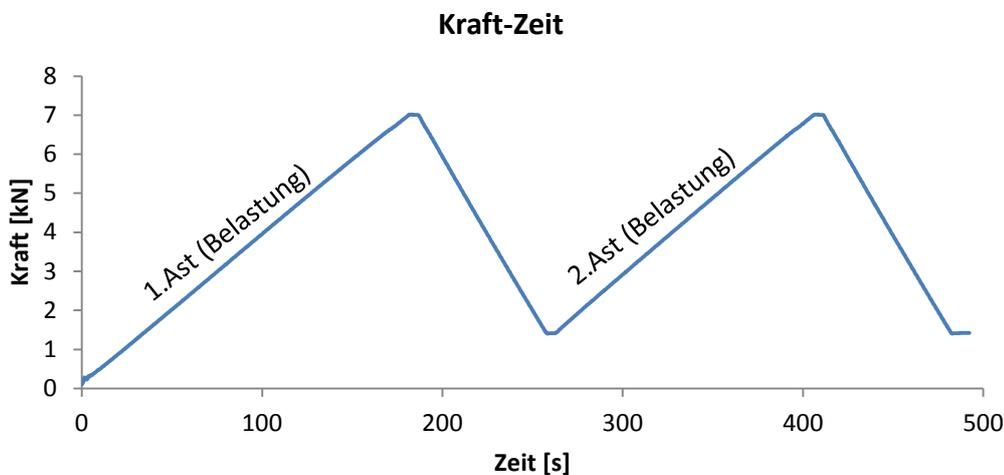


Abbildung 92: Beispiel einer typischen Hystereseschleife

6-6.5 ERMITTLUNG DES SCHUBMODULS

Nach ÖNORM EN 408, 2012 sind die Verformungen mit einer Messunsicherheit von 1 % zu bestimmen. Weiters muss die Belastungseinrichtung die aufgebrachte Last mit einer maximalen Unsicherheit von 1 % ermitteln. Für die Verformungen der Diagonalen des Schubfeldes ist der Mittelwert der absoluten Messergebnisse für beide Diagonalen je Seite zu ermitteln.

Bestimmung des Schubmoduls

Die Bestimmung des Schubmoduls erfolgte anhand Bogensperger (2012) für einen Rechteckquerschnitt und basiert auf den im folgenden dargestellten Gleichungen. Zur besseren Übersicht sind die Bezeichnungen in Abbildung 93 dargestellt.

$$R = \frac{|d_1| + |d_2|}{2} \quad (6.5)$$

R mittlere Längenänderung der Diagonalen [mm]

d_1, d_2 Länge der Diagonalen [mm]

$$\gamma = \frac{R \cdot \sqrt{2}}{h_0} \quad (6.6)$$

γ Schubverzerrung [-]

h_0 Seitenlänge des Schubfeldes [mm]

R mittlere Längenänderung der Diagonalen [mm]

$$\tau = \frac{V}{b \cdot h} \quad (6.7)$$

τ wirkende Schubspannung [N/mm²]

V Querkraft [N]

b, h Querschnittsabmessungen des Prüfkörpers [mm]

Da die Schubspannung und somit auch die Schubverzerrung bei Querkraftbiegung nicht konstant über den Querschnitt verteilt ist, muss der Schubmodul um den Korrekturfaktor α korrigiert werden. Dieser bestimmt sich aus dem Verhältnis von mittlerer Schubgleitung im Schubfeld zur Nenn-Schubgleitung des Querschnitts.

$$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{h_0^2}{2 \cdot h^2} \quad (6.8)$$

α Korrekturfaktor für einen Rechteckquerschnitt [-]

h_0 Seitenlänge des Schubfeldes [mm]

h Gesamthöhe des Prüfkörpers [mm]

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \alpha \quad (6.9)$$

G Schubmodul [N/mm²]

τ wirkende Schubspannung [N/mm²]

γ Schubverzerrung [-]

α Korrekturfaktor für einen Rechteckquerschnitt [-]

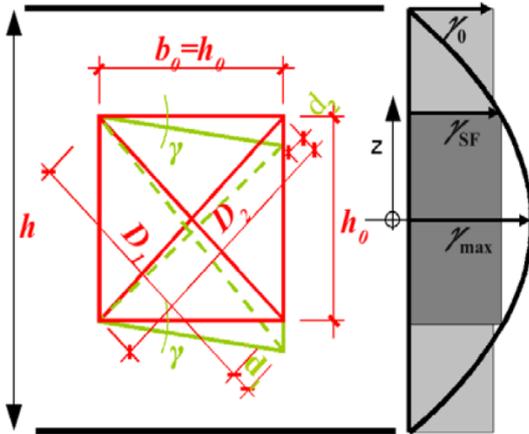


Abbildung 93: Auswertung Schubfeld (Bogensperger, 2012)

6-6.6 ERMITTLUNG DES E-MODULS AUS HOCHKANTBIEGUNG

Nach ÖNORM EN 408, 2012 ist die Verformung mit einer Genauigkeit von 1 % zu ermitteln, sowie die aufgebrachte Last mit einer max. Messunsicherheit von 1 % anzugeben. Mit dem Mittelwert der Verformungen w der beidseitig angebrachten Messinstrumente ist eine Last-Verformungskurve zu zeichnen und im Kurvenabschnitt zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ eine Regressionsanalyse durchzuführen. Hierbei sollte ein Regressionskoeffizient mit einer Genauigkeit von 0,999 erreicht werden.

Bestimmung des E-Moduls

Der E-Modul aus der Hochkantbiegeprüfung wurde nach Gleichung 6.10 berechnet.

$$E_m = \frac{a \cdot l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 \cdot I (w_2 - w_1)} \quad (6.10)$$

- E_m E-Modul aus Hochkantbiegeprüfung [N/mm²]
- a Abstand zwischen den Krafteinleitungsstellen [mm]
- l_1 Referenzlänge der lokalen Verformungsmessung [mm]
- $F_2 - F_1$ Zunahme der Kraft zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ [N]
- $w_2 - w_1$ Zunahme der Verformung entsprechend $F_2 - F_1$
- I Trägheitsmoment des Prüfkörperquerschnitts [mm²]

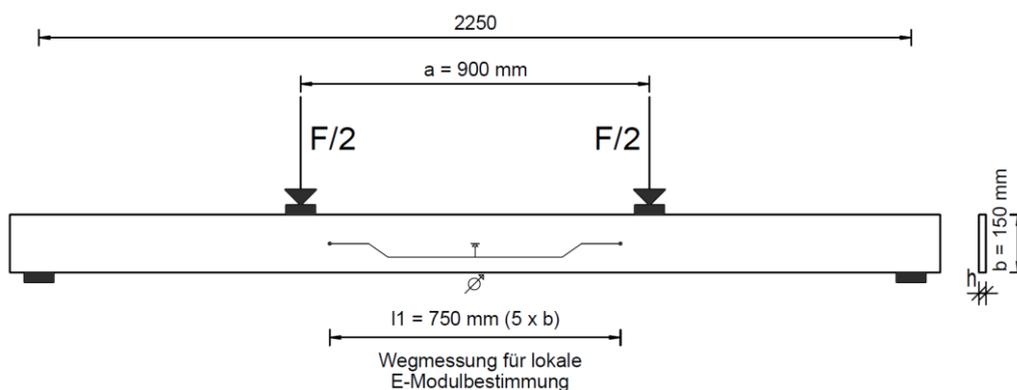


Abbildung 94: Abmessungen zur Bestimmung des E-Moduls

6-7 SCHUBVERSUCHE NACH EHRHART (2014)

6-7.1 ALLGEMEIN

Ziel dieser Versuche war es, die Scherfestigkeit in Faserrichtung (alle Schichten parallel) bzw. die Rollschubfestigkeit (Furnierschichtholz mit Querlagen) an Furnierschichtholz zu ermitteln. Des Weiteren wurde der Schubmodul an sämtlichen Prüfkörpern bestimmt. Die Prüfungen erfolgten in Anlehnung an Ehrhart (2014), wobei diese ähnlich zu jener nach ÖNORM EN 408, 2012 sind. Beim Schichtaufbau der Prüfkörper wurde zwischen einem Aufbau rein mit Längslagen, sowie mit Querlagen in unterschiedlichen Schichten unterschieden (Tabelle 17).

Tabelle 17: Schichtaufbau der Schubprüfungen nach Ehrhart (2014)

	Aufbau 1	Aufbau 2	Aufbau 3	Aufbau 4
Anzahl	6	6	6	6
Holzart	Buche	Buche	Buche	Buche
Schichtdicke [mm]	1,5	1,5	1,5	1,5
Schichtanzahl	11	11	11	11
Gesamtdicke [mm]	16,5	16,5	16,5	16,5
Anzahl Querlagen	nein	ja	ja	ja
Schichtnr.; Querlagen	-	2, 10	3, 9	2, 6, 10

6-7.2 PRÜFKONFIGURATION UND MESSEINRICHTUNG

Aufgrund der unterschiedlichen Aufbauten und sich dadurch unterscheidenden Festigkeiten, gab es zwei Prüfkonfigurationen. Für den Aufbau, welcher nur aus Längslagen bestand, musste die Lasteinleitung aufgrund der hohen zu erwartenden Lasten, über Stahllaschen erfolgen (Abbildung 95). Da bei den Aufbauten mit Querlagen ein Rollschubversagen erwartet wurde, konnten die Laschen aus Buchen- bzw. Eschenholz ausgeführt werden (Abbildung 96). Die Lasteinleitung erfolgte an der Unterseite quasi starr über eine Auflagerplatte und an der Oberseite gelenkig, wobei diese nach Aufbringen einer Vorlast von 300 N/mm² gesperrt wurde. Die Relativverschiebung, welche zur Ermittlung des Schubmoduls notwendig ist, wurde durch beidseitig an den Laschen angebrachte Wegmesser (WA 10, Genauigkeit von 1/100 mm) aufgezeichnet.

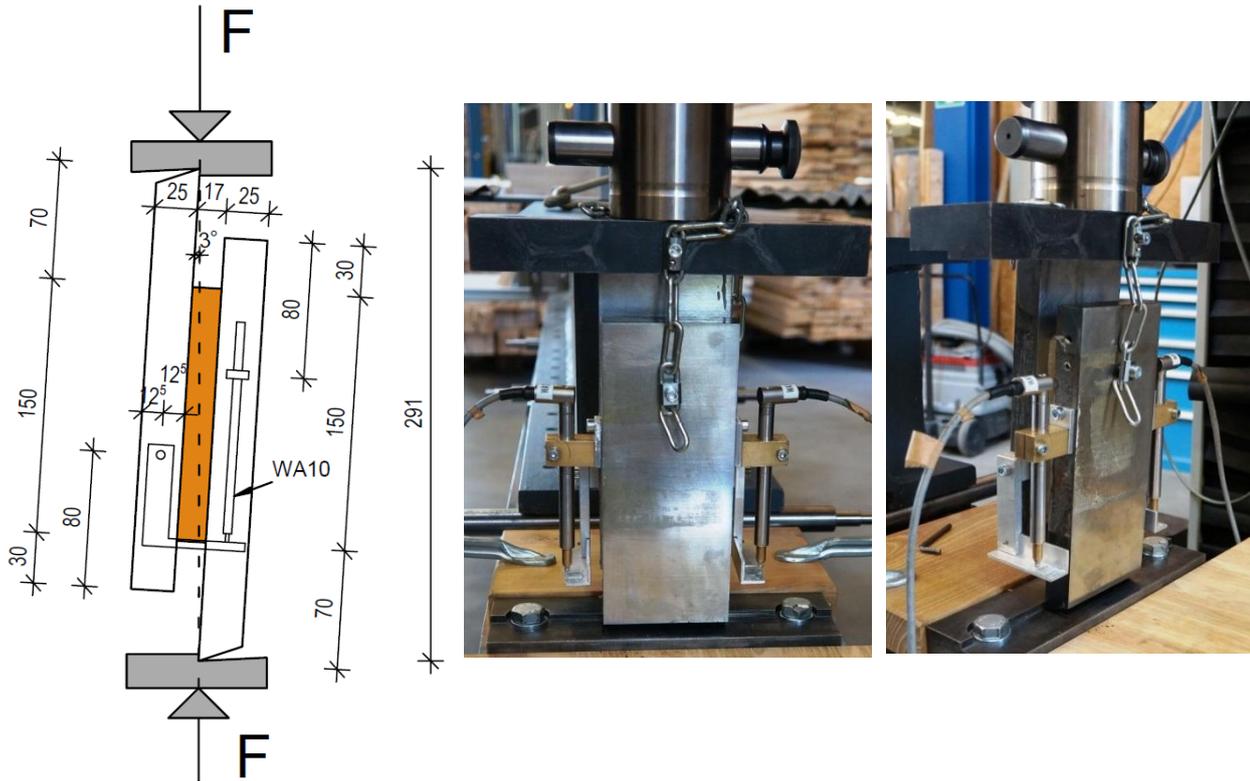


Abbildung 95: Prüfkongfiguration für Prüfkörper ohne Querlagen, Laschen aus Stahl

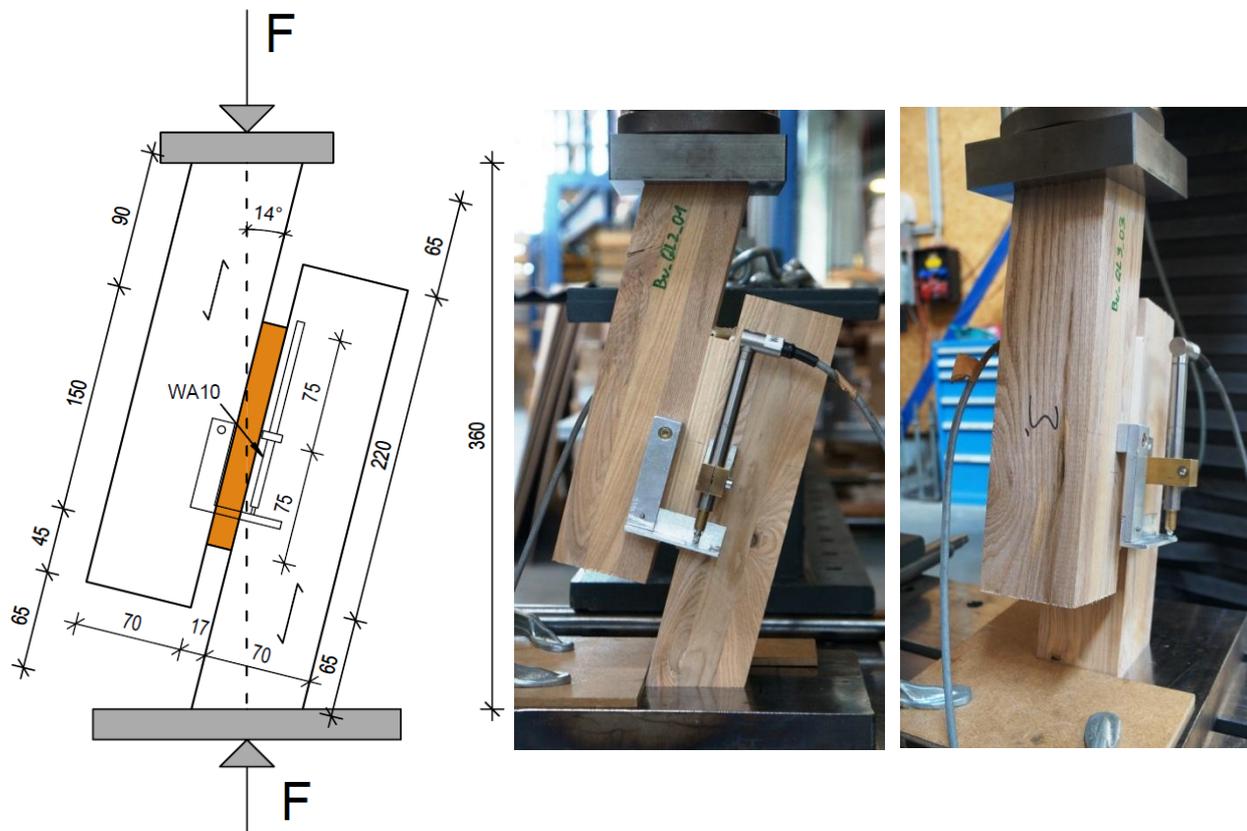


Abbildung 96: Prüfkongfiguration für Prüfkörper mit Querlagen, Laschen aus Holz

6-7.3 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE UND HERSTELLUNG

6-7.3.1 Prüfkörpergeometrie

Die Abmessungen des Prüfkörpers wurden mit einer Länge $L = 150$ mm und einer Breite $B = 70$ mm gewählt. Durch einen 11-schichtigen Aufbau aus 1,5 mm dicken Einzelfurnieren ergab sich eine durchschnittliche Dicke von ~ 17 mm (Abbildung 97). Die Länge von 150 mm ergab sich, um die bei sämtlichen anderen Prüfungen gewählte Referenzlänge einhalten zu können. Die Breite von 70 mm wurde anhand einer Abschätzung der zu erwartenden Maximallast mit Werten von fehlerfreiem Vollholz nach Kollmann (1951) gewählt, um die notwendigen Kräfte mit der zu Verfügung stehenden Prüfmaschine aufbringen zu können. Der Schichtaufbau und die Anordnung der Lagen ist in Abbildung 97 und Abbildung 98 dargestellt.

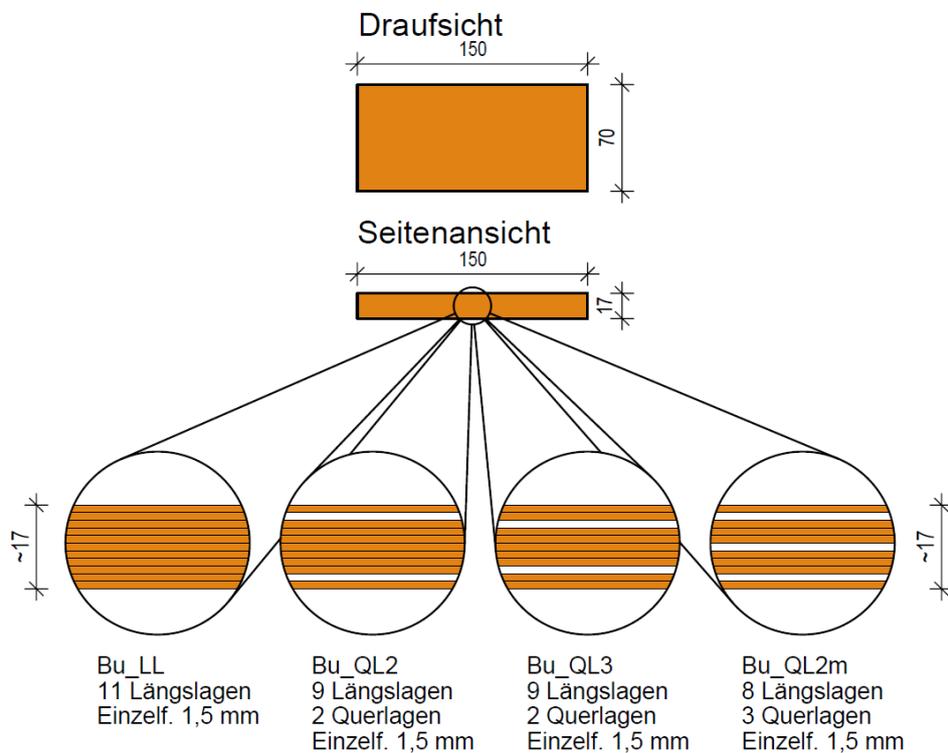


Abbildung 97: Prüfkörpergeometrie der Schubprüfungen nach Ehrhart (2014)



Abbildung 98: Schichtaufbau; v.l.n.r.: Bu_LL, Bu_QL2, BU_QL3, Bu_QL2m

6-7.3.2 Prüfkörperbezeichnung

Die Bezeichnung der Prüfkörper setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Beispiel:

- Bu_QL2_01
 - Bu: Buche
 - QL2: Schichtaufbau (QL2...Querlagen in 2. bzw. 10. Schicht; QL3... Querlage in 3. bzw. 9. Schicht; QL2m...Querlage in 2., 10. und 7. Schicht)
 - 01: fortlaufende Nummer

6-7.3.3 Herstellen des Systemprüfkörpers

Die Herstellung der Systemprüfkörper gliederte sich in 2 Arbeitsschritte:

- Herstellung des Prüfkörpers selbst, welcher abgesehen vom Schichtaufbau für alle Prüfungen ident war (Abbildung 99, grün).
- Herstellung des Systemprüfkörpers, wobei bei den Laschen, wie bereits erwähnt, zwei unterschiedliche Ausführungen hergestellt werden mussten (Abbildung 99, rot).

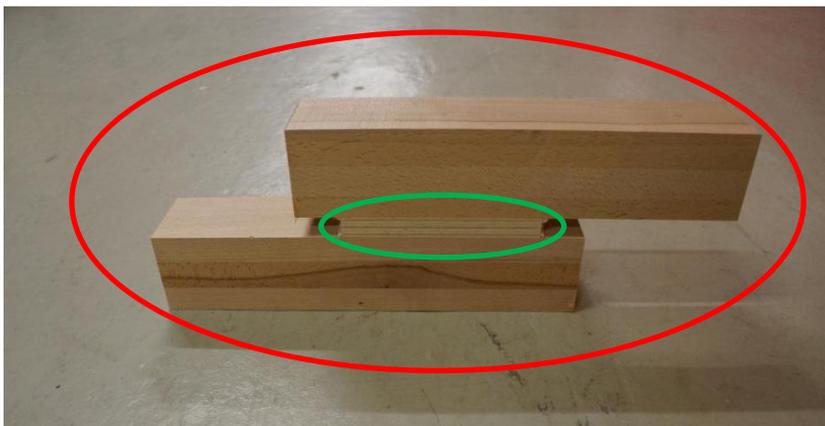


Abbildung 99: Unterschied zwischen Prüfkörper (grün) und Systemprüfkörper (rot)

Schritt 1: Herstellung der Prüfkörper

Ausgangsmaterialien für die Prüfkörperherstellung waren 1,5 mm dicke Buchenfurniere, welche, wie in Kapitel 6-3.1 beschrieben, im Furnierwerk geschält wurden. Um eine einheitliche Holzfeuchte zu erreichen, lagerten diese vor der Weiterverarbeitung in einer Klimakammer bei Normklima (Temperatur: 20 °C; Luftfeuchtigkeit: 65 %). Zu jedem Schichtaufbau wurden zwei Furnierschichtplatten mit den Abmessungen von 400 mm auf 200 mm hergestellt. Die Verklebung erfolgte mit einem Melaminharzklebstoff (MUF-Klebstoff, Kapitel 6-3.2) bei einem Mischungsverhältnis von Harz zu Härter von 100:30. Der durchschnittliche Leimbedarf betrug in etwa 260 - 300 g/m². Die mit Klebstoff beaufschlagten Schichtpakete wurden anschließend bei einem Pressdruck von 0,8 N/mm² verpresst. Aus diesen Platten wurden in weiterer Folge jeweils drei Prüfkörper mit den Abmessungen von 150 mm auf 90 mm herausgeschnitten. Da eine Feuchtebestimmung am fertigen Systemprüfkörper nicht mehr möglich war, entnahm man ein zusätzliches Stück, um in weiterer Folge die Feuchtigkeit bestimmen zu können.

Schritt 2: Herstellung des Systemprüfkörpers

Holzlaschen: Die Laschen bestanden, um die notwendigen Festigkeitswerte zu erreichen, aus Buchen- bzw. Eschenholz. Um die folgenden Arbeitsschritte zu erleichtern, wurden diese anfangs mit deutlich größeren Abmessungen als am Ende benötigt hergestellt. Im ersten Schritt mussten die gehobelten Bretter verklebt werden, um die nötigen Abmessungen zu erreichen. In weiterer Folge wurde der Prüfkörper mittels PU-Kleber bei einem Pressdruck von 1 N/mm^2 mit den Laschen verklebt. Zur endgültigen Fertigstellung wurden die Prüfkörper auf eine Breite von 70 mm geschnitten, die überstehenden Laschen gekappt und auf den Winkel von 14° gebracht. (Abbildung 100)



Prüfkörper vor der Verklebung mit den Laschen



Kappen des Laschenüberstandes am Systemprüfkörper



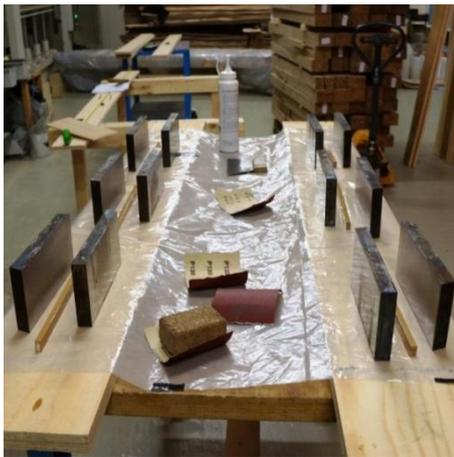
Herstellen des 14° Winkels



Fertiger Systemprüfkörper

Abbildung 100: Herstellung des Systemprüfkörpers, Laschen aus Holz

Stahllaschen: Im ersten Schritt musste die glatte Oberfläche der Stahllaschen mit Schleifpapier aufgeraut werden und mit Alkohol fett- und staubfrei gemacht werden. Die Verklebung erfolgte mit einem PU-Kleber (siehe Kapitel 6-3.2), wobei der nötige Pressdruck mit Hilfe von Schraubzwingen aufgebracht wurde. (Abbildung 101)



Vorbereitung der Stahllaschen



Verkleben des Prüfkörpers mit den Stahllaschen

Abbildung 101: Herstellung des Systemprüfkörpers, Laschen aus Stahl

6-7.4 PRÜFABLAUF

Der Prüfablauf der beiden Prüfkfigurationen unterscheidet sich nur in wenigen Handgriffen und wird daher nicht gesondert angeführt. Etwaige Unterschiede werden erwähnt. Die Prüfungen erfolgten an einer Zwick Universal 250 – Prüfmaschine. Vor dem Einbau des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wurde der Prüfkörper beschriftet, um die spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu ermöglichen. Die Befestigung der beidseitig angebrachten Wegsensoren erfolgte derart, dass jeweils die Aluminium – Winkel an der der Lasteinbringung dienenden oberen Lasche erfolgte. Dies war notwendig, um bei frühzeitigen Versagen eine Beschädigung des Messinstrumentes zu verhindern. Die Befestigung der Halterungen erfolgte mit 3,0 mm x 20 mm Holzschrauben, bzw. direkt mithilfe der vorhandenen Gewindegänge in den Metalllaschen, möglichst nahe am Prüfkörper um störende Einflüsse zu minimieren (Abstand der Schrauben von der Klebefuge zwischen Prüfkörper und Laschen: ~5 mm). Angebrachte Leithölzchen stellten sicher, dass der Prüfkörper zentrisch in der Prüfmaschine gelagert ist, um somit den Eintrag von unerwünschten Zusatzmomenten zu verhindern (Abbildung 102, Mitte). Bei den Prüfungen mit Stahllaschen war dies durch die Einkerbung in Last- und Wiederlagerplatte gewährleistet. Im nächsten Schritt wurden die Wegaufnehmer angebracht und eine Vorlast von 300 N aufgebracht. Dies war nötig um der gelenkig gelagerten Lasteinleitungsplatte die Möglichkeit zu geben, sich an die Lasche anzupassen. Nach Erreichen der Vorlast wurde das Gelenk gesperrt und die Prüfung mit konstanter Geschwindigkeit weggesteuert fortgesetzt. (Abbildung 102)



Abbildung 102: links: anbringen der Halterung für die Wegaufnehmer; Mitte: Leithölzchen zur Zentrierung des Prüfkörpers; rechts: Systemprüfkörper inklusive der Befestigungen für die Messeinrichtung

Die Prüfgeschwindigkeit wurde derart gewählt, dass die Maximallast nach der laut ÖNORM EN 408, 2012 geforderten Zeit von 300 ± 120 s eintrat. Durch die ähnlich zu erwartenden Festigkeiten bei sämtlichen Prüfungen, wurde diese mit 0,4 mm/min gewählt. Bei Erreichen von 50 % der im Vorhinein abgeschätzten Maximallast wurden die Wegaufnehmer abgenommen.

Tabelle 18: Prüfgeschwindigkeit, $0,5 F_{est}$ und durchschnittliche Zeit bis zum Erreichen der Maximallast

Serie	Bu_LL	Bu_QL2	Bu_QL3	Bu_QL2m
v [mm/min]	0,4	0,4	0,4	0,4
$0,5 F_{est}$ [kN]	35	35	35	35
$t_{F_{max,mean}}$ [s]	-	252	292	261

$t_{F_{max,mean}}$... durchschnittlich Dauer bis zum Erreichen der Maximallast

Während jeder Prüfung wurden folgende Parameter aufgezeichnet:

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

6-7.5 ERMITTLUNG DER SCHUBFESTIGKEIT

Die Ermittlung der Schubfestigkeit erfolgte analog zu den Festlegungen in ÖNORM EN 408, 2012 für die Ermittlung der Scherfestigkeit in Faserrichtung und basiert auf der folgenden Gleichung.

Bestimmung der Schubfestigkeit

$$f_v = \frac{F_{\max} \cdot \cos(\alpha)}{l \cdot b} \quad (6.11)$$

f_v	Schubfestigkeit [N/mm ²]
F_{\max}	maximale Prüfkraft [mm]
α	Winkel zwischen Scherfläche und Krafteintrag [°] (14°, außer bei Prüfkörper bestehend aus ausschließlich aus Längslagen)
l	Länge der Scherfläche [mm]
b	Breite der Scherfläche [mm]

6-7.6 ERMITTLUNG DES SCHUBMODULS

Zur Ermittlung des Schubmoduls G wurde eine Regressionsanalyse im Bereich zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ durchgeführt. Der Schubmodul ergibt sich aus folgender Gleichung und ist der Quotient aus Schubspannung τ und Schubverzerrung γ .

Bestimmung des Schubmoduls

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\frac{F \cdot \cos(\alpha)}{l \cdot b}}{\frac{d}{l}} = \frac{F \cdot \cos(\alpha) \cdot d}{l \cdot b \cdot w} \quad (6.12)$$

G	Schubmodul [N/mm ²]
τ	Schubspannung [N/mm ²]
γ	Verzerrungswinkel [-]
F	Prüfkraft [N]
α	Winkel zwischen Scherfläche und Krafteintrag [°] (14°, außer bei Prüfkörper bestehend aus ausschließlich aus Längslagen)
d	Brettstärke [mm]
l	Länge der Scherfläche [mm]
b	Breite der Scherfläche [mm]
w	Verschiebung parallel zur Scherfuge [mm]

6-8 SCHUBVERSUCH NACH HIRSCHMANN (2011)

6-8.1 ALLGEMEIN

Ziel dieser Versuche war die Ermittlung der Scherfestigkeit in Faserrichtung der Längslagen an Furnierschichtholz. Die Prüfungen erfolgten in Anlehnung an Hirschmann (2011), welcher eine etwas abgeänderte Prüfkongfiguration zu jener in ÖNORM EN 789, 2005 geregelten, darstellt. Der Vorteil dieser Prüfkongfiguration ist der Entfall der seitlichen Abstützungen und somit ein einfacher Prüfaufbau. Beim Schichtaufbau der Prüfkörper wurde zwischen einem Aufbau mit elf Längslagen, sowie mit neun Längslagen und zwei Querlagen unterschieden (Tabelle 19).

Tabelle 19: Schichtaufbau der Schubprüfungen nach Hirschmann (2011)

	Aufbau 1	Aufbau 2
Anzahl	6	6
Holzart	Buche	Buche
Schichtdicke [mm]	1,5	1,5
Schichtanzahl	11	11
Schichtnr. Querlagen	-	2; 10

6-8.2 PRÜFKONFIGURATION UND MESSEINRICHTUNG

Die Prüfkongfiguration ist analog zu jener von Hirschmann (2011) (Abbildung 103). Die Lasteinleitung erfolgte an der Unterseite und an der Oberseite starr. Die Relativverschiebung, wurde durch beidseitig an den Laschen angebrachte Wegmesser (WA 10, Genauigkeit von 1/100 mm) aufgezeichnet.

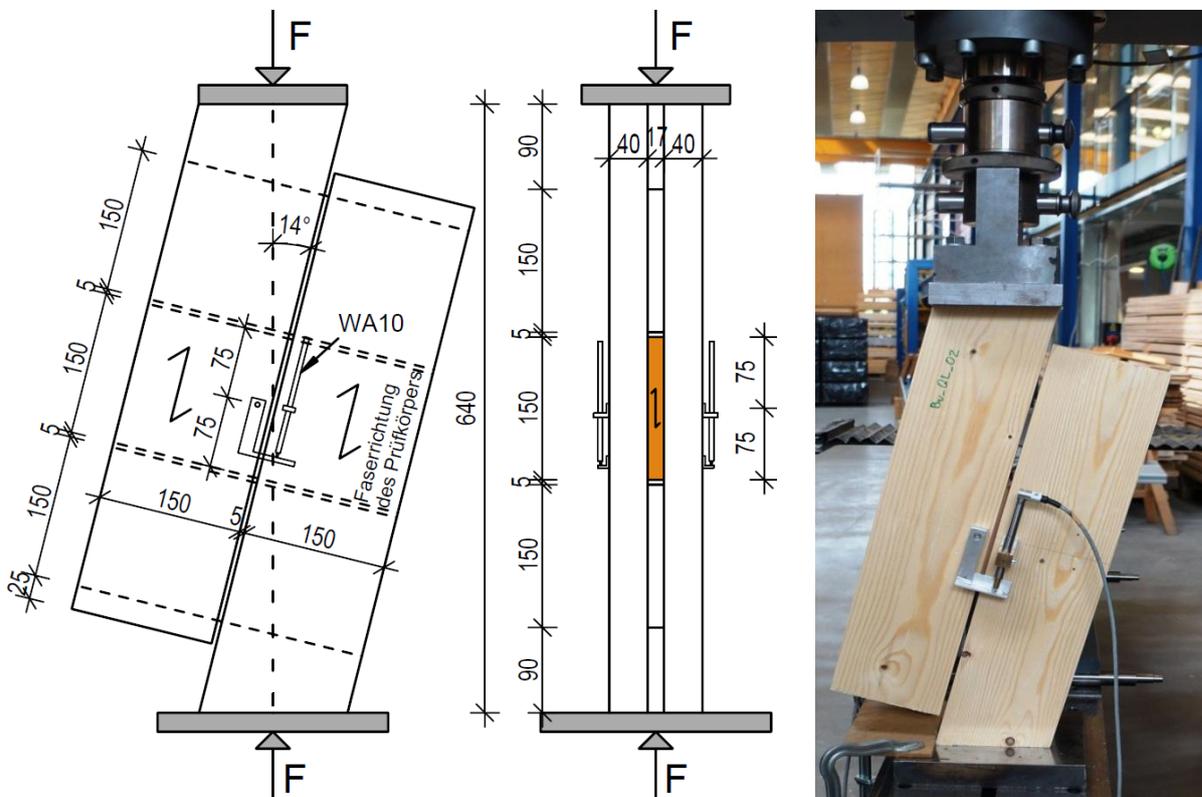


Abbildung 103: Prüfkongfiguration der Schubprüfungen nach Hirschmann (2011)

6-8.3 PRÜFKÖRPERGEOMETRIE UND HERSTELLUNG

6-8.3.1 Prüfkörpergeometrie

Die Abmessungen des Prüfkörpers wurden mit der Länge $L = 150 \text{ mm}$ und der Breite $B = 305 \text{ mm}$ gewählt, sowie einer durch den Schichtaufbau bedingten Dicke von $\sim 17 \text{ mm}$ (Abbildung 104). Diese ergaben sich durch die Referenzbreite von 150 mm und die gewählte Prüfkfiguration. Eine Darstellung des Schichtaufbaus und der Anordnung der Lagen ist in Abbildung 104 dargestellt.

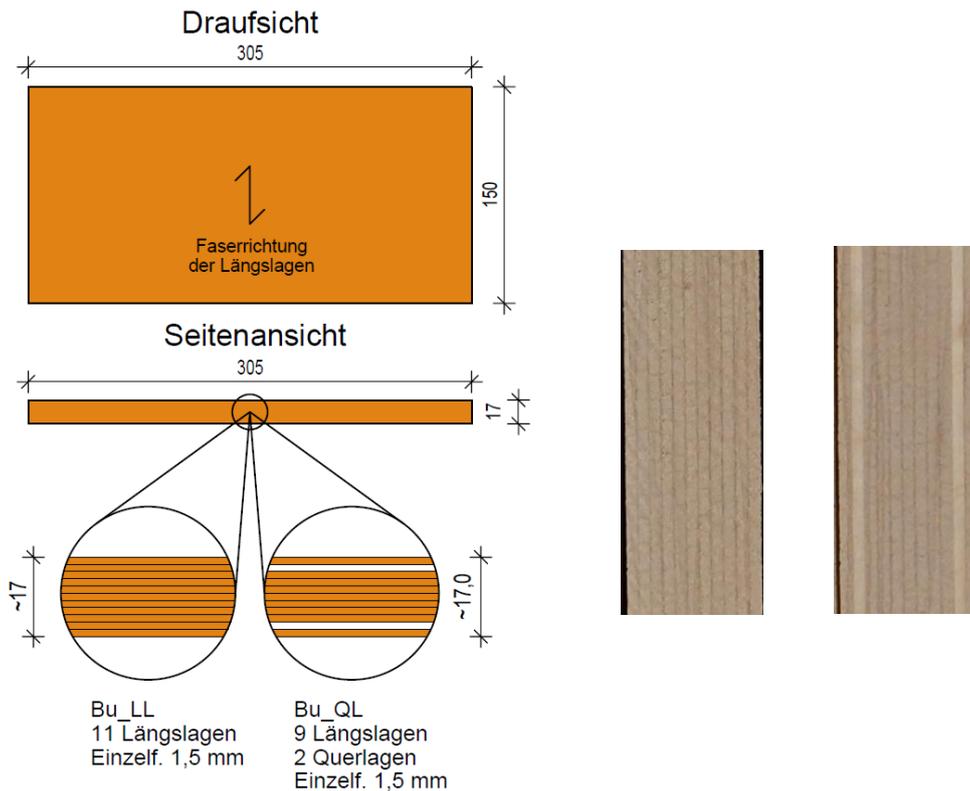


Abbildung 104: links: Prüfkörpergeometrie der Schubprüfungen nach Hirschmann; rechts: Schichtaufbau, ohne Querlagen und mit Querlagen

6-8.3.2 Prüfkörperbezeichnung

Die Bezeichnung der Prüfkörper setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen.

Beispiel:

- Bu_QL_01
- Bu_LL_01

Bu: Buche

QL, LL: Schichtaufbau (QL...2 Querlagen; LL... nur Längslagen)

01: fortlaufende Nummer

6-8.3.3 Herstellen des Systemprüfkörpers

Die Herstellung der Systemprüfkörper gliederte sich in 2 Arbeitsschritte:

- Herstellung des Prüfkörpers selbst, welche sich im Aufbau unterschieden (Abbildung 99, grün).
- Herstellung des Systemprüfkörpers, welcher die Verklebung des Prüfkörpers mit den Laschen beinhaltet (Abbildung 99, grün).

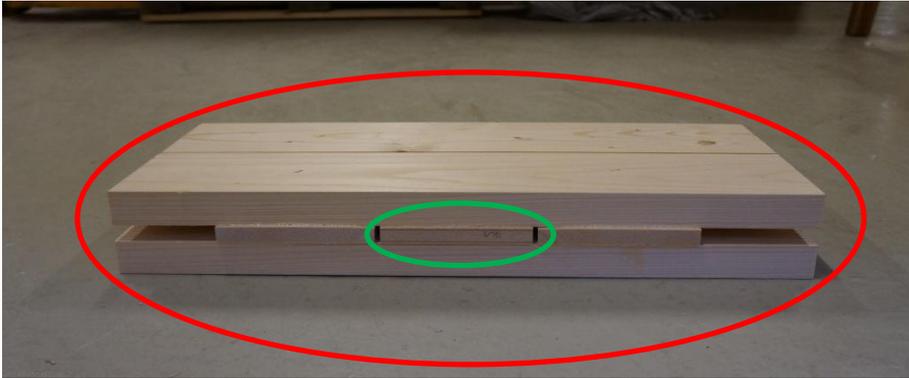


Abbildung 105: Unterschied zwischen Prüfkörper (grün) und Systemprüfkörper (rot)

Schritt 1: Herstellung der Prüfkörper

Ausgangsmaterialien für die Prüfkörperherstellung waren 1,5 mm dicke Buchenfurniere, welche wie in Kapitel 6-3.1 beschrieben, im Furnierwerk geschält wurden. Um eine einheitliche Holzfeuchte zu erreichen, lagerten diese vor der Weiterverarbeitung in einer Klimakammer bei Normklima (Temperatur: 20 °C; Luftfeuchtigkeit: 65 %). Die Einzelfurniere wurden anfangs zur leichteren Verarbeitung mit einer Übergröße zugeschnitten und mit einem Melaminharzklebstoff (MUF-Klebstoff, Kapitel 6-3.2) bei einem Mischungsverhältnis von Harz zu Härter von 100:30 verklebt. Der durchschnittliche Leimbedarf betrug 260 - 300 g/m². Die Aushärtung erfolgte bei einem Pressdruck von 0,8 N/mm². Nach dem Verpressen und Zuschneiden auf die gewünschte Geometrie, entnahm man zusätzlich jeweils eine Darrprobe, da dies im Anschluss an die Prüfung nicht mehr möglich ist. Je Aufbau wurden sechs Prüfkörper gefertigt.

Schritt 2: Herstellung des Systemprüfkörpers

Die Laschen, sowie die als Abstandhalter dienenden Füllhölzer, wurden aus Fichtenholz gefertigt. Um die folgenden Arbeitsschritte zu erleichtern, wurden diese anfangs mit deutlich größeren Abmessungen als am Ende benötigt hergestellt. Die Laschen wurden auf eine Dicke von 40 mm gehobelt, die Füllhölzer auf die durchschnittliche Dicke der Prüfkörper von 17 mm. Der Zusammenbau des Prüfkörpers ist an den folgenden Fotos dargestellt. Die Verklebung der Laschen mit dem Prüfkörper und den Füllhölzern erfolgte mit PU-Klebstoff (siehe Kapitel 6-3.2).



Mit Klebstoff benetzte Laschen werden mit Abstandhaltern in der Box aufgelegt



Einlegen des Prüfkörpers und der Füllhölzer



Fixieren der Laschen



Pressen des Systemprüfkörpers



Herstellen des 14° Winkels



Durchtrennen der Füllhölzer



Fertiger Systemprüfkörper

6-8.4 PRÜFABLAUF

Die Prüfungen erfolgten an einer Zwick Universal 250 – Prüfmaschine. Vor dem Einbau des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wurde der Prüfkörper beschriftet, um die spätere Zuordnung und fotografische Dokumentation zu erleichtern. Die Befestigung der beidseitig angebrachten Wegsensoren erfolgte derart, dass jeweils der Aluminium – Winkel an der der Lasteinbringung dienenden oberen Lasche erfolgte, um bei frühzeitigen Versagen eine Beschädigung der Messinstrumente zu verhindern. Die Befestigung der Halterungen erfolgte mit 3,0 mm x 20 mm Holzschrauben, möglichst nahe am Prüfkörper um störende

Einflüsse zu minimieren (Abstand der Schrauben von der Klebefuge zwischen Prüfkörper und Laschen: ~5 mm). Angebrachte Leithölzchen stellen sicher, dass der Prüfkörper zentrisch in der Prüfmaschine eingebaut ist. Die Kraftaufbringung erfolgte weggesteuert.



Abbildung 106: links: anbringen der Halterung für die Wegaufnehmer; Mitte: Leithölzchen zur Zentrierung des Prüfkörpers; rechts: Seitenansicht des Systemprüfkörpers

Die Prüfgeschwindigkeit wurde derart gewählt, dass die Maximallast nach der laut ÖNORM EN 789, 2005 geforderten Zeit von 300 ± 120 s eintrat. Nach Erreichen von 50 % der im Vorhinein abgeschätzten Maximallast wurden die Wegaufnehmer abgenommen (Tabelle 20).

Tabelle 20: Prüfgeschwindigkeit, $0,5 F_{est}$ und durchschnittliche Zeit bis zum Erreichen der Maximallast

Serie	Bu_LL	Bu_QL
v [mm/min]	0,5	0,5
$0,5 F_{est}$ [kN]	20	20
$t_{F_{max,mean}}$ [s]	238	329

$t_{F_{max,mean}}$...durchsch. Dauer bis zum Erreichen der Maximallast

Während jeder Prüfung wurden folgende Parameter aufgezeichnet:

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

6-8.5 ERMITTLUNG DER SCHUBFESTIGKEIT

Die Ermittlung der Schubfestigkeit erfolgte analog zu Kapitel 6-7.5.

KAPITEL 1: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Nachfolgend werden die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen dargestellt, diskutiert und bewertet. Zunächst werden die Resultate der einzelnen Prüfserien getrennt angeführt und anschließend analysiert. Hierin wird unterschieden zwischen den Materialkenngrößen (Rohdichte und Holzfeuchte) und mechanischen Kenngrößen (Festigkeit, Steifigkeit). Neben einer statistischen Auswertung der unterschiedlichen Datensätze, werden beobachtete Bruchbilder sowie charakteristische Versagensmechanismen angeführt. Abschließend erfolgt eine gesamthafte Betrachtung der Erkenntnisse aus den einzelnen Prüfserien und eine zusammenfassende Beurteilung, die für weiterführende Studien hinsichtlich prüftechnischer Ermittlung von Kenngrößen an Einzelfurnieren und Furnierschichtpaketen von Interesse sind.

1-1 ZUGPRÜFUNG KLEINPROBEN

1-1.1 EINZELERGEBNISSE UND VERSAGENSBILDER

In diesem Abschnitt werden charakteristische Versagensbilder und Einzelergebnisse für die untersuchten Materialkenngrößen Rohdichte ρ , Holzfeuchte u und die mechanischen Kenngrößen Zugfestigkeit $f_{t,0}$ und Elastizitätsmodul $E_{t,0}$ in Faserrichtung der Prüfserien mit einschichtigem Aufbau (Z_G und Z_S) und dreischichtigem Aufbau (Z3_G, Z3_S, Z3_U) angeführt und im Anschluss diskutiert.

1-1.1.1 1-schichtig

In Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Zugprüfungen an Kleinproben mit 1-schichtigem Aufbau dargestellt. Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte jeweils an vier der fünf Prüfkörper. Die Bestimmung von Holzfeuchte und Rohdichte erfolgte an zwei Materialproben desselben Ausgangsmaterials.

Tabelle 21: Einzelergebnisse; 1-schichtig ohne Stoß

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]
Z_G_01	177,0	-		
Z_G_02	143,2	16.464		
Z_G_03	160,9	17.181	610 ¹⁾	9,6 ²⁾
Z_G_04	159,8	17.312		
Z_G_05	147,4	15.941		

¹⁾ und ²⁾ ...Rohdichte und Holzfeuchte nur anhand von 2 Proben bestimmt

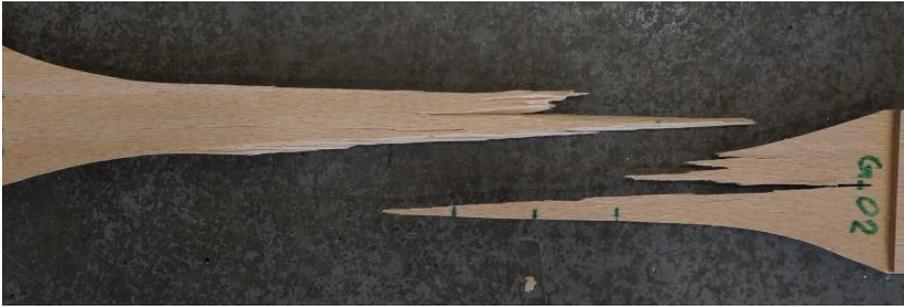


Abbildung 107: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 1-schichtig ohne Stoß

Schäftung

Tabelle 22: Einzelergebnisse; 1-schichtig mit Schäftung

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]
Z_S_01	120,2	-		
Z_S_02	148,8	24.690		
Z_S_03	122,9	22.311	610 ¹⁾	9,6 ²⁾
Z_S_04	76,6	21.057		
Z_S_05	138,8	18.653		

¹⁾ und ²⁾ ... Rohdichte und Holzfeuchte nur anhand von 2 Proben bestimmt



Abbildung 108: typisches Versagensbild; 1-schichtig mit Schäftung

1-1.1.2 Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul in Faserrichtung

In Tabelle 23 sind die jeweils resultierenden statistischen Kenngrößen der ermittelten Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul in Faserrichtung der Prüfserien Z_G (Zugprüfung ohne Schäftung; Referenz) und Z_S (Zugprüfung mit Schäftung) angeführt. Ein Prüfwert der Prüfserie Z_S (Z_S04) wurde nach visueller Begutachtung der Bruchflächen aufgrund einer augenscheinlichen Fehlverklebung von der Auswertung (Tabelle 23, siehe Abbildung 110) ausgenommen.

Bei näherer Betrachtung der Mittelwerte der Zugfestigkeit in Tabelle 23 und in Abbildung 103 ergibt sich ein prozentualer Unterschied (Referenzwert Z_G) zwischen den Prüfserien von ~16 %, wohingegen der E-Modul um rund 30 % höher liegt.

Tabelle 23: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ und E-Modul $E_{t,0}$; 1-schichtiger Aufbau

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]		$E_{t,0}$ [N/mm ²]	
	Z_G	Z_S	Z_G	Z_S
n	5	4 (5)	4	4
max	177,0	148,8	17.312	24.690
min	143,2	120,2	15.941	18.653
mean	157,7	132,7	16.725	21.678
median	159,8	130,8	16.823	21.684
sd	13,3	13,5	642	2.517
CoV [%]	8,4%	10,2%	3,8%	11,6%

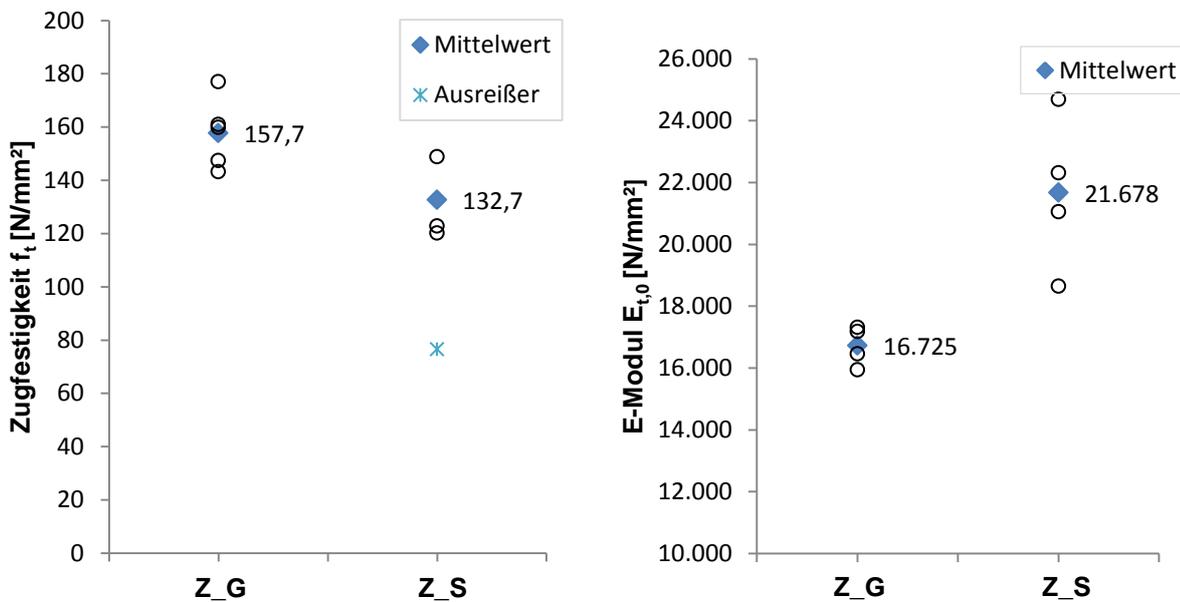


Abbildung 109: links: Zugfestigkeit $f_{t,0}$; rechts: E-Modul $E_{t,0}$

Zugfestigkeit $f_{t,0}$:

Der Abfall der Zugfestigkeit bei den Prüfkörpern mit Schäftung kann auf herstellungsbedingte Einflüsse zurückgeführt werden. Im Übergangsbereich zwischen den geschäfteten Furnierschichten wurde eine Querschnittsverringerung festgestellt (siehe Abbildung 110). Dies führt zu lokalen Spannungsspitzen (Kerbbeanspruchung) und zu örtlichen Spannungsumlagerungen, welche zu einer geringeren Ausnutzung des Tragvermögens führen. Trotzdem liegt der Ausnutzungsgrad (Verhältnis zwischen Zugfestigkeit Z_S und Z_G) der Schäftung in einem erfahrungsgemäß ansprechenden Bereich (0,80 bis 0,90) und ergibt sich auf Mittelwertniveau zu 0,86.

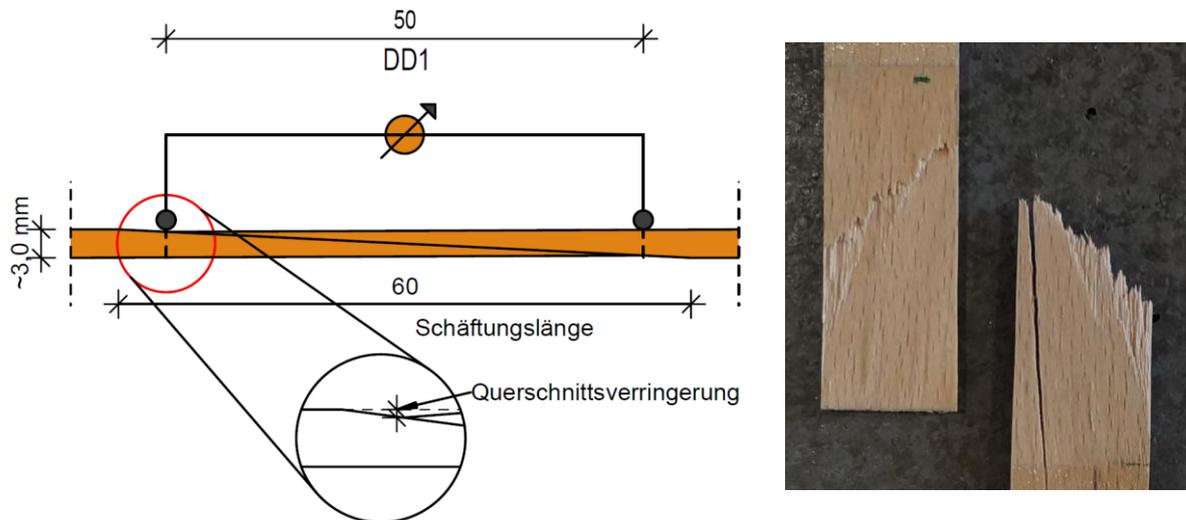


Abbildung 110: links: Querschnittsverringung infolge Schäftung, rot markiert; rechts: Versagen der Klebefuge am Prüfkörper Z_S_04

E-Modul $E_{t,0}$:

Der auffallend hohe Elastizitätsmodul der Prüferserie Z_S deutet auf einen Einfluss des Klebstoffes im Schäftungsbereich hin. Der Messbereich zur Ermittlung der Längenänderung lag direkt im Übergangsbereich der Schäftung, wodurch sich ein Einfluss bei geänderten Materialeigenschaften (Klebstoffanteil im Messquerschnitt) nicht gänzlich auszuschließen ist. Es wird daher für weitere Untersuchungen bei ähnlicher Prüf- und Messkonfiguration zusätzlich eine globale Messung vorgeschlagen, um einen möglichen Effekt feststellen zu können.

Bruchbild:



Abbildung 111: typisches Versagensbild; 1-schichtig mit Schäftung

Das charakteristische Bruchbild „Splitterbruch“ der Prüferserie Z_G kennzeichnet sich durch ein spitz zulaufendes Versagensbild (siehe Abbildung 107). Splitterbrüche treten erfahrungsgemäß bei Erreichen hoher maximaler Zugbelastungen auf, wobei der Prüfkörper meist keine festigkeitsmindernden Merkmale (Schrägfaser, Ast, ...) aufweist.

Abbildung 111 zeigt ein typisches Bruchbild eines geschäfteten Prüfkörpers. Der Bruch trat stets im Bereich der Schäftung auf. Kennzeichnend ist eine lokal definierte und kleine Bruchfläche, die annähernd normal zur Faserrichtung orientiert ist und in der die Fasern im annähernd selben Bereich durchgängig abgetrennt sind. Daher spricht man auch von einem sogenannten Trennbruch.

1-1.23-SCHICHTIG

Nachfolgend sind die Einzelergebnisse und Versagensbilder der Zugprüfungen an Kleinproben mit 3-schichtigem Aufbau dargestellt. Die Prüfkörper der Prüfsreihe Z_3S weisen einen Schäftungsstoß (siehe Abbildung 71), die Prüfkörper der Prüfsreihe Z3_U einen Überlappungsstoß (siehe Abbildung 72) auf. Die Prüfkörper der Prüfsreihe Z3_G bestehen aus drei durchgängigen (ohne Stoß) verklebten längsorientierten Furnierschichten und dienen als Referenz. Es wurden jeweils 5 Zugprüfungen durchgeführt. Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte jeweils an vier der fünf Prüfkörper.

Tabelle 24: Einzelergebnisse; 3-schichtig ohne Stoß

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]
Z3_G_01	140,1	-		
Z3_G_02	172,7	16.039		
Z3_G_03	152,8	15.501	710 ¹⁾	9,6 ²⁾
Z3_G_04	142,7	16.435		
Z3_G_05	151,7	17.107		

¹⁾ und ²⁾ ... Rohdichte und Holzfeuchte nur anhand von 2 Proben bestimmt



Abbildung 112: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 3-schichtig ohne Stoß

Schäftung

Tabelle 25: Einzelergebnisse; 3-schichtig mit Schäftung

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]
Z3_S_01	141,7	-		
Z3_S_02	157,4	18.960		
Z3_S_03	136,4	16.921	710 ¹⁾	9,6 ²⁾
Z3_S_04	148,9	17.748		
Z3_S_05	162,4	18.843		

¹⁾ und ²⁾ ... Rohdichte und Holzfeuchte nur anhand von 2 Proben bestimmt



Abbildung 113: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 3-schichtig mit Schäftung

Überlappung

Tabelle 26: Einzelergebnisse; 3-schichtig mit Überlappung

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]
Z3_U_01	120,5	-		
Z3_U_02	93,4	19.421		
Z3_U_03	94,7	18.507	710 ¹⁾	9,6 ²⁾
Z3_U_04	105,6	18.699		
Z3_U_05	120,4	17.298		

¹⁾ und ²⁾ ... Rohdichte und Holzfeuchte nur anhand von 2 Proben bestimmt

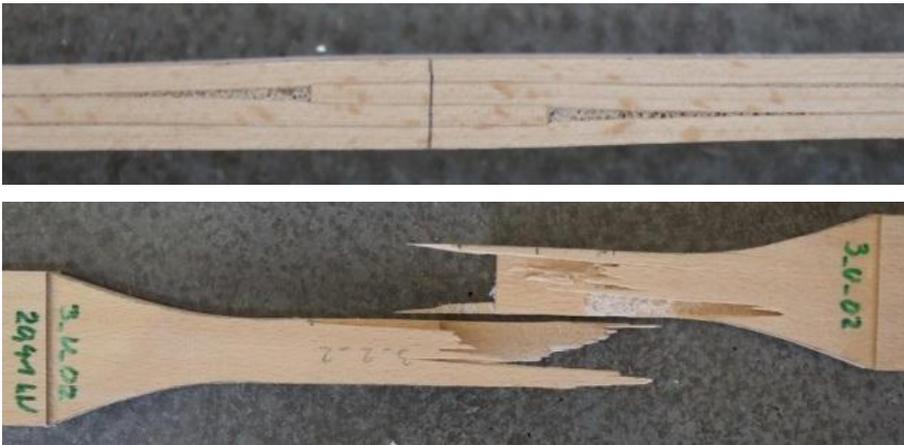


Abbildung 114: oben: Seitenansicht der Überlappung; unten: typisches Versagensbild, 3-schichtig mit Überlappung

1-1.2.2 Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul in Faserrichtung

In Tabelle 27 sind die jeweils resultierenden statistischen Kenngrößen der ermittelten Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul in Faserrichtung der Prüfserien Z3_G (Prüfkörper ohne Stoß; Referenz) und Z3_S (Prüfkörper mit Schäftung) und Z3_U (Prüfkörper mit Überlappung) angeführt.

Tabelle 27: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ und E-Modul $E_{t,0}$; 3-schichtiger Aufbau

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]			$E_{t,0}$ [N/mm ²]		
	Z3_G	Z3_S	Z3_U	Z3_G	Z3_S	Z3_U
n	5	5	5	4	4	4
max	172,7	162,4	120,5	17.107	18.960	19.421
min	140,1	136,4	93,4	15.501	16.921	17.298
mean	152,0	149,4	106,9	16.271	18.118	18.481
median	151,7	148,9	105,6	16.237	18.296	18.603
sd	12,8	10,8	13,2	676	967	882
CoV [%]	8,4%	7,2%	12,4%	4,2%	5,3%	4,8%

Abbildung 115 enthält Diagramme zur Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit der Z3_G (Prüfkörper ohne Stoß; Referenz) und Z3_S (Prüfkörper mit Schäftung) und Z3_U (Prüfkörper mit Überlappung).

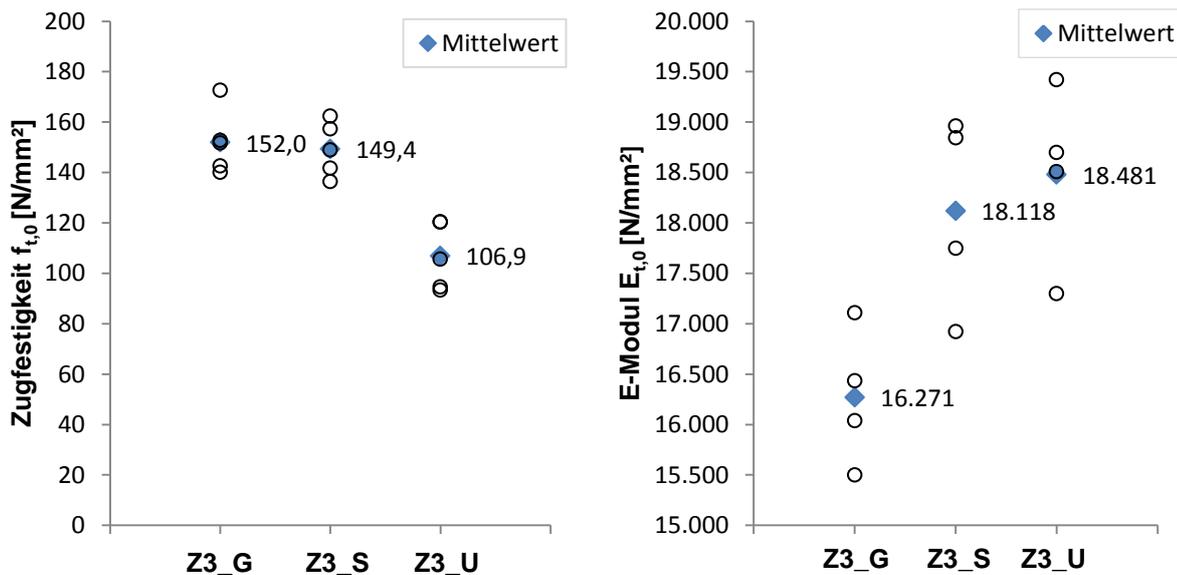


Abbildung 115: links: Zugfestigkeit $f_{t,0}$; rechts: E-Modul $E_{t,0}$

Zugfestigkeit $f_{t,0}$:

In Abbildung 115 und Tabelle 27 ist zu erkennen, dass die Zugfestigkeit 3-schichtigen Prüfkörper mit Schäftung (Z3_S) und jene ohne Schäftung (Z3_G) annähernd gleich sind. Der Einfluss der Schäftung wird im Vergleich zu den Prüfkörpern mit 1-schichtigem Aufbau geringer und bewegt sich in Richtung jener Werte ohne Schäftung (vgl. Tabelle 23 und Tabelle 27), da nur das mittlere Furnier geschäftet wurde und die beiden Deckfurniere durchgehend ausgeführt wurden. Bei der Ausführung des Stoßes als Überlappung (Z3_U) kam es durch die exzentrische Belastung zu einem Versagen der Klebefuge. Nach dem Versagen des Mittelfurniers folgte eine Lastumlagerung auf die beiden Deckfurniere. Dies begründet die Abnahme der Zugfestigkeit auf $\sim 2/3$, verglichen zu jener mit Schäftung (Z3_S) bzw. ohne Stoß

(Z_3G). Ein Vergleich der Zugfestigkeiten von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau ist in Abbildung 116 dargestellt.

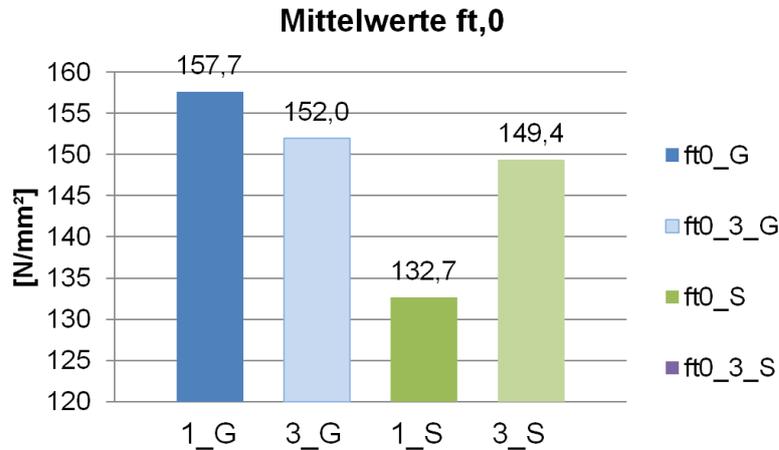


Abbildung 116: Vergleich der Mittelwerte der Zugfestigkeit $f_{t,0}$ von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau

E-Modul $E_{t,0}$:

Vergleicht man die mittleren E-Moduln der Einzelfurniere ohne Stoß von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau so ist festzustellen, dass dieser nahezu gleich bleibt (siehe Abbildung 117). Prüfkörper mit Schäftung (1_G und 2_G) und Überlappung (3_U) sind ~12 % höher als jene ohne Stoß. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass der Klebstoff zur Herstellung von Schäftung und Überlappung den E-Modul erhöht. Im Vergleich zum 1-schichtigen Aufbau mit Schäftung (1_S) fällt der Unterschied nicht so markant aus, da die beiden Deckfurniere ohne Stoß ausgeführt wurden und somit der Einfluss verringert wird (Abbildung 117).

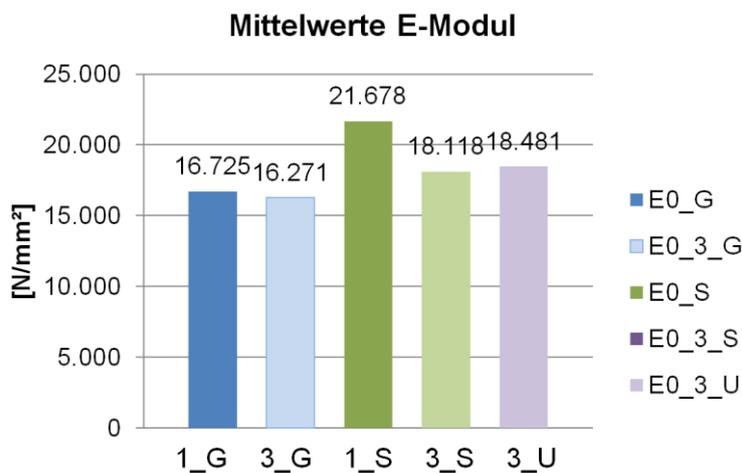


Abbildung 117: Vergleich der Mittelwerte der E-Moduln $E_{t,0}$ von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau

Bruchbild:

In Abbildung 112, Abbildung 113 und Abbildung 114, sind repräsentative Versagensbilder der Prüfserien Z3_G und Z3_S und Z3_U dargestellt.

Während die Prüfserien Z_G und Z_S ähnliche Versagensbilder ergaben (Splitterbruch, siehe Abbildung 112, Abbildung 113) versagten Prüfkörper der Serie Z_U zuerst im Bereich der Überlappung bzw Klebefuge (siehe Abbildung 114).

1-1.3 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Obwohl die Fertigung der Prüfkörper der einschichtigen und dreischichtigen Prüfserien mit größter Sorgfalt erfolgte, bereitete die Herstellung der Verjüngung große Probleme. Diese wurde von Hand mittels Schleifband hergestellt, wodurch sich eine exakte Symmetrie nur sehr schwer erreichen ließ. Zudem werden durch die Verjüngung des Querschnitts zuvor durchgängige Fasern angeschnitten. Während der Durchführung der Prüfungen konnte beobachtet werden, dass noch vor Erreichen der Höchstlast Risse im Bereich der Verjüngung (Ausrundung, siehe Abbildung 118) entstanden, welche vermutlich unter anderem auf den erhöhten Faseranschnittanteil, die geringe Querkzugfestigkeit sowie un stetige Spannungsverteilungen im Lasteinleitungsbereich zurückzuführen sind. Die Folge dieser Initialrisse ist eine unsymmetrische Belastung, die zu geringeren Festigkeitswerten führt. Folglich ist zu erwarten, dass sich bei Ausschluss der angeführten Einflussfaktoren höhere Zugfestigkeiten ergeben. Hierbei sei ein weiterer Aspekt angeführt. Die Einleitung der Zugkraft wurde mittels Klemmvorrichtung bewerkstelligt. Die zur Verfügung stehende Klemmvorrichtung erlaubte es jedoch nicht den erforderlichen Pressdruck, der erfahrungsgemäß bei rund $3,5 \text{ N/mm}^2$ liegt, einzustellen. Bei vollständigem Schluss der Spannbacken liegt ein Abstand von 15 mm zwischen den Klemnteilen vor. Um nun eine ausreichende Klemmwirkung für eine Zugkrafteinleitung herzustellen, wurden die Prüfkörper mit einem Übermaß zwischen die offenen Klemnteile eingelegt. Nach Schließung der Klemmbacken wird der Prüfkörper im Bereich der Laschenaufdoppelung (siehe Abbildung 69) auf Querdruck beansprucht. Dies führt zu einer Querkzugbeanspruchung im mittleren Bereich des Querschnitts, wodurch auch das Einzelfurnier außerhalb des Klemmbereichs eine Querkzugbeanspruchung erfährt, welche wiederum zur Entstehung von Rissen beitragen kann.

In Abbildung 118 sind typische Rissbilder inklusive Kraft-Verformungsdiagramm dargestellt. Die entstandenen Initialrisse sind deutlich zu erkennen (im rot bzw. grün gekennzeichneten Bereich).

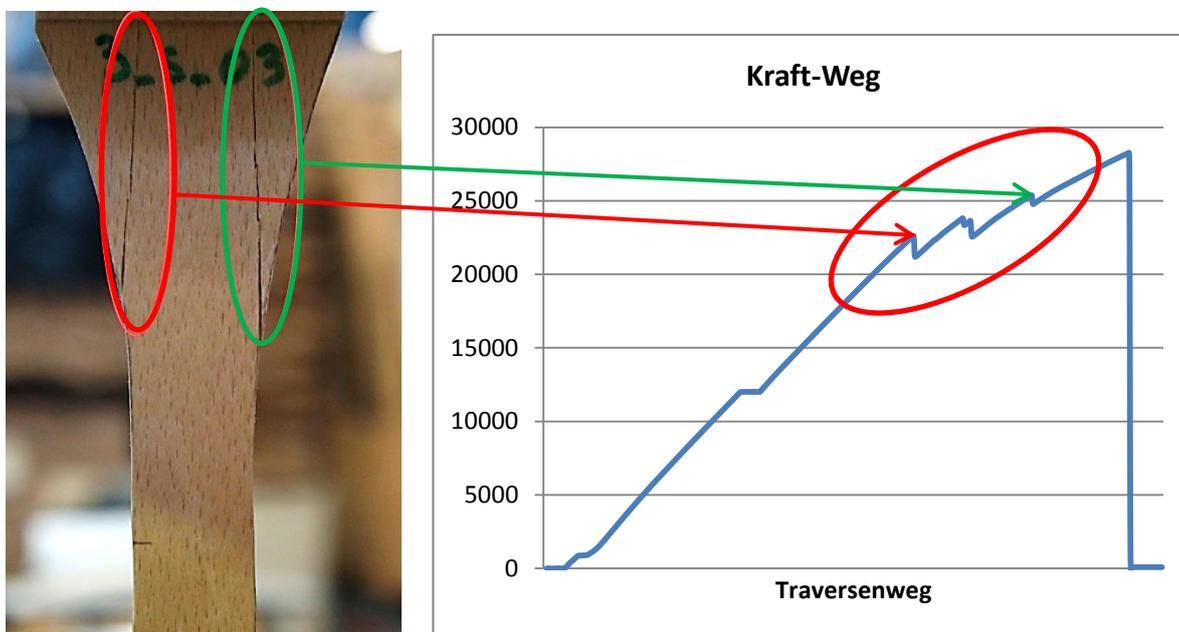


Abbildung 118: links: Auftreten von Initialrissen; rechts: schematische Darstellung eines Kraft-Weg Diagramms

Die o.a. Erläuterungen verdeutlichen die Problembereiche, welche sich angesichts einer durchzuführenden Zugprüfung stellen können. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen führten bereits zu Änderungen der Prüfkonfiguration, welche aktuell im Rahmen weiterer Studien Anwendung findet.

1-2 ZUGPRÜFUNG NACH EN 408

1-2.1 EINZELERGEBNISSE UND VERSAGENSBILDER

Serie 1.1

Nachfolgend sind die Ergebnisse und typische Versagensbilder der Zugprüfungen der Serie 1.1 dargestellt. Die Prüfungen wurden jeweils an fünf Prüfkörpern aus Buchen- und Birken - Furnierschichtholz sowie an drei Prüfkörpern der Holzart Fichte durchgeführt. Sämtliche Prüfkörper bestanden aus 1,5 mm dicken Einzelfurnieren mit 12-schichtigem Aufbau. Neben der Ermittlung von Zugfestigkeit und E-Modul erfolgte zusätzlich eine alternative Messung des E-Moduls über eine Klemmvorrichtung (siehe Kapitel 6-5.2) an je einem Prüfkörper je Holzart, um einen möglichen Einfluss der Befestigung des Gestänges am Prüfkörper zu ermitteln.

Buche 12 - schichtig

Tabelle 28: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Buche 12 - schichtig

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_12n_01	96,8	10.821	16.945	752	13,8
Bu_12n_02	100,3	10.636	16.522	757	14,5
Bu_12n_03	105,5	10.795	17.268	794	13,8
Bu_12n_04	101,5	12.945	16.528	746	13,1
Bu_12n_05	96,1	13.144	16.501	750	13,2
Bu_12n_E01	-	12.771	15.846	752	14,7



Abbildung 119: typische Versagensbilder; Buche 12 – schichtig

Birke 12 - schichtig

Tabelle 29: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Birke 12 - schichtig

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bi_12n_01	89,7	14.062	17.972	795	14,7
Bi_12n_02	85,8	13.915	18.050	805	16,2
Bi_12n_03	98,9	13.192	17.949	816	15,6
Bi_12n_04	103,4	14.105	18.682	811	14,5
Bi_12n_05	106,4	14.192	18.883	816	14,3
Bi_12n_E01	-	14.778	18.199	780	13,4



Abbildung 120: typische Versagensbilder; Birke 12 – schichtig

Fichte 12 - schichtig

Tabelle 30: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Fichte 12 - schichtig

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Fi_12n_01	47,0	12.887	15.892	614	18,0
Fi_12n_02	49,3	12.759	16.031	622	17,7
Fi_12n_03	56,4	13.199	16.374	625	18,7
Fi_12n_E01	-	12.811	15.869	606	17,2



Abbildung 121: typische Versagensbilder; Fichte 12 - schichtig

Serie 1.2

Die Serie 1.2 bestand aus drei Prüfkörpern bestehend aus 3,0 mm Buchen-Furnierschichtholz mit 6-schichtigem Aufbau.

Buche 6 - schichtig

Table 31: Einzelergebnisse der Serie 1.2; Buche 6-schichtig

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_6n_01	128,7	14.638	21.318	807	11,7
Bu_6n_02	128,6	14.661	20.781	790	11,3
Bu_6n_03	113,2	15.266	20.859	800	11,5

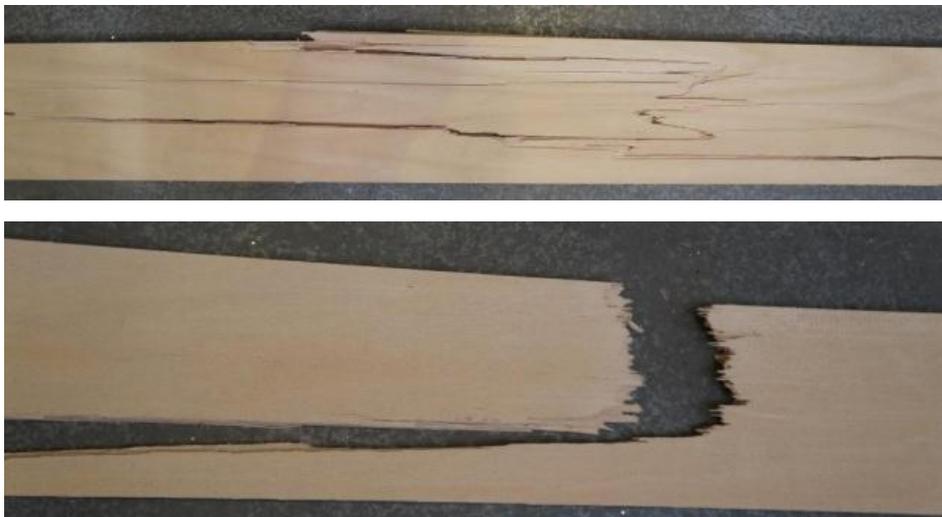


Abbildung 122: typische Versagensbilder; Buche 6 - schichtig

Serie 2.1

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Serie 2.1 aus 11-schichtigem Furnierschichtholz der Buche dargestellt.

Buche 11 - schichtig

Table 32: Einzelergebnisse der Serie 2.1; Buche 11 - schichtig

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_01	81,3	12.511	15.596	751	15,8
Bu_11n_02	79,5	12.568	15.677	758	15,7
Bu_11n_03	70,4	12.282	15.445	758	15,9
Bu_11n_04	79,1	12.625	15.517	755	15,9
Bu_11n_05	71,7	12.511	15.716	760	15,5

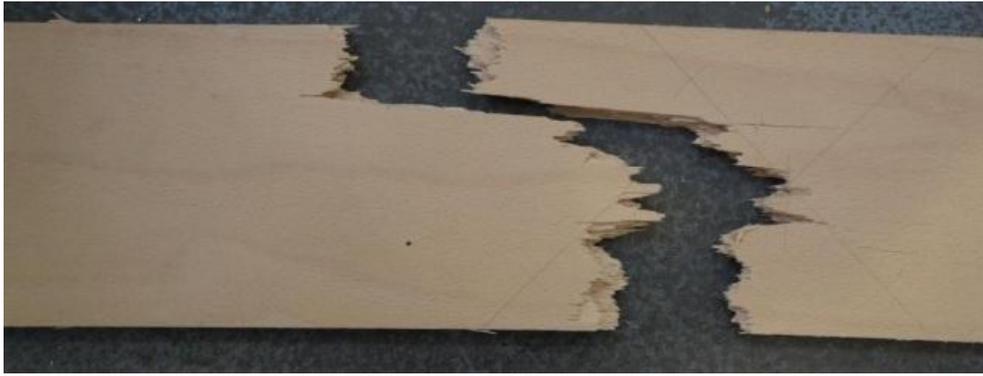


Abbildung 123: typisches Versagensbild; Buche 11 – schichtig

Serie 2.2

Die Serie 2.2 bestand aus fünf Prüfkörpern aus 11-schichtigem Furnierschichtholz der Buche, wobei die 2. und 10. Schicht als Querlage ausgeführt wurden.

Buche 11 – schichtig mit Querlagen

Tabelle 33: Einzelergebnisse der Serie 2.2; Buche 11-schichtig mit Querlagen

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_QL_01	69,6	10.485	13.409	758	15,6
Bu_11n_QL_02	68,5	10.526	13.484	749	14,7
Bu_11n_QL_03	69,8	10.344	13.336	762	15,7
Bu_11n_QL_04	70,7	10.281	13.219	760	16,3
Bu_11n_QL_05	68,5	10.495	13.396	778	16,5



Abbildung 124: typische Versagensbilder, Buche 11 - schichtig mit Querlagen

1-2.2 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Serie 1

Tabelle 34: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 1

Bezeichnung	ρ_{FSH} [kg/m ³]				u_{FSH} [%]			
	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
n	3	6	6	4	3	6	6	4
max	807	794	816	625	11,7	14,7	16,2	18,7
min	790	746	780	606	11,3	13,1	13,4	17,2
mean	799	758	804	617	11,5	13,9	14,8	17,9
median	800	752	808	618	11,5	13,8	14,6	17,9
sd	8	18	14	8	0,2	0,7	1,0	0,6
CoV [%]	1,0%	2,3%	1,8%	1,4%	1,8%	4,7%	6,7%	3,5%

Betrachtet man die statistischen Kenngrößen der Rohdichte in Tabelle 34 der einzelnen Prüfkörper, so ist auffallend, dass diese im Vergleich zu Vollholz beträchtlich höher sind. Der Grund dafür liegt im hohen Klebstoffanteil im Furnierschichtholz. Der genaue Klebstoffanteil ist durch das händische Auftragen mittels Leimwalze nur schwer zu ermitteln und variiert teils beträchtlich (gemessene Klebstoffauftragsmenge liegt zwischen 220 bis 310 g/m²).

Als Beispiel sei 12-schichtiges Furnierschichtholz der Buche angeführt: Im Durchschnitt beträgt der Klebstoffbedarf beim 12-schichtigen Aufbau ~20 % der Gesamtmasse. Die Rohdichte der Einzelfurniere beträgt 600-650 kg/m³, jene des Klebers ~1250 kg/m³. Geht man von 20 Masseprozent an Klebstoff im Prüfkörper aus, so ergibt sich eine Rohdichte von ~770 kg/m³. Dieser Wert stimmt gut mit jenen an Furnierschichtholz gemessenen Rohdichten überein.

Die hohe Holzfeuchte im Furnierschichtholz ist ebenfalls durch den Klebstoffanteil bedingt. Dies gilt für sämtliche Werte von Rohdichte und Holzfeuchte am Furnierschichtholz, welche im Zuge der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden.

Tabelle 35: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ der Serie 1

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]			
	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
n	3	5	5	3
max	128,7	105,5	106,4	56,4
min	113,2	96,1	85,8	47,0
mean	123,5	100,1	96,8	50,9
median	128,6	100,3	98,9	49,3
sd	8,9	3,8	8,8	4,9
CoV [%]	7,2%	3,8%	9,1%	9,6%

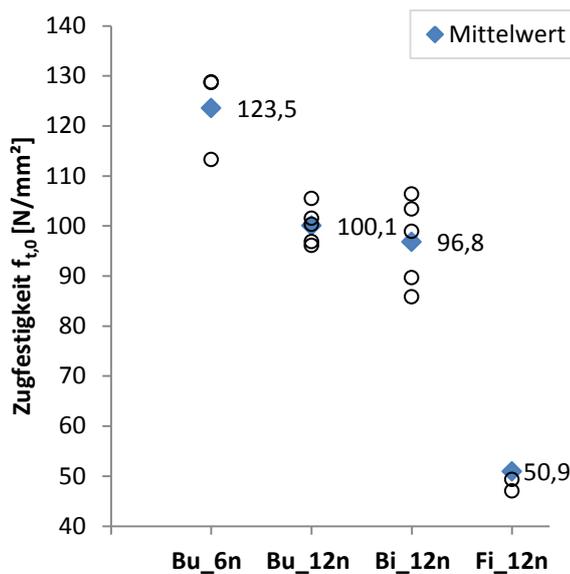


Abbildung 125: Zugfestigkeit $f_{t,0}$

Betrachtet man die Zugfestigkeit $f_{t,0}$ der beiden Prüfserien an Buchen – Furnierschichtholz, so ist vor allem der markante Unterschied zwischen 6-schichtigem Aufbau aus 3,0 mm Einzelfurnieren (Bu_6n) sowie dem 12-schichtigem Aufbau aus 1,5 mm Einzelfurnieren (Bu_12n) auffallend. Gründe dafür können neben dem Ausgangsmaterial auch die Holzfeuchte, die Rohdichte, der Faseranschnitt, die Faserrichtung sowie die Anzahl und Anordnung der einzelnen Schichten sein. Da die Einzelfurniere (1,5 mm bzw. 3,0 mm) von unterschiedlichen Baumstämmen entnommen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass vor allem das Ausgangsmaterial einen erheblichen Einfluss auf die Zugfestigkeit hatte. Würde man von der Schichtanzahl ausgehen, müsste sich die Zugfestigkeit für charakteristische Werte durch Homogenisierung wie in Kapitel 4-3.10 beschrieben beim 12-schichtigem Aufbau erhöhen. Ein Vergleich der Zugfestigkeiten mit Werten der BauBuche S ist nur bedingt möglich, da diese nur als charakteristische Werte vorliegen ($f_{t,0,k} = 60 \text{ N/mm}^2$ nach Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b)).

Geht man von Werten an Vollholz aus, sollte sich die Zugfestigkeit des Furnierschichtholzes aus Birke im Bereich jener der Buche befinden, wobei an dieser Stelle erwähnt sein sollte, dass die Einzelfurniere der Birke im Vergleich zu jenen der Buche eine größere Anzahl an Ästen enthielten. Dies könnte auch der Grund für die höhere Streuung der Einzelergebnisse sein.

Die Zugfestigkeit des Furnierschichtholzes der Fichte liegt im Bereich von jener der Kerto S ($f_{t,0,k} = 38 \text{ N/mm}^2$ Mätsa Wood Deutschland GmbH (2013)), wobei auch hier nur charakteristische Werte verfügbar sind und somit ein Vergleich nur bedingt möglich ist. Ähnlich der Birke enthielten die Einzelfurniere eine große Anzahl an Ästen.

Tabelle 36: lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$ und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 1

Bezeichnung	$E_{t,0,1}$ [N/mm ²]				E_{dyn} [N/mm ²]			
	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
n	3	6	6	4	3	6	6	4
max	15.266	13.144	14.778	13.199	21.318	17.268	18.883	16.374
min	14.638	10.636	13.192	12.759	20.781	15.846	17.949	15.869
mean	14.855	11.852	14.041	12.914	20.986	16.602	18.289	16.041
median	14.661	11.796	14.084	12.849	20.859	16.525	18.125	15.961
sd	356	1214	511	197	290	481	397	233
coV [%]	2,4%	10,2%	3,6%	1,5%	1,4%	2,9%	2,2%	1,5%

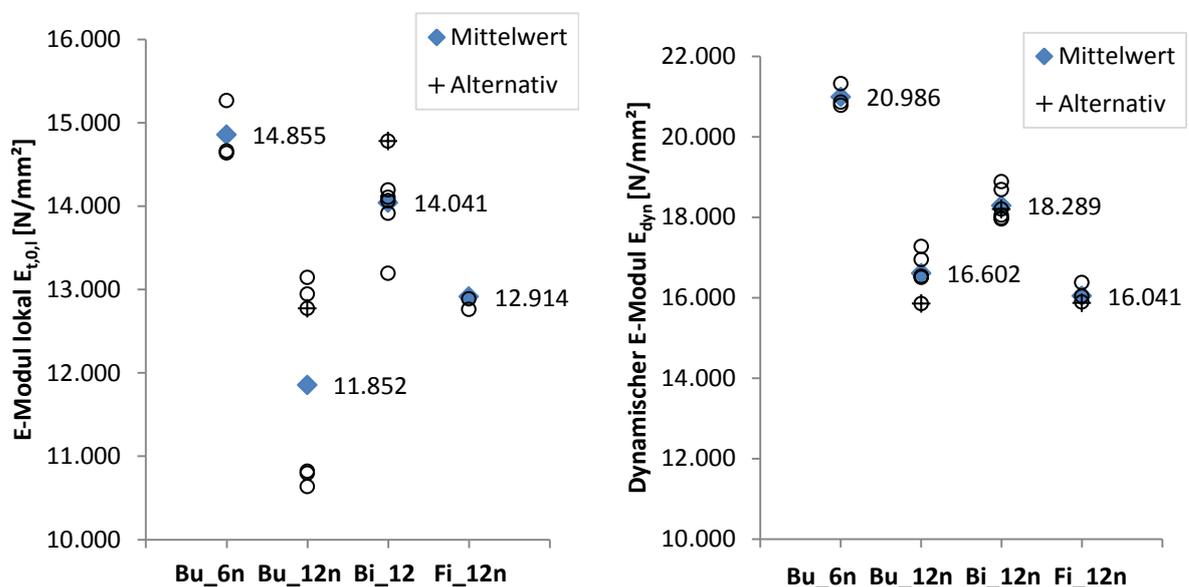


Abbildung 126: links: lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}

E-Modul $E_{t,0,1}$:

Auch hier zeigt sich der Trend, dass der E-Modul des 12-schichtigen Furnierschichtholzes aus Buche (Bu_12n) bedeutend tiefer als jener mit 6-schichtigem Aufbau (Bu_6n) ist. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch in diesem Fall das Ausgangsmaterial Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Jene drei Werte, welche im Vergleich zu den anderen um weitere ~2000 N/mm² abfallen, wurden aus einer zusammenhängenden Furnierplatte entnommen. Deshalb ist ebenfalls ein Einfluss des Ausgangsmaterials wahrscheinlich. Vergleicht man den E-Modul des 6-schichtigen Furnierschichtholzes mit jenem der BauBuche ($E_{0,mean} = 16800$ N/mm² nach Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b)), ist dieser um ~12 % geringer.

Die Werte des E-Moduls des Furnierschichtholzes aus Birke sind analog den Werten der Zugfestigkeit, auch hier etwas geringer als die der Buche mit 6-schichtigem Aufbau. Es ist auch hier anzunehmen, dass der Grund dafür im Ausgangsmaterial der Prüfkörper liegt.

Der E-Modul des Furnierschichtholzes der Fichte ist um ~10 % geringer als die Werte der Kerto S –Platte ($E_{0,mean} = 13800$ N/mm² nach Mätsa Wood Deutschland GmbH (2013)).

Die E-Modulmessung erfolgte zusätzlich pro Holzart an je einem Prüfkörper alternativ über eine Klemmvorrichtung (siehe Kapitel 6-5.2), um so einen möglichen Einfluss der Schrauben als Befestigungsmittel des Gestänges zu ermitteln. Sofern eine Aussage mit nur einem Prüfkörper möglich ist, hatte dies wie in Abbildung 126 (in der Abbildung als „Alternativ“ gekennzeichnet) ersichtlich keinen Einfluss.

Dynamischer E-Modul E_{dyn} :

Die Verhältnisse der dynamischen E-Moduln zu jenen der lokalen Zug-E-Moduln liegen in ähnlichen Bereichen (Abbildung 126). Die Faktoren zwischen den Mittelwerten der einzelnen Prüfungen sind in Tabelle 37 aufgelistet. Wobei zu erkennen ist, dass die Werte des Furnierschichtholzes aus Buche höher sind als jene der Birke und Fichte.

Tabelle 37: Faktoren zwischen den Mittelwerten der dynamischen E-Moduln $E_{dyn,mean}$ und lokalen Zug-E-Moduln $E_{t,0,l,mean}$

Bezeichnung	$E_{t,0,l,mean}$ [N/mm ²]	$E_{dyn,mean}$ [N/mm ²]	Faktor $E_{dyn,mean}/E_{t,0,l,mean}$ [-]
Bu_6n	14855	20986	1,41
Bu_12n	11852	16602	1,40
Bi_12n	14041	18289	1,30
Fi_12n	12914	16041	1,24

Serie 2

Tabelle 38: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 2

Bezeichnung	ρ [kg/m ³]		u [%]	
	Bu_11n	Bu_QL_11n	Bu_11n	Bu_QL_11n
n	5	5	5	5
max	760	778	15,9	16,5
min	751	749	15,5	14,7
mean	757	761	15,8	15,8
median	758	760	15,8	15,7
sd	3,3	10,8	0,2	0,7
CoV [%]	0,4%	1,4%	1,1%	4,5%

Die hohe Rohdichte und Holzfeuchte lassen sich, wie bereits in Serie 1 beschrieben, durch den Klebstoffanteil im Furnierschichtholz erklären.

Tabelle 39: Zugfestigkeit $f_{t,0}$, lokaler E-Modul $E_{t,0,l}$ und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 2

Bezeichnung	$f_{t,0}$ [N/mm ²]		$E_{t,0,l}$ [N/mm ²]		E_{dyn} [N/mm ²]	
	Bu_11n	Bu_QL_11n	Bu_11n	Bu_QL_11n	Bu_11n	Bu_QL_11n
n	5	5	5	5	5	5
max	81,3	70,7	12625	10526	15716	13484
min	70,4	68,5	12282	10281	15445	13219
mean	76,4	69,4	12500	10426	15590	13369
median	79,1	69,6	12511	10485	15596	13396
sd	5,0	0,9	131	107	112	99
CoV [%]	6,5%	1,3%	1,0%	1,0%	0,7%	0,7%

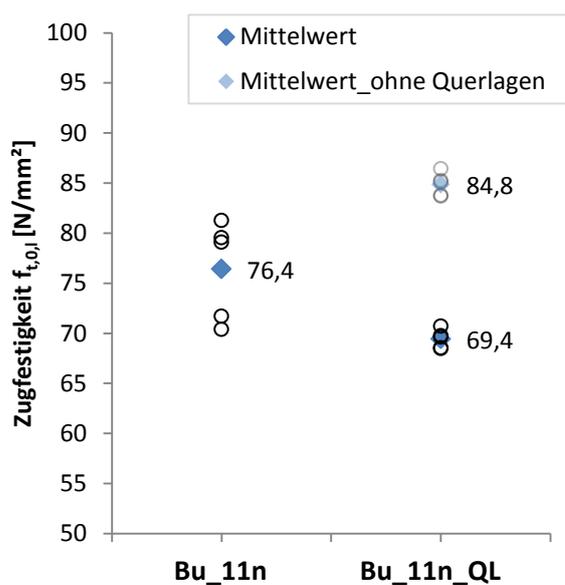


Abbildung 127: Zugfestigkeit $f_{t,0,l}$

Betrachtet man die Ergebnisse der Zugprüfungen an 11-schichtigem Furnierschichtholz aus Buche mit (Bu_11n_QL) bzw. ohne Querlagen (Bu_11n), ist zu erkennen, dass es aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Holzes normal zur Faser, zu einem Abfall durch den Einbau von Querlagen kommt. Bezieht man die aufgebrachte Zugbeanspruchung nur auf die vorhandenen Längslagen (9 Längslagen), so ergeben sich die in Abbildung 127 grau gekennzeichneten Werte. Auffallend ist vor allem, dass das Versagen der Prüfkörper mit Querlagen (Bu_11n_QL) im Gegensatz zum Furnierschichtholz, welches ausschließlich aus Längslagen bestand, nicht in Form eines Splitterbruch (Abbildung 124), sondern in Form eines lokal begrenzten Trennbruchs eintritt

Vergleicht man die Werte des 11-schichtigen Aufbaus (Bu_11n) mit jenen des 12-schichtigen Aufbaus (Bu_12n), liegt ein Abfall der Zugfestigkeit von ~24% vor. Da die Prüfkörper der Serie 2 zuvor zur Bestimmung des Schubmoduls mittels Hochkantbiegeprüfung dienten, mussten diese an drei Stellen durchbohrt werden. Bei der Bestimmung der Zugfestigkeit wurde der Querschnitt der Bohrung abgezogen. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese zusätzlichen Einfluss auf die Zugfestigkeit hatten, da beide Prüfserien vom selben Ausgangsmaterial stammten und somit ähnliche Werte liefern müssten.

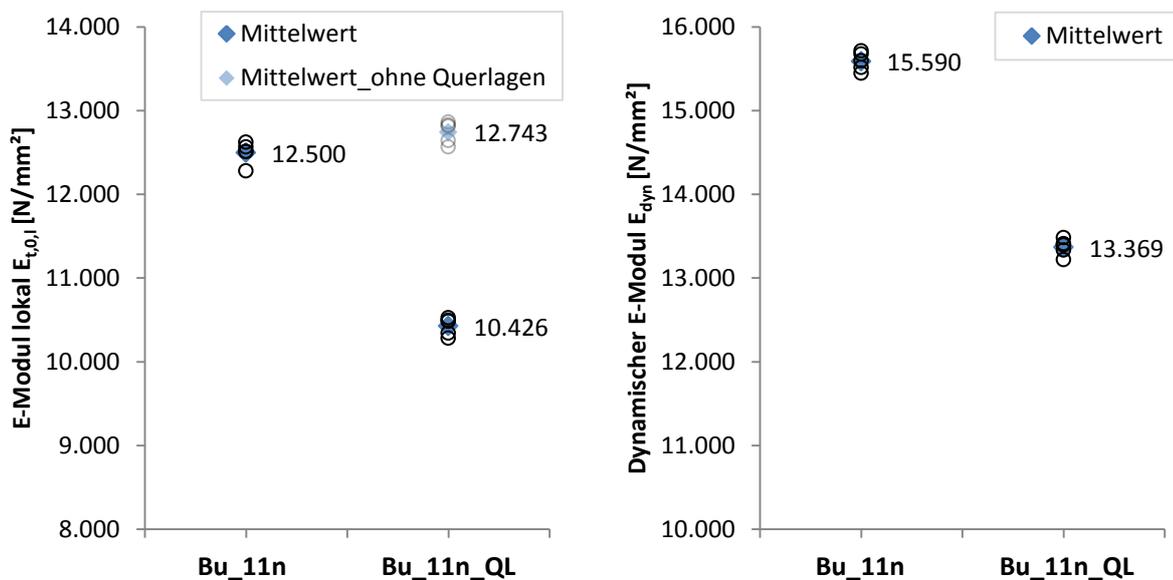


Abbildung 128: links: lokaler E-Modul $E_{t,0,l}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}

E-Modul $E_{t,0,l}$:

Der Abfall des E-Moduls der Prüfkörper mit Querlagen (Bu_11n_QL) ist durch den geringeren E-Modul der Einzelfurniere quer zur Faser bedingt. Bezieht man die Kraft ausschließlich auf die neun vorhandenen Längslagen, ergeben sich ähnliche Werte zum Aufbau mit 11 Längslagen (Abbildung 128, grau dargestellt).

Dynamischer E-Modul E_{dyn} :

Das Verhältnis der beiden dynamischen E-Moduln zu jenen der Zug-E-Moduln ist nahezu gleich (Abbildung 41). Wobei auffallend ist, dass diese Werte im Vergleich zu jenen des 12-schichtigen bzw. 6-schichtigen Aufbaus (Tabelle 37) doch deutlich abfallen.

Tabelle 40: Faktoren zwischen den Mittelwerten der dynamischen E-Moduln $E_{dyn,mean}$ und lokalen Zug-E-Moduln $E_{t,0,l,mean}$

Bezeichnung	$E_{t,0,l,mean}$ [N/mm ²]	$E_{dyn,mean}$ [N/mm ²]	Faktor $E_{dyn,mean}/E_{t,0,l,mean}$
Bu_6n	12500	15590	1,25
Bu_12n	10426	13369	1,28

1-3 SCHÜBPRÜFUNG BEI HOCHKANTBIEGUNG NACH EN 408

1-3.1 EINZELERGEBNISSE

Serie 1

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Hochkantbiegeprüfungen gegliedert nach den Holzarten Buche, Birke und Fichte aufgelistet. Es wurden jeweils Prüfungen an fünf Prüfkörpern der Holzart Buche und Birke durchgeführt sowie drei weitere an Furnierschichtholz aus Fichte. Die Prüfkörper hatten einen 12-schichtigen Aufbau und bestanden aus 1,5 mm starken Einzelfurnieren.

Buche 12 - schichtig

Tabelle 41: Einzelergebnisse der Serie 1; Buche 12-schichtig

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_12n_01	18461	737	15846	752	14,7
Bu_12n_02	17117	713	16117	768	15,6
Bu_12n_03	17411	713	16243	753	15,2
Bu_12n_04	17335	711	16232	756	15,3
Bu_12n_05	17458	728	16363	753	14,6

Birke 12 - schichtig

Tabelle 42: Einzelergebnisse der Serie 1; Birke 12-schichtig

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bi_12n_01	19703	1006	18199	780	13,4
Bi_12n_02	19894	1088	18324	785	14,2
Bi_12n_03	18902	1036	17589	791	15,1
Bi_12n_04	19573	1017	18227	775	13,2
Bi_12n_05	19667	1034	18396	779	13,7

Fichte 12 - schichtig

Tabelle 43: Einzelergebnisse der Serie 1; Fichte 12-schichtig

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Fi_12n_01	17777	627	15839	607	17,2
Fi_12n_02	18108	638	16307	609	17,6
Fi_12n_03	17968	659	16356	608	16,9

Serie 2

Die Serie 2 bestand aus zehn Prüfkörpern aus 11-schichtigem Furnierschichtholz der Buche mit unterschiedlichem Lagenaufbau. Fünf Prüfkörper bestanden aus elf Längslagen, fünf weitere aus neun Längslagen sowie zwei Querlagen in der 2. und 10. Schicht.

Buche 11 - schichtig

Tabelle 44: Einzelergebnisse der Serie 2; Buche 11-schichtig

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_01	17225	709	15596	751	15,8
Bu_11n_02	17734	719	15677	758	15,7
Bu_11n_03	17789	724	15445	758	15,9
Bu_11n_04	17166	689	15517	755	15,9
Bu_11n_05	17469	719	15716	760	15,5

Buche 11 – schichtig mit Querlagen

Tabelle 45: Einzelergebnisse der Serie 2; Buche 11-schichtig mit Querlagen

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_QL_01	14112	711	13409	758	15,7
Bu_11n_QL_02	14424	697	13484	749	14,7
Bu_11n_QL_03	14071	696	13336	762	15,7
Bu_11n_QL_04	14491	706	13219	760	16,3
Bu_11n_QL_05	14657	717	13396	778	16,5

1-3.2 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Serie 1

Tabelle 46: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 1

Bezeichnung	ρ_{FSH} [kg/m ³]			u_{FSH} [%]		
	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
n	5	5	3	5	5	3
max	768	791	609	15,6	15,3	17,6
min	752	775	607	14,7	13,4	13,2
mean	756	782	608	15,2	14,6	15,7
median	753	780	608	15,2	14,9	16,9
sd	7	6	1	0,6	0,7	2,1
CoV [%]	0,9%	0,8%	0,1%	4,2%	5,0%	13,3%

Analog zu den Zugprüfungen nach EN 408, sind aufgrund des Klebstoffanteils sowohl Rohdichte als auch Holzfeuchte höher als bei Vollholz. Dabei ist die große Streuung beim Furnierschichtholz aus Fichte auf die hohe Anzahl an Ästen in den Einzelfurnieren zurückzuführen. Aufgrund des höheren Klebstoffanteils, bei mit Ästen versehenen Furnieren, ist die Holzfeuchte in diesen Darrproben höher.

Tabelle 47: lokaler Biege-E-Modul $E_{m,0,1}$, Schubmodul G und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 1

Bezeichnung	$E_{m,0,1}$ [N/mm ²]			G [N/mm ²]			E_{dyn} [N/mm ²]		
	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
n	5	5	3	5	5	3	5	5	3
max	18461	19894	18108	737	1088	659	16363	18396	16356
min	17117	18902	17777	711	1006	627	15846	17589	15839
mean	17556	19548	17951	720	1036	641	16160	18147	16167
median	17411	19667	17968	713	1034	638	16232	18227	16307
sd	522	380	166	12	31	16	196	321	286
CoV [%]	3,0%	1,9%	0,9%	1,6%	3,0%	2,5%	1,2%	1,8%	1,8%

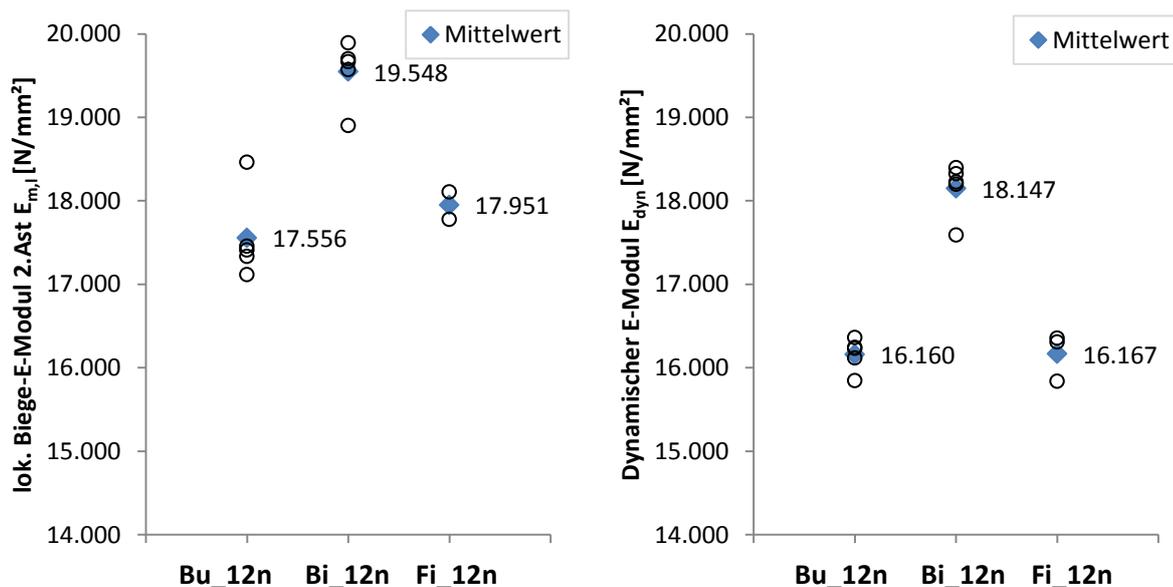


Abbildung 129: links: lokaler E-Modul $E_{m,b}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}

Die Relationen der dynamischen E-Moduln sind auch hier ähnlich zu jenen der lokalen Biege-E-Moduln. Sämtliche Prüfungen wurden mit einer Ent- und Wiederbelastung (Hysterese) durchgeführt, wobei der lokale Biege-E-Modul am Wiederbelastungsast ermittelt wurde. Ähnlich den Zugprüfungen, sind auch hier die niedrigen Werte des Furnierschichtholzes aus Buchenfurnieren auffallend. Geht man von ähnlichen Werten wie bei Vollholz aus, sollte der E-Modul der Buche zumindest auf ähnlichem Niveau zu jenem der Birke sein und nicht wie in Abbildung 129 zu erkennen, unter jenem der Fichte. Da die Einzelfurniere dieser Prüfkörper aus demselben Ausgangsmaterial wie jene der Zugprüfungen stammen, ist auch hier von einem großen Einfluss desselbigen auszugehen. Das Verhältnis der E-Moduln zwischen den einzelnen Holzarten ist in etwa gleich zu jenen des Zug-E-Moduln der Zugprüfungen nach EN 408.

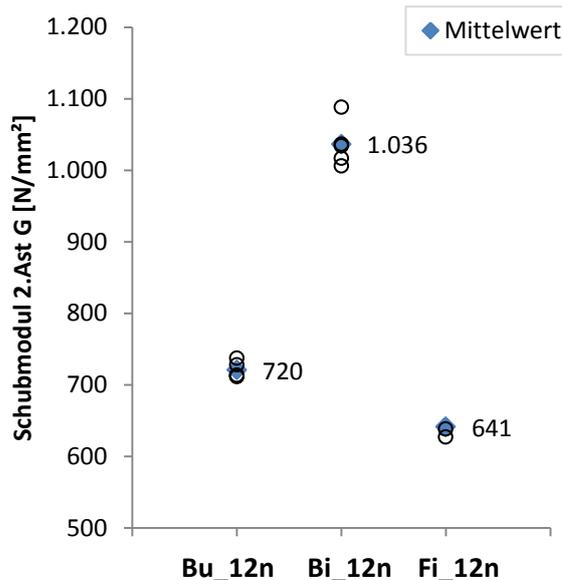


Abbildung 130: Schubmodul G

Der Schubmodul G aus der Hochkantbiegung wurde ebenfalls am Wiederbelastungsast bestimmt. Analog zu den zuvor beschriebenen Prüfungen ist anzunehmen, dass sich der niedrige Wert des Furnierschichtholzes der Buche im Vergleich zu jenem aus Birkenholz aufgrund des Ausgangsmaterials ergibt. Allerdings ist der Wert, verglichen mit dem Schubmodul hochkant der BauBuche S ($G_{\text{mean}} = 760 \text{ N/mm}^2$ nach Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b)), nur um ~5 % geringer. Der Schubmodul des Furnierschichtholzes aus Fichte ist um ~30 % höher als jener der Kerto S-Platte ($G_{\text{mean}} = 500 \text{ N/mm}^2$ nach Mätsa Wood Deutschland GmbH (2013)).

Serie 2

Tabelle 48: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 2

Bezeichnung	ρ_{FSH} [kg/m ³]		u_{FSH} [%]	
	Bu_11n_LL	Bu_11n_QL	Bu_11n_LL	Bu_11n_QL
n	5	5	5	5
max	760	778	15,9	16,5
min	751	749	15,5	14,7
mean	757	761	15,8	15,8
median	758	760	15,8	15,7
sd	3	11	0,2	0,7
CoV [%]	0,4%	1,4%	1,1%	4,4%

Wie bereits erwähnt, ergeben sich auch hier die im Vergleich zu Vollholz höheren Werte von Rohdichte und Holzfeuchte aufgrund des Klebstoffanteils im Furnierschichtholz.

Tabelle 49: lokaler Biege-E-Modul $E_{m,0,b}$ Schubmodul G und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 2

Bezeichnung	$E_{m,0,l}$ [N/mm ²]		G [N/mm ²]		E_{dyn} [N/mm ²]	
	Bu_11n_LL	Bu_11n_QL	Bu_11n_LL	Bu_11n_QL	Bu_11n_LL	Bu_11n_QL
n	5	5	5	5	5	5
max	17789	14657	724	717	15716	13484
min	17166	14071	689	696	15445	13219
mean	17477	14351	712	705	15590	13369
median	17469	14424	719	706	15596	13396
sd	284	252	14	9	112	99
CoV [%]	1,6%	1,8%	1,9%	1,3%	0,7%	0,7%

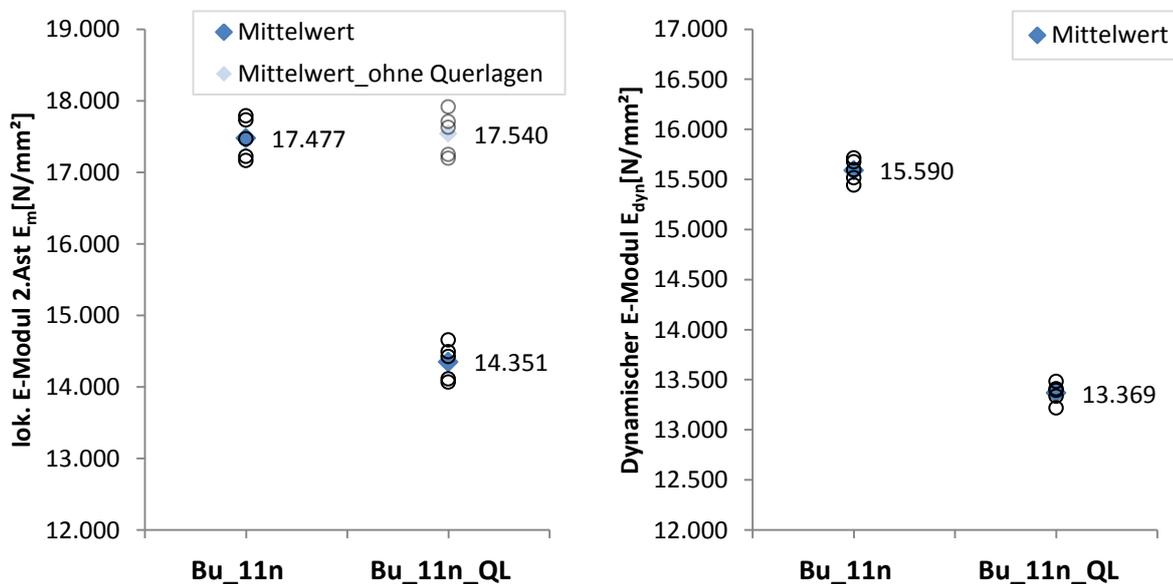


Abbildung 131: links: lokaler E-Modul $E_{m,b}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}

Der Biege-E-Modul wurde, wie bereits in der Serie 1 erwähnt, am Wiederbelastungsast ermittelt. Ähnlich zur Serie 1 ist das Verhältnis der dynamischen E-Moduln zu jenen der lokalen Biege-E-Moduln annähernd gleich. In Abbildung 131 ist ein Abfall des E-Moduls an den Prüfkörpern mit Querlagen zu erkennen. Bezieht man die Verformungsänderung ausschließlich auf die im Prüfkörper vorhandenen Längslagen, so ergeben sich die in grau dargestellten Werte. Daraus kann geschlossen werden, dass der E-Modul der Querlagen äußerst gering ist.

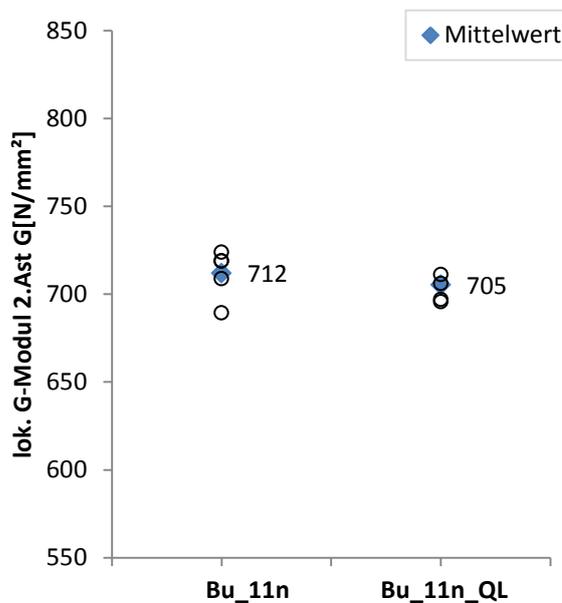


Abbildung 132: Schubmodul G

Vergleicht man den Schubmodul G des 11-schichtigen Aufbaus mit jenem des zuvor dargestellten 12-schichtigen Aufbaus (Abbildung 130), so kann erkannt werden, dass diese nahezu gleich sind und aufgrund der geringen Anzahl an Prüfungen keine Aussage über einen möglichen Einfluss der Anzahl an Lagen auf den Schubmodul gemacht werden kann. Auffallend ist, dass der Schubmodul an den Prüfkörpern mit Querlagen annähernd gleich zu jenen ohne Querlagen ist. Betrachtet man die Werte des Schubmoduls der BauBauche (Fa. Pollmeier), müsste sich dieser mit dem Einbau von Querlagen erhöhen. Der hier ermittelte Wert des Prüfkörpers mit Querlagen (Bu_11n_QL) ist um ~20 % geringer als jener der BauBauche Q ($G_{\text{mean, hochkant}} = 890 \text{ N/mm}^2$ nach Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b)).

1-4 SCHUBPRÜFUNG NACH EHRHART (2014)

1-4.1 EINZELERGEBNISSE

Buche 11-schichtig ohne Querlagen

Tabelle 50: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit Längslagen

Bezeichnung	F_{\max} [kN]	τ [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_LL_01	79,83	7,55	748	
Bu_LL_02	79,14	7,26	736	
Bu_LL_03	80,09	7,36	733	14,3 ¹⁾
Bu_LL_04	79,00	7,27	748	
Bu_LL_05	85,04	7,82	743	

¹⁾Holzfeuchte an 2 Proben der Ausgangsplatte ermittelt

Aufgrund der hohen zu erwartenden Versagenslasten mussten die Prüfkörper mit Metallplatten verklebt werden. Der verwendete PU-Kleber (siehe Kapitel 6-3.2) konnte die Lasten allerdings nicht auf den Prüfkörper übertragen und es kam zu einem Versagen der Klebefuge. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse nicht näher betrachtet, da weder Schubfestigkeit noch Schubmodul an dieser Prüferie ermittelt werden konnte. Für zukünftige Prüfungen wird die Wahl eines geeigneten Klebstoffes vorgeschlagen, welcher die erforderliche Kraft zwischen Prüfkörper und Stahllaschen aufzunehmen vermag.



Abbildung 133: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig ohne Querlagen

Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2,10)

Tabelle 51: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)

Bezeichnung	f_R [N/mm ²]	G [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_QL2_01	5,43	475	746	
Bu_QL2_02	5,30	414	736	
Bu_QL2_03	5,20	478	736	13,2 ¹⁾
Bu_QL2_04	5,18	434	731	
Bu_QL2_05	5,68	516	751	

¹⁾...Holzfeuchte an 2 Proben der Ausgangsplatte ermittelt



Abbildung 134: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)

Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 3,9)

Tabelle 52: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 3, 9)

Bezeichnung	f_R [N/mm ²]	G [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_QL3_01	6,37	513	763	
Bu_QL3_02	6,18	334	760	
Bu_QL3_03	6,26	446	751	14,0 ¹⁾
Bu_QL3_04	5,98	433	771	
Bu_QL3_05	5,38	487	751	

¹⁾...Holzfeuchte an 2 Proben der Ausgangsplatte ermittelt



Abbildung 135: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 3, 9)

Buche 11-schichtig mit 3 Querlagen (Schicht 2,6,10)

Tabelle 53: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 3 Querlagen (Schicht 2, 6, 10)

Bezeichnung	f_R [N/mm ²]	G [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_QL2m_01	5,26	362	745	
Bu_QL2m_02	5,17	408	725	
Bu_QL2m_03	5,59	389	734	12,8 ¹⁾
Bu_QL2m_04	5,86	377	737	
Bu_QL2m_05	6,06	326	747	

¹⁾... Holzfeuchte an 2 Proben der Ausgangsplatte ermittelt



Abbildung 136: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 3 Querlagen (Schicht 2, 6, 10)

1-4.2 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Tabelle 54: Rohdichte ρ_{FSH}

Bezeichnung	ρ_{FSH} [kg/m ³]		
	Bu_QL2	Bu_QL3	Bu_QL2m
n	6	6	6
max	751	775	747
min	731	751	725
mean	741	762	738
median	741	761	737
sd	8	10	8
CoV [%]	1,0%	1,3%	1,1%

Die höheren Rohdichten resultieren analog zu den anderen Prüfungen aus dem Klebstoffanteil im Furnierschichtholz.

Tabelle 55: Rollschubfestigkeit f_r und Schubmodul G

Bezeichnung	f_r [N/mm ²]			G [N/mm ²]		
	Bu_QL2	Bu_QL3	Bu_QL2m	Bu_QL2	Bu_QL3	Bu_QL2m
n	6	6	6	6	6	6
max	5,68	6,37	6,06	516	513	408
min	5,18	5,38	5,17	414	334	326
mean	5,40	6,02	5,53	458	431	377
median	5,36	6,08	5,43	454	440	383
sd	0,21	0,35	0,37	38	67	30
CoV [%]	3,9%	5,8%	6,7%	8,3%	15,6%	7,9%

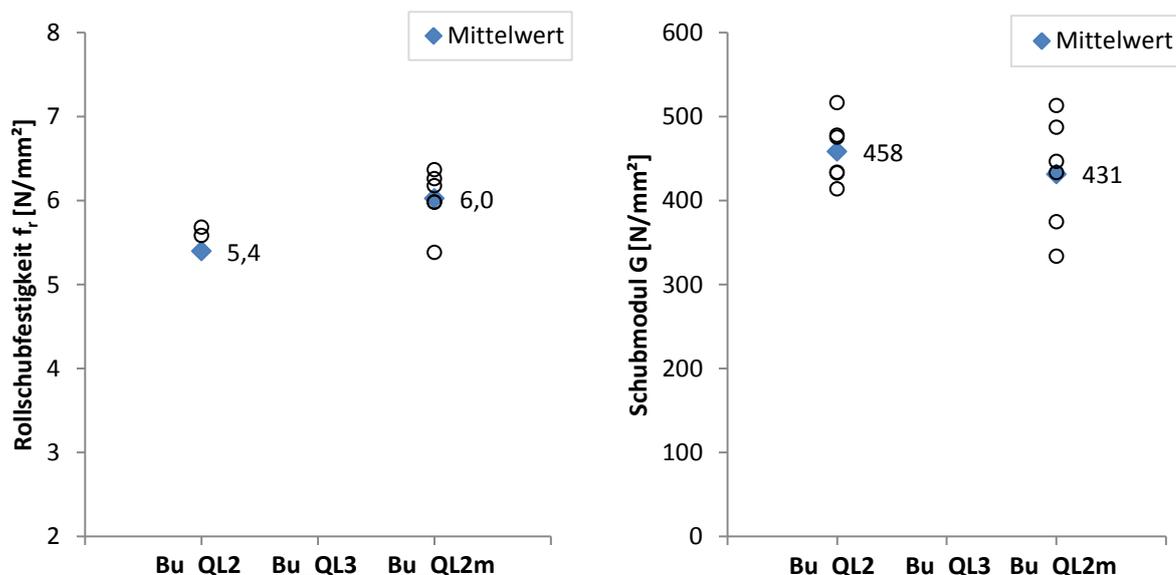


Abbildung 137: links: Rollschubfestigkeit f_r ; rechts: Schubmodul G

Erwähnenswert ist, dass es bei sämtlichen Prüfkörpern zu einem Rollschubversagen der Querlagen kam. Es konnte allerdings kein eindeutiges Muster ausgemacht werden, welche der einzelnen Querlagen versagt. Die Werte der unterschiedlichen Aufbauten sind wie in Abbildung 137 ersichtlich, alle auf ähnlichem Niveau. Aufgrund der geringen Anzahl an Prüfungen ist es daher nicht möglich, einen denkbaren Einfluss der Position der Querlage im Prüfkörper festzustellen. Die Rollschubfestigkeiten sind ähnlich zu jenen der BauBuche. Ein Vergleich ist leider nicht möglich, da nur charakteristische Werte und keine Mittelwerte vorliegen ($f_{v,k} = 3,3 \text{ N/mm}^2$ nach Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b)).

1-5 SCHUBPRÜFUNG NACH HIRSCHMANN (2011)

1-5.1 EINZELERGEBNISSE

Prüfkörpergeometrie und Prüfkonfiguration sämtlicher Prüfungen nach Hirschmann (2011) sind im Kapitel 6-8 näher erläutert.

Buche 11 – schichtig ohne Querlagen

Tabelle 56: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig ohne Querlagen

Bezeichnung	f_R [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_LL_01	9,60	765	13,6
Bu_11n_LL_02	10,67	724	13,8
Bu_11n_LL_03	11,18	727	14,1
Bu_11n_LL_04	11,38	739	14,5
Bu_11n_LL_05	10,82	736	14,2



Abbildung 138: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig ohne Querlagen

Buche 11 – schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2,10)

Tabelle 57: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)

Bezeichnung	f_R [N/mm ²]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Hi_Bu_QL_01	12,32	721	13,5
Hi_Bu_QL_02	11,61	733	14,0
Hi_Bu_QL_03	12,35	734	14,1
Hi_Bu_QL_04	10,79	736	14,4
Hi_Bu_QL_05	12,42	738	14,2



Abbildung 139: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2,10)

1-5.2 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Tabelle 58: Bruchspannung τ , Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH}

Bezeichnung	f_v [N/mm ²]		ρ_{FSH} [kg/m ³]		u_{FSH} [%]	
	Bu_LL	Bu_QL	Bu_LL	Bu_QL	Bu_LL	Bu_QL
n	6,0	6,0	6	6	6,0	6,0
max	11,4	12,4	765	743	14,5	14,4
min	9,6	10,8	724	721	13,6	13,5
mean	10,8	11,9	742	734	14,1	14,0
median	10,9	12,0	738	735	14,2	14,1
sd	0,6	0,6	17	7	0,3	0,3
CoV [%]	5,8%	5,3%	2,3%	1,0%	2,4%	2,2%

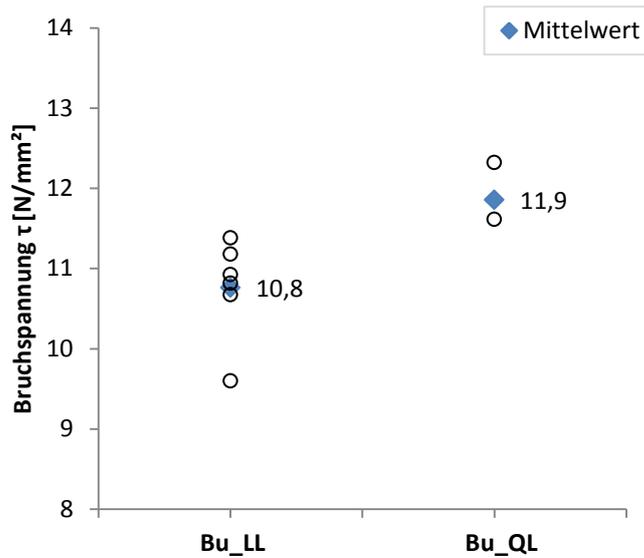


Abbildung 140: Bruchspannung τ

Die Bestimmung des Schubmoduls war an diesen Prüfkörpern nicht möglich, da die Länge zur Bestimmung der Schubverzerrung nicht exakt ermittelt werden konnte. Abbildung 140 zeigt, dass sich mit dem Einbau von Querlagen die Bruchspannung im Vergleich zu den Prüfkörper mit ausschließlich Längslagen um ~10 % erhöht.

KAPITEL 2: RESÜMEE UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass furnierbasierte Werkstoffe bereits in den 20er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts durchaus erfolgreich eingesetzt wurden. Vor allem Forschungen auf dem Gebiet der Luftfahrt, brachten bemerkenswerte Erfindungen hervor. Um furnierbasierte Werkstoffe, ähnlich den damaligen Einsatzgebieten, auch heute im konstruktiven Bereichen einsetzen zu können, ist die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Einzelfurniere, sowie jene des Furnierschichtholzes von großer Bedeutung. Wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewiesen, werden diese allerdings von unterschiedlichsten Parametern (Qualität des Ausgangsmaterials, Vorbehandlung, Holzart, Herstellungsart,...) beeinflusst, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnissen untereinander erschwert wird.

Zur Ermittlung ausgewählter mechanischer Kennwerte wurden fünf unterschiedliche Arten von Prüfungen durchgeführt, wobei die Schichtanzahl, die Einzelfurnierdicke und die Holzart variierten. Vor allem die Bestimmung von Kennwerten an Einzelfurnieren stellte sich als schwierig heraus. Zum einen ist die Prüfkfiguration aufgrund der geringen Dicken problematisch und zum anderen kommt es aufgrund der vielen Einflussparametern zu teils signifikant unterschiedlichen Ergebnissen. Allgemeine Aussagen zu sämtlichen Prüfergebnissen sind aufgrund der diversen Einflussparameter sowie der geringen Anzahl an Prüfungen nur bedingt möglich. Daher sollte diese Arbeit viel mehr als Grundlage wie auch zur Abschätzung von Festigkeits- und Steifigkeitswerten für zukünftige Versuchsreihen dienen. Für weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet, ist vor allem die Anzahl an Prüfungen zu erhöhen, sowie eine genauere Dokumentation des Ausgangsmaterials und der Herstellung desselben nötig, um in weiterer Folge abgesicherte Aussagen zu den mechanischen Eigenschaften furnierbasierter Werkstoffe, sowie deren Einflussparametern treffen zu können.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit lassen dennoch den Schluss zu, dass aufgrund der ermittelten mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte an Furnierschichtholz, vor allem jenen an Laubholz, durchaus großes Potential für einen zukünftigen Einsatz im konstruktiven Bereich vorhanden ist. Hierbei stellt die Herstellung von UHPP-Verbundbauteilen eine ausgezeichnete Möglichkeit zur Nutzung furnierbasierter Werkstoffe dar. Zum einen werden dabei die Eigenschaften des Materials bestens genutzt und zum anderen stellt es eine ressourcenschonende Nutzung des Werkstoffes Holz dar.

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

- [1] **Fischer, Albert** (1941): Holzsparende Konstruktion und Herstellungsverfahren. Wendlingen.
- [2] **Knigth, E. Vernon; Wulpi, Meinhard** (1930): Furniere und Sperrholz. Eigenschaften und Herstellung von Furnieren und Sperrholz. 2 volumes. Berlin: M. KRÄYIN, Technischer Verlag G.m.b.H., BERLIN W (1).
- [3] **Finsterbusch, Edgar; Thiele, Werner** (1987): Vom Steinbeil zum Sägegatter. Ein Streifzug durch die Geschichte der Holzbearbeitung. 1. Aufl. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- [4] **Edwards, C.** (2008): A history of veneer cutting. Edited by The 2008 BAFRA Directory.
- [5] **Beamish, Richard** (1862): Memoir of the life of Sir Marc Isambard Brunel. England.
- [6] **Kollmann, Franz** (1962): Furniere, Lagenhölzer und Tischlerplatten. Rohstoffe, Herstellung, Plankosten, Qualitätskontrolle usw. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [7] **Mayo, J. K.** (1865): Material for roofing, tubing, tanks, wainscoting, boats and other structures. Angemeldet von Mayo am 26.12.1865. Patent Nr. 51735.
- [8] **Bittner, Joachim** (1951): Furniere - Sperrholz Schichtholz. Erster Teil: Technologische Eigenschaften; Prüf- und Abnahmevorschriften; Mess-, Prüf- und Holzgeräte. 2. verbesserte Auflage. 2 volumes. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer (Werkstattbücher, für Betriebsbeamte, Konstrukteure und Facharbeiter, 77).
- [9] **Kraemer, Otto** (1934): Der Einfluss der Leimung auf die Güte von Flugzeugsperrhölzern. In *Luftfahrt-Forschung* 11.
- [10] **Winter, H.** (1955): Unterlagen und Richtlinien für den Holzflugzeugbau B III b. Sperrhölzer. Braunschweig.
- [11] **Klotz, Ludwig** (1940): Furniere - Sperrholz Schichtholz. Zweiter Teil aus der Praxis der Furnier- und Sperrholz-Herstellung. 2 volumes. Berlin, Heidelberg: Springer (Werkstattbücher, für Betriebsbeamte, Konstrukteure und Facharbeiter, 77).
- [12] **McMillin, J. M.** (1950): Coating for the prevention of end checks in logs and lumber,
- [13] **Kollmann, Franz; Kuenzi, Edward; Stamm, Alfred** (1975): Principles of Wood Science and Technology. Volume II: Wood Based Materials. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- [14] **Doffiné, E.** (1956): Dämpfgruben für Furniererzeugung. In *Norddeutsche Holzwirtschaft* 1956 (4), pp. 6–7.
- [15] **Fleischer, H.O** (1959/1965): Heating rates for logs, bolts, and flitches to be cut into veneer. In *U.S. Forest Prod. Laboratory* (2149), p. 19.
- [16] **Schwab, Jürgen** (1987): Das grosse Buch vom Holz. Sonderausg. Luzern: Ed. Atlantis.
- [17] **Hoff, W.; Dewitz, O.; Madelung, G.** (Eds.) (1929): Jahrbuch 1929 der deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt. Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt. München.
- [18] **Ylinen, Arvo** (1942): Die Anwendung von Holz im Flugzeugbau Finnlands. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 5 (4), pp. 118–122.

- [19] **Haffner, Camillo** (1922): Handbuch für Flugzeug-Konstrukteure. Eine übersichtliche Anleitung zur Berechnung und zum Bau von Flugzeugen. With assistance of Erich Osterland. 3rd ed. Berlin: R. C. Schmidt & Co (Bibliothek für Luftschiffahrt und Flugtechnik Bd. 10).
- [20] **Elmendorf, Armin.** (1919): The design of plywood for aircraft,
- [21] **Küch, W.** (1942): Holz im italienische Flugzeugbau. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 5, pp. 122–124.
- [22] **Reich, Jonathan** (1996): Poetic Engineering and Invention: Arthur Troutner, Architect, and the Development of Engineering Lumber. Edited by California Polytechnic State University. San Luis Obispo.
- [23] **Auld, J. F.** (1928): Airplane Wing. Angemeldet von Auld am 24.11.1928. Anmeldenummer 321595. Patent Nr. 1771567.
- [24] **Jensen, Martin** (1941): Methode of making ariplane structures. Angemeldet von Jensen am 20.09.1941. Anmeldenummer 411663. Patent Nr. 2388485.
- [25] **Atwood, Harry** (1934): Honeycomb wing construction for airplanes. Angemeldet von Atwood am 14.09.1934. Anmeldenummer 744070. Patent Nr. 2029214.
- [26] **Kollmann, Franz** (1936): Holz im Maschinenbau. In *Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein* 16.
- [27] **Rüsch, Fritz; Sander, Paul** (1941): Ein bauchiges Faß aus Sperrholz. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 4 (9), pp. 325–327.
- [28] **Schaffer, E. L.** (1977): Press-Lam. Progress in techical development of laminated veneer structural products. With assistance of R. W. Jokerst, R. C. Moody, C. C. Peters, J. L. Tschernitz, J. J. Zahn. Forest Products Research Laboratory. Madison, Wisconsin.
- [29] **Çolak, Semra; Çolakoğlu, Gürsel; Aydin, Ismail** (2007): Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). In *Building and Environment* 42 (1), pp. 93–98.
- [30] **Mombächer, Rudolf** (1988): Holz-Lexikon. Nachschlagewerk für d. Holz- u. Forstwirtschaft. 3. Aufl., völlig neu bearb. von Rudolf Mombächer. Stuttgart: DRW-Verl.
- [31] **Norm** ÖNORM EN 14374, 01.02.2005: Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [32] Mätsa Wood Deutschland GmbH (2013): Kerto in der Praxis. Produktdatenblatt. Edited by Mätsa Group. Bremen.
- [33] Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014a): Ingenious Hardwood. Creuzburg, zuletzt geprüft am 07.04.2015.
- [34] **Brandner, Reinhard; Thiel, Alexandra** (2015): Klebetechnologie und Holzwerkstoffe. Skriptum. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [35] **Schickhofer, Gerhard** (2006): Der Roh- und Werkstoff Holz. Skriptum. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [36] **Grosser, Dietger** (1977): Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [37] **Moro, José Luis; Rottner, Matthias; Alihodzic, Bernes; Weißbach, Matthias** (2009): Baukonstruktion. vom Prinzip zum Detail. Berlin, Heidelberg: Springer.

- [38] **Jeske, Hauke** (2010): Holz und sonstige biogene Rohstoffe, (Makroskopie). Technische Universität München.
- [39] **Mägdefrau, Karl** (1951): Botanik. Winters Studienführer. Heidelberg: Winter-Verlag.
- [40] **Wagenführ, Rudi; Scheiber, Chr.** (1985): Holzatlas. 2nd ed. Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- [41] **Kollmann, Franz** (Ed.) (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band I: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, spanabhebende und spanlose Holzbearbeitung, Holzverbindungen. 2 volumes. Berlin, München: Springer-Verlag; J.F. Bergmann (1).
- [42] **Ehrhart, Thomas** (2014): Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettspertholz. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [43] **Norm** ÖNORM B3012, 01.12.2003: Holzarten - Kennwerte zu den Benennungen und Kurzzeichen der ÖNORM EN 13556, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [44] **Norm** ÖNORM EN 350-1, 01.12.1994: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [45] **Norm** ÖNORM EN 350-2, 01.12.1994: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit un Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von Bedeutung in Europa, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [46] **Lutz, John F.** (1971): Wood and log characteristics affecting veneer production. In *Forest Products Laboratory*, p. 31.
- [47] **Fonselius, Mikael** (1997): Effect of size on the bending strength of laminated veneer lumber. In *Wood Science and Technology* 31, pp. 399–413.
- [48] **Saviana, J.; Zitto, M. A.; Piter, J. C.** (2009): Bending strength and stiffness of structural laminated veneer lumber manufactured from fast-growing Argentinian Eucalyptus Grandis. In *Ciencia y tecnología* 11, pp. 183–190.
- [49] **Buchelt, Beate; Pfriem, Alexander** (2011): Influence of wood specimen thickness on its mechanical properties by tensile testing: solid wood versus veneer. In *Holzforschung* 65, pp. 249–262.
- [50] **Pfriem, Alexander; Buchelt, Beate** (2011): Influence of the slicing technique on mechanical properties of the produced veneer. In *European Journal for Wood Products* 69, pp. 93–99.
- [51] **Nazerian, Morteze** (2011): Effect of wood species, Amount of Juvenile Wood and Heat Treatment on Mechanical and Physical Properties of Laminated Veneer Lumber. In *Journal of Applied Science* 11 (6), pp. 980–987.
- [52] **Norm** ÖNORM EN 321, 01.03.2002: Holzwerkstoffe - Bestimmung der Feuchtebeständigkeit durch Zyklustest, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [53] **Peker, Hüseyin; Tan, Hüseyin; Ersen, Nadir** (2015): Effects of Steaming, Drying Temperature, and Adhesive Type on Static Bending Properties of LVL made of *Picea orientalis* and *Abies nordmanniana* veneers. In *BioResources* 10 (1), pp. 79–87.

- [54] **Palubicki, Bartosz; Marchal, Remy; Butand, Jean-Claude; Denaud, Louis-Etienne; Blèron, Laurent; Collet, Robert; Kowaluk, Grzegorz** (2010): A Method of Lathe Checks Measurement; SMOF device and its software. In *European Journal for Wood Products* 68, pp. 151–159.
- [55] **Thibaut, B.; Beauchene, J.** (2004): Links between wood machining phenomena and wood mechanical properties: the case of 0° / 90° orthogonal cutting of green wood. Proceedings of the 2nd international symposium of wood machining, 2004.
- [56] **Darmawan, Wayan; Nandika, Dodi; Massijaya, Yusram; Kabe, Abigael; Rahayu, Istie; Denaud, Louis-Etienne; Ozarska, Barbara** (2015): Lathe check characteristics of fast growing sengon veneers and their effect on LVL glue-bond and bending strength. In *Journal of Materials Processing Technology* 215, pp. 181–188.
- [57] **Daoui, Abdelhakim; Descamps, Clément; Marchal, Remy; Zerizer, Abdellatif** (2011): Influence of Veneer Quality on Beech LVL Mechanical Properties. In *Ciencia y tecnología* 13 (1), pp. 69–84, zuletzt geprüft am 31.03.2015.
- [58] **Denaud, Louis-Etienne; Blèron, Laurent; Marchal, Remy** (2007): Online control of wood peeling process: acoustical and vibratory measurements of lathe checks frequency. In *Annals of Forest Science* 64 (5), pp. 569–575.
- [59] **Pot, Guillaume; Denaud, Louis-Etienne; Collet, Robert** (2014): Numerical study of the influence of veneer lathe checks on the elastic mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made of beech. In *Holzforschung*.
- [60] **Gaff, Milan; Gasparik, Miroslav** (2015): Influence of Densification on Bending Strength of Laminated Beech Wood. In *BioResources* 10, pp. 1506–1518, zuletzt geprüft am 31.03.2015.
- [61] **Xue, Bing; Hu, Yingcheng** (2013): Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber. In *BioResources* 8, pp. 2681–2695.
- [62] **Norm ÖNORM EN 408, 01.09.2012**: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [63] **Srinivasan, Narayana; Bhattacharyya, Debes; Jayaraman, Krishnan** (2007): Thermoforming of wood veneer composite sheets. In *Holzforschung* 61 (5).
- [64] **Buchelt, Beate; Wagenführ, André** (2008): The mechanical behaviour of veneer subjected to bending and tensile load. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 66, pp. 289–294.
- [65] **Kraemer, Otto** (1929): Untersuchung über den Einfluss von Aufbau und Faserverlauf auf Zugfestigkeit Biegung und Dehnung an Birkenfurnieren und Birkensperrholz. In *Bericht der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt*, zuletzt geprüft am 31.03.2015.
- [66] **Melo, Rafael de; Del Menezzi, Cláudio** (2014): Influence of veneer thickness on the properties of LVL from Paricá (*Schizolobium amazonicum*) plantation trees. In *European Journal for Wood Products* 72 (2), pp. 191–198.
- [67] **Kunesh, R. H.** (1978): Micro-Lam: structural Laminated Veneer Lumber. In *Forest Products Journal* 28 (7), pp. 41–44.
- [68] **Youngquist, J. A.; Laufenberg, T. L.; Bryant, B. S.** (1984): End jointing of laminated veneer lumber for structural use. In *Forest Products Journal* 34, pp. 25–32, zuletzt geprüft am 31.03.2015.

- [69] **Bal, Bekir; Bektas, Ibrahim** (2012): The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber. In *BioResources* 7(3), pp. 3104–3112, zuletzt geprüft am 18.03.2015.
- [70] **Dundar, Turker; Akbulut, Turgay; Korkut, Suleyman** (2008): The effects of some manufacturing factors on surface roughness of sliced Makoré (*Tieghemella heckelii* Pierre Ex A.Chev.) and rotary-cut beech (*Fagus orientalis* L.) Veneers. In *Building and Environment* 43 (4), pp. 469–474.
- [71] **Bekhta, Pavlo; Niemz, Peter; Sedliacik, Jan** (2012): Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. In *European Journal for Wood Products* 70 (1-3), pp. 99–106.
- [72] **Vorreiter, Leopold** (1963): Grundlagen der Holzspannung. Arten, Formen und Maschinen zerspanender Holzformung. Arbeits- und Betriebsschutz. Holztechnologisches Handbuch / mit 84 Tabellen. Wien [u.a.]: Fromme (Holztechnologisches Handbuch, 3).
- [73] Dynea AS (Ed.) (2012): Technisches Merkblatt Prefere 4546. Flüssiger Melaminharzkleber für den Holzleimbau. Dynea AS.
- [74] Purbond (2011): PURBOND HB S309. 1K-Polyurethanklebstoff zur Herstellung von tragenden Holzbauteilen.
- [75] **Norm** ÖNORM EN 789, 01.04.2005: Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [76] **Loik, Markus B.** (2015): Formgepresste UHPP-Leichtbauprofile für die Herstellung von Holz-Holz-Verbundbauteilen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [77] **Bogensperger, Thomas** (2012): Holzbau 2. Studienblätter BSP Scheibe, Steifigkeiten, Fesigkeiten. Skriptum. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [78] **Hirschmann, Bernhard** (2011): Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettsperrholz. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [79] Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014b): Leistungserklärung PM-001-2013. Furnierschichtholz aus Buche. Creuzburg.

A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links: Grabbeigabe Tutanchamuns, Truhe aus Zedernholz furniert mit Ebenholz und Elfenbein; rechts: Stuhl von St. Peter, furniert und mit Einlagen aus Elfenbein und Gold versehen (Knigh, Wulpi, 1930) 4

Abbildung 2: Furnierherstellung mittels Rahmensäge (um 1530); mit breitem aber dünnem feingezahnten Blatt (Finsterbusch, Thiele, 1987)..... 5

Abbildung 3: oben: Vorläufer des Horizontalgatters, schematische Darstellung nach einem Modell in Schweden; unten: Horizontalgatter zur Herstellung von Furnieren (Cochot, 1814) (Finsterbusch, Thiele, 1987) 6

Abbildung 4: links: Blomberger Holzindustrie, Herstellung von Sperrholz aus Buchenurnieren (1893) (Blomberger Holzindustrie b. Hausmann GmbH & Co. KG, 1999); rechts: Darstellung der Vorteile von Sperrholz (History of APA, Plywood, and Engineered Wood, 2015).....	7
Abbildung 5: Werbung für "Plywood" um 1900 (PPA Structural Wood Society, 2014)	7
Abbildung 6: Eigenschaften von Buchenschichtholz im Vergleich zu Buchenvollholz (Kraemer, 1934)	8
Abbildung 7: Bruchgefüge von Schlagbiegeversuchen an Schichtholz (Buche 45-fach); links: Schlag senkrecht zur Faser; rechts: Schlag in Faserrichtung (Kraemer, 1934).....	9
Abbildung 8: links: Furniermessermaschine; rechts: Furniersägemaschine (Klotz, 1940).....	10
Abbildung 9: Furnierschälmaschinen (Klotz, 1940)	10
Abbildung 10: kochen der Stämme im Furnierwerk Merkscha Furnirnica d.o.o.(Celje, Slowenien) ...	11
Abbildung 11: links: Festigkeitskennwerte von 3-schichtigem Birkensperrholz (1,2 mm, symmetrischer Aufbau 1:1:1); rechts: Sperrholzproben nach 16-stündiger Wasserlagerung (1 Kiefern-, 2 + 3 Birken, 4 Buchensperrholz) (Hoff et al., 1929).....	14
Abbildung 12: links: Deperdussin-Sportmaschine (1913); Mitte: Formbauteil aus Birken-Pressschichtholz; rechts: Propeller aus verleimten Furnieren (Schwab, 1987).....	14
Abbildung 13: Aufbau eines Flügels der De Havilland "Mosquito" in Holzbauweise	15
Abbildung 14: links: Verbindungsmittel im Flugzeugbau aus "Sperrholz"; rechts: Formen von Propellern aus Sperrholz (Haffner, 1922)	16
Abbildung 15: Fügearten im Flugzeugbau bei 3-schichtigem Sperrholz (Elmendorf, 1919)	16
Abbildung 16: Schäftungen von Einzelfurnieren an "Flugzeugsperrholz" (Elmendorf, 1919).....	17
Abbildung 17: Schalenbauweise in Holz nach Zapatta (Küch, 1942).....	17
Abbildung 18: Werbung für "Plymold" (USA, 1943) (Reich, 1996).....	17
Abbildung 19: links: Querschnitt durch eine Flugzeugtragfläche; rechts: Materialaufbau (12 Holz, 13 Aluminium, 14 Zelluloid) (Auld, 1928).....	18
Abbildung 20: links: Matritze für ein U-Profil; rechts: fertiges U-Profil aus Furnierschichtholz (Jensen, 1941).....	18
Abbildung 21: links: verpressen zweier U-Profile zu einem I-Profil; rechts: I-Profil als Tragflächenaussteifung (Jensen, 1941)	19
Abbildung 22: links: Tragflächen aus einer Wabenkonstruktion; rechts: wickeln der Einzelzellen über die gewünschte Form (Atwood, 1934).....	19
Abbildung 23: links: verschiedene Profile aus Furnieren; rechts: Säulen aus verleimten Furnieren (Fischer, 1941).....	20
Abbildung 24: Festigkeitseigenschaften von veredelten Hölzern im Maschinenbau (Kollmann, 1936)	20
Abbildung 25: links: Karosserieboden aus Sperrholz; rechts: fertig verputzte Karosserie (Kollmann, 1936).....	21
Abbildung 26: Holzschraube am D-LZ 129 Hindenburg (Kollmann, 1936)	21

Abbildung 27: links: wickeln des Fasses mit Furnierstreifen; Mitte: Pressvorgang; rechts: fertiger Fassmantel (Rüsch, Sander, 1941)	21
Abbildung 28: Troutner`s Erfindungen aus Furnierschichtholz (Reich, 1996).....	22
Abbildung 29: Kerto S, Furnierschichtholzplatte aus Fichte (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013)24	
Abbildung 30: Herstellungsprozess Kerto (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013).....	24
Abbildung 31: links: Produkte aus BauBuche; rechts: möglicher Einsatzbereich der Baubuche (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, 2014a)	25
Abbildung 32: charakteristische Festigkeitswerte und E-Moduln der BauBuche S (ohne Querlagen) und Baubuche Q (mit Querlagen) (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, 2014b).....	25
Abbildung 33: links: blau: Verteilung von Splint- und Kernholz längs der Stammachse, rot: Verteilung von juvenilem und adultem Holz (Brandner, Thiel, 2015); rechts: Verteilung von Zugfestigkeit, Zug-E-Modul und Rohdichte über den Querschnitt (Schickhofer, 2006).....	26
Abbildung 34: Quer-, Radial- und Tangentialschnitt durch einen Baumstamm (Moro et al., 2009)	27
Abbildung 35: schematische Darstellung der Eigenschaften im Holz in radialer Richtung (Brandner, Thiel, 2015) in Anlehnung an Bendtsen (1978)).....	28
Abbildung 36: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast einer Lärche in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau, 1951)	29
Abbildung 37: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast einer Birke in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau, 1951)	30
Abbildung 38: Porigkeit von Laubhölzern (Schickhofer, 2006)	32
Abbildung 39: Makroskopische Struktur der Fichte; von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und ein Halbradialschnitt eines Massivholzes (Wagenführ, Scheiber, 1985)	34
Abbildung 40: Mikro- und Makroskopische Struktur der Buche; von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und Messerfurnier (Tangentialschnitt) (Wagenführ, Scheiber, 1985).....	36
Abbildung 41: Makroskopische Struktur der Birke, von links: Querschnitt, Tangentialschnitt und Schäl furnier (Tangentialschnitt) (Wagenführ, Scheiber, 1985)	38
Abbildung 42: Bezeichnung der Abmessungen der Probekörper, Kennzeichnung der Faserrichtung des Deckfurniers bzw. der Längslagen (links: flachkant; rechts: hochkant)	39
Abbildung 43: links: Zusammenhang von Rohdichte mit E-Modul (Korrelationskoeffizient = 0,838); rechts: Zusammenhang von Rohdichte Biegefestigkeit (Korrelationskoeffizient = 0,754) (Fonselius, 1997).....	41
Abbildung 44: Vergleich von Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung parallel zur Faserrichtung (a, b und c) und rechtwinklig zur Faserrichtung (a´, b´ und c´) (Buchelt, Pfriem, 2011).....	42
Abbildung 45: Mittelwerte mechanischer Kennwerte von Buchenvollholz und Furnierschichtholz vor (Spalte „Control“) und nach dem Alterungsprozess (Spalte „Test“); Werte in Klammern zeigen die Standardabweichung (n=30) (Çolak et al., 2007).....	45
Abbildung 46: Mittelwerte der Biegefestigkeit von Fichten - Vollholz und Furnierschichtholz; Werte in Klammern zeigen die Standardabweichung (n=30) (Çolak et al., 2007)	45
Abbildung 47: Vergleich von (a) Zugfestigkeit, (b) Bruchdehnung und (c) E-Modul von längs- und quergemesserten Furnieren parallel zur Faserrichtung (Pfriem, Buchelt, 2011).....	46

Abbildung 48: Vergleich von (a) Zugfestigkeit, (b) Bruchdehnung und (c) E-Modul von längs- und quergemesserten Furnieren senkrecht zur Faserrichtung (Pfriem, Buchelt, 2011)	47
Abbildung 49: Seitenansicht von gerissenen Furnieren unter dem Mikroskop (Palubicki et al., 2010)	47
Abbildung 50: Schälvorgang (Darmawan et al., 2015)	48
Abbildung 51: Mikrorisse bei unterschiedlichen Furnierdicken, von oben beginnend (1,5 mm; 2,0 mm, 2,5 mm; 3,0 mm)	49
Abbildung 52: Zusammenhang von E-Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit von Furnierdicke und Frequenz von Mikrorissen (Darmawan et al., 2015)	50
Abbildung 53: verdichten der Einzelfurniere (Gaff, Gasparik, 2015)	50
Abbildung 54: oben: Probekörperbezeichnung; unten: Mittelwerte der Biegefestigkeiten der unterschiedlichen Prüfkörper (Gaff, Gasparik, 2015)	51
Abbildung 55: Darstellung des Größeneffekts (Schickhofer, 2006)	52
Abbildung 56: Ergebnisse aus Zug- und Biegeversuch an Buchenfurnieren (Buchelt, Wagenführ, 2008)	53
Abbildung 57: Zugfestigkeit der Birke in Abhängigkeit der Faserrichtung (Kraemer, 1929)	54
Abbildung 58: E-Modul und Biegesteifigkeit von Furnierschichtholz mit unterschiedlicher Dicke, Kochtemperatur und Pressdruck des Druckbalkens (Daoui et al., 2011)	55
Abbildung 59: Furnierfügemaschine aus den 30iger Jahren (Klotz, 1940)	57
Abbildung 60: Fügearten nach Vorreiter (1963)	58
Abbildung 61: Stumpfer Stoß	58
Abbildung 62: Furniere verbunden mit Fugenband; rechts: Furnierband	59
Abbildung 63: Furnierhandklebegerät der Fa. Kuper	59
Abbildung 64: Überlappungsstoß bei einer Furnierschichtholzplatte "Microlam"	60
Abbildung 65: Schäftung bei einer Furnierschichtholzplatte "Kerto S"	60
Abbildung 66: Durchgeführte Prüfungen und ermittelte Werte	61
Abbildung 67: oben: Messern eines Fichtenstammes; unten: Schälen eines Fichtenstammes im Furnierwerk "Merkscha furnirnica"	62
Abbildung 68: links: Prüfkfiguration Kleinproben; rechts: Anbringung der DD1 am Prüfkörper, Maße in mm	64
Abbildung 69: Abmessungen der Prüfkörper für die Zugversuche an Kleinprobe, Maße in mm	65
Abbildung 70: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, ohne Stoß, Maße in mm	65
Abbildung 71: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, mit Schäftung, Maße in mm	66
Abbildung 72: Draufsicht und Längsschnitt der Prüfkörper im Mittelbereich, mit Überlappung, Maße in mm	66
Abbildung 73: Last - Verformungskurve innerhalb des Bereichs der elastischen Verformung (ÖNORM EN 789, 2005)	69

Abbildung 74: Abmessungen zur Bestimmung des E-Moduls	69
Abbildung 75: Prüfkfiguration für Zugprüfungen nach EN 408, Maße in mm.....	71
Abbildung 76: Anbringung der lokalen Wegmessung; links: Befestigung mit Schrauben; rechts: Befestigung mit Klemmen.....	71
Abbildung 77: Abmessungen der Prüfkörper für die Zugprüfung, Maße in mm.....	72
Abbildung 78: Herstellungsprozess der Prüfkörper für Zug- und Hochkantbiegeversuche.....	73
Abbildung 79: 12-schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Furnieren, Querschnitt; v.l.n.r.: Birke, Fichte und Buche.....	74
Abbildung 80: 6-schichtiger Aufbau aus 3,0 mm Buchenfurnieren, Querschnitt	74
Abbildung 81: 11-schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Buchenfurnieren, Querschnitt	74
Abbildung 82: links: 11- schichtiger Aufbau aus 1,5 mm Buchenfurnieren, Querschnitt, inklusiver zweier Querlagen; rechts: fügen der Längslagen mittels Furnierband	75
Abbildung 83: links: Befestigung der Wegaufnehmer; rechts: Prüfkörper zentriert zwischen den Klemmbacken.....	76
Abbildung 84: Prüfanordnung für die Prüfung des Schubfeldes nach ÖNORM EN 408, 2012	77
Abbildung 85: schematische Darstellung der Prüfkfiguration der Hochkantbiegeprüfungen, Maße in mm.....	78
Abbildung 86: Prüfkfiguration bei Hochkantbiegeprüfungen.....	78
Abbildung 87: Messeinrichtung zur Messung von Verzerrungen am Schubfeld.....	79
Abbildung 88: links: lokale Wegmessung Serie 1; rechts: lokale Wegmessung Serie 2	79
Abbildung 89: links: Kipphalterungen der Serie 1;rechts: Kipphalterungen der Serie 2	80
Abbildung 90: Abmessungen der Prüfkörper für die Hochkantbiegeprüfungen, Maße in mm	80
Abbildung 91: Anbringung von Kipphalterungen und Messinstrumenten.....	82
Abbildung 92: Beispiel einer typischen Hystereseschleife	82
Abbildung 93: Auswertung Schubfeld (Bogensperger, 2012)	84
Abbildung 94: Abmessungen zur Bestimmung des E-Moduls	84
Abbildung 95: Prüfkfiguration für Prüfkörper ohne Querlagen, Laschen aus Stahl	86
Abbildung 96: Prüfkfiguration für Prüfkörper mit Querlagen, Laschen aus Holz	86
Abbildung 97: Prüfkörpergeometrie der Schubprüfungen nach Ehrhart (2014)	87
Abbildung 98: Schichtaufbau; v.l.n.r.: Bu_LL, Bu_QL2, BU_QL3, Bu_QL2m.....	87
Abbildung 99: Unterschied zwischen Prüfkörper (grün) und Systemprüfkörper (rot).....	88
Abbildung 100: Herstellung des Systemprüfkörpers, Laschen aus Holz	89
Abbildung 101: Herstellung des Systemprüfkörpers, Laschen aus Stahl.....	90
Abbildung 102: links: anbringen der Halterung für die Wegaufnehmer; Mitte: Leithölzchen zur Zentrierung des Prüfkörpers; rechts: Systemprüfkörper inklusive der Befestigungen für die Messeinrichtung	91
Abbildung 103: Prüfkfiguration der Schubprüfungen nach Hirschmann (2011)	93

Abbildung 104: links: Prüfkörpergeometrie der Schubprüfungen nach Hirschmann; rechts: Schichtaufbau, ohne Querlagen und mit Querlagen.....	94
Abbildung 105: Unterschied zwischen Prüfkörper (grün) und Systemprüfkörper (rot).....	95
Abbildung 106: links: anbringen der Halterung für die Wegaufnehmer; Mitte: Leithölzchen zur Zentrierung des Prüfkörpers; rechts: Seitenansicht des Systemprüfkörpers	97
Abbildung 107: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 1-schichtig ohne Stoß	99
Abbildung 108: typisches Versagensbild; 1-schichtig mit Schäftung.....	99
Abbildung 109: links: Zugfestigkeit $f_{t,0}$; rechts: E-Modul $E_{t,0}$	100
Abbildung 110: links: Querschnittsverringering infolge Schäftung, rot markiert; rechts: Versagen der Klebefuge am Prüfkörper Z_S_04.....	101
Abbildung 111: typisches Versagensbild; 1-schichtig mit Schäftung.....	101
Abbildung 112: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 3-schichtig ohne Stoß	102
Abbildung 113: typisches Versagensbild, Splitterbruch; 3-schichtig mit Schäftung	103
Abbildung 114: oben: Seitenansicht der Überlappung; unten: typisches Versagensbild, 3-schichtig mit Überlappung	103
Abbildung 115: links: Zugfestigkeit $f_{t,0}$; rechts: E-Modul $E_{t,0}$	104
Abbildung 116: Vergleich der Mittelwerte der Zugfestigkeit $f_{t,0}$ von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau.....	105
Abbildung 117: Vergleich der Mittelwerte der E-Moduln $E_{t,0}$ von 1-schichtigem und 3-schichtigem Aufbau.....	105
Abbildung 118: links: Auftreten von Initialrissen; rechts: schematische Darstellung eines Kraft-Weg Diagramms	106
Abbildung 119: typische Versagensbilder; Buche 12 – schichtig.....	107
Abbildung 120: typische Versagensbilder; Birke 12 – schichtig	108
Abbildung 121: typische Versagensbilder; Fichte 12 - schichtig.....	108
Abbildung 122: typische Versagensbilder; Buche 6 - schichtig.....	109
Abbildung 123: typisches Versagensbild; Buche 11 – schichtig	110
Abbildung 124: typische Versagensbilder, Buche 11 - schichtig mit Querlagen.....	110
Abbildung 125: Zugfestigkeit $f_{t,0}$	112
Abbildung 126: links: lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}	113
Abbildung 127: Zugfestigkeit $f_{t,0,1}$	115
Abbildung 128: links: lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}	116
Abbildung 129: links: lokaler E-Modul $E_{m,1}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}	120
Abbildung 130: Schubmodul G	121
Abbildung 131: links: lokaler E-Modul $E_{m,1}$; rechts: dynamischer E-Modul E_{dyn}	122
Abbildung 132: Schubmodul G	123
Abbildung 133: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig ohne Querlagen	124

Abbildung 134: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)	125
Abbildung 135: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 3, 9)	126
Abbildung 136: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 3 Querlagen (Schicht 2, 6, 10) ..	126
Abbildung 137: links: Rollschubfestigkeit f_r ; rechts: Schubmodul G	127
Abbildung 138: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig ohne Querlagen	129
Abbildung 139: typische Versagensbilder, Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2,10)	130
Abbildung 140: Bruchspannung τ	131

A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialkennwerte von Holzarten, welche im Flugzeugbau eingesetzt wurden (Haffner, 1922).....	15
Tabelle 2: charakteristische Festigkeitswerte und E-Moduln für Kerto S in N/mm ² (Mätsa Wood Deutschland GmbH, 2013).....	24
Tabelle 3: Zellarten samt Funktionen von Nadelhölzern nach Grosser (1977).....	29
Tabelle 4: Zellarten samt Funktionen von Laubhölzern nach Grosser (1977)	31
Tabelle 5: mechanische Kennwerte von Fichtenholz an fehlerfreien Kleinproben.....	34
Tabelle 6: mechanische Kennwerte von Buchenholz an fehlerfreien Kleinproben.....	36
Tabelle 7: mechanische Kennwerte von Birkenholz an fehlerfreien Kleinproben.....	38
Tabelle 8: durchschnittliches Quell- und Wasserabsorptionsverhalten von Furnierschichtholz nach Wärmebehandlung mit unterschiedlichen Temperaturen; modifiziert nach Nazerian (2011)	43
Tabelle 9: durchschnittliche Biegefestigkeit und E-Modul von Furnierschichtholz; modifiziert nach Nazerian (2011).....	44
Tabelle 10: Zusammenfassung der Mittelwerte von E-Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit des Klebstoffsystems (Bal, Bektas, 2012)	56
Tabelle 11: verwendete Furniere	62
Tabelle 12: Zugversuche an Kleinproben.....	63
Tabelle 13: Prüfgeschwindigkeit, $F_{0,5}$ und Prüfzeit.....	67
Tabelle 14: Serien an Zugversuchen	70
Tabelle 15: Klemmdruck und $F_{0,5,est}$ der unterschiedlichen Prüfserien.....	75
Tabelle 16: Serien an Hochkantbiegeprüfungen	77
Tabelle 17: Schichtaufbau der Schubprüfungen nach Ehrhart (2014).....	85
Tabelle 18: Prüfgeschwindigkeit, $0,5 F_{est}$ und durchschnittliche Zeit bis zum Erreichen der Maximallast	91
Tabelle 19: Schichtaufbau der Schubprüfungen nach Hirschmann (2011)	93
Tabelle 20: Prüfgeschwindigkeit, $0,5 F_{est}$ und durchschnittliche Zeit bis zum Erreichen der Maximallast	97

Tabelle 21: Einzelergebnisse; 1-schichtig ohne Stoß.....	98
Tabelle 22: Einzelergebnisse; 1-schichtig mit Schäftung.....	99
Tabelle 23: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ und E-Modul $E_{t,0}$; 1-schichtiger Aufbau.....	100
Tabelle 24: Einzelergebnisse; 3-schichtig ohne Stoß.....	102
Tabelle 25: Einzelergebnisse; 3-schichtig mit Schäftung.....	102
Tabelle 26: Einzelergebnisse; 3-schichtig mit Überlappung.....	103
Tabelle 27: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ und E-Modul $E_{t,0}$; 3-schichtiger Aufbau	104
Tabelle 28: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Buche 12 - schichtig.....	107
Tabelle 29: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Birke 12 - schichtig.....	108
Tabelle 30: Einzelergebnisse der Serie 1.1; Fichte 12 - schichtig.....	108
Tabelle 31: Einzelergebnisse der Serie 1.2; Buche 6-schichtig.....	109
Tabelle 32: Einzelergebnisse der Serie 2.1; Buche 11 - schichtig.....	109
Tabelle 33: Einzelergebnisse der Serie 2.2; Buche 11-schichtig mit Querlagen.....	110
Tabelle 34: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 1	111
Tabelle 35: Zugfestigkeit $f_{t,0}$ der Serie 1.....	111
Tabelle 36: lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$ und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 1.....	113
Tabelle 37: Faktoren zwischen den Mittelwerten der dynamischen E-Moduln $E_{dyn,mean}$ und lokalen Zug-E-Moduln $E_{t,0,1,mean}$	114
Tabelle 38: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 2	115
Tabelle 39: Zugfestigkeit $f_{t,0}$, lokaler E-Modul $E_{t,0,1}$ und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 2	115
Tabelle 40: Faktoren zwischen den Mittelwerten der dynamischen E-Moduln $E_{dyn,mean}$ und lokalen Zug-E-Moduln $E_{t,0,1,mean}$	117
Tabelle 41: Einzelergebnisse der Serie 1; Buche 12-schichtig.....	118
Tabelle 42: Einzelergebnisse der Serie 1; Birke 12-schichtig.....	118
Tabelle 43: Einzelergebnisse der Serie 1; Fichte 12-schichtig.....	118
Tabelle 44: Einzelergebnisse der Serie 2; Buche 11-schichtig.....	119
Tabelle 45: Einzelergebnisse der Serie 2; Buche 11-schichtig mit Querlagen.....	119
Tabelle 46: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 1	120
Tabelle 47: lokaler Biege-E-Modul $E_{m,0,1}$, Schubmodul G und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 1	120
Tabelle 48: Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH} der Serie 2	122
Tabelle 49: lokaler Biege-E-Modul $E_{m,0,1}$, Schubmodul G und dynamischer E-Modul E_{dyn} der Serie 2	122
Tabelle 50: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit Längslagen	124
Tabelle 51: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)	125
Tabelle 52: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 3, 9)	125

Tabelle 53: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 3 Querlagen (Schicht 2, 6, 10)	126
Tabelle 54: Rohdichte ρ_{FSH}	127
Tabelle 55: Rollschubfestigkeit f_r und Schubmodul G	127
Tabelle 56: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig ohne Querlagen.....	129
Tabelle 57: Einzelergebnisse; Buche 11-schichtig mit 2 Querlagen (Schicht 2, 10)	130
Tabelle 58: Bruchspannung τ , Rohdichte ρ_{FSH} und Holzfeuchte u_{FSH}	130

ANHANG B ERGEBNISSE DER PRÜFUNGEN

Auswertung Zugprüfungen nach an Kleinproben - 1-schichtig			
	Z_G	Z_S	
Zugfestigkeit f_t [N/mm²]			
Anzahl	5	4	
Max	177,0	148,8	
Min	143,2	120,2	
Mittelwert	157,7	132,7	
Median	159,8	130,8	
Stabw.	13,3	13,5	
COV [%]	8,4%	10,2%	
E-Modul $E_{t,0}$ [N/mm²]			
Anzahl	4	4	
Max	17.312	24.690	
Min	15.941	18.653	
Mittelwert	16.725	21.678	
Median	16.823	21.684	
Stabw.	642	2.517	
COV [%]	3,8%	11,6%	
Bruchkraft F_{max} [kN]			
Anzahl	5	5	
Max	10,6	9,5	
Min	8,9	4,7	
Mittelwert	9,7	7,5	
Median	9,9	7,6	
Stabw.	0,7	1,8	
COV [%]	7,7%	23,8%	

Bezeichnung	F_{max} [kN]	$f_{t,0}$ [N/mm²]	$E_{t,0}$ [N/mm²]	dF/dw lokal [-]
Z_G_01	10,6	177,0	-	-
Z_G_02	8,9	143,2	16.464	0,99910
Z_G_03	9,9	160,9	17.181	0,99950
Z_G_04	9,9	159,8	17.312	0,99910
Z_G_05	8,9	147,4	15.941	0,99830
Z_S_01	7,4	120,2	-	-
Z_S_02	9,5	148,8	24.690	0,99980
Z_S_03	7,6	122,9	22.311	0,99930
Z_S_04*	4,7	76,6	21.057	0,99980
Z_S_05	8,6	138,8	18.653	0,99940

*Ausreiser, bei Berechnung der Zugfestigkeit nicht berücksichtigt

Auswertung Zugprüfungen an Kleinproben, 3 - schichtig			
	Z3_G	Z3_S	Z3_U
Zugfestigkeit f_t [N/mm²]			
Anzahl	5	5	5
Max	172,7	162,4	120,5
Min	140,1	136,4	93,4
Mittelwert	152,0	149,4	106,9
Median	151,7	148,9	105,9
Stabw.	12,8	10,8	13,2
COV [%]	8,4%	7,2%	12,4%
E-Modul $E_{t,0}$ [N/mm²]			
Anzahl	4	4	4
Max	17.107	18.960	19.421
Min	15.501	16.921	17.298
Mittelwert	16.271	18.118	18.481
Median	16.237	18.296	18.603
Stabw.	676	967	882
COV [%]	4,2%	5,3%	4,8%
Bruchkraft F_{max} [kN]			
Anzahl	5	5	5
Max	31,7	31,0	25,7
Min	25,9	26,2	20,4
Mittelwert	28,1	28,6	22,6
Median	27,9	29,0	22,9
Stabw.	2,3	2,0	2,1
COV [%]	8,1%	7,1%	9,4%

Bezeichnung	F_{max} [kN]	$f_{t,0}$ [N/mm²]	$E_{t,0}$ [N/mm²]	ρ_{FSH} [kg/m³]	u_{FSH} [%]	dF/dw_{lokal} [-]
Z3_G_01	25,9	140,1	-			-
Z3_G_02	31,7	172,7	16.039			0,99950
Z3_G_03	28,3	152,8	15.501	710 ¹⁾	9,6 ²⁾	0,99960
Z3_G_04	26,6	142,7	16.435			0,99910
Z3_G_05	27,9	151,7	17.107			0,99940
Z3_S_01	27,0	141,7	-			-
Z3_S_02	30,1	157,4	18.960			0,99950
Z3_S_03	26,2	136,4	16.921	710 ¹⁾	9,6 ²⁾	0,99960
Z3_S_04	29,0	148,9	17.748			0,99930
Z3_S_05	31,0	162,4	18.843			0,99950
Z3_U_01	22,9	120,5	-			-
Z3_U_02	20,4	93,4	19.421			0,99930
Z3_U_03	20,7	94,7	18.507	710 ¹⁾	9,6 ²⁾	0,99940
Z3_U_04	22,9	105,6	18.699			0,99930
Z3_U_05	25,7	120,4	17.298			0,99890

1) 2) ... Holzfeuchte und Rohdichte jeweils nur an 2 Proben bestimmt

Auswertung Zugprüfungen nach EN 408 - Serie 1				
	Bu_6n	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
Zugfestigkeit f_t [N/mm²]				
Anzahl	3	5	5	3
Max	128,7	105,5	106,4	56,4
Min	113,2	96,1	85,8	47,0
Mittelwert	123,5	100,1	96,8	50,9
Median	128,6	100,3	98,9	49,3
Stabw.	8,9	3,8	8,8	4,9
COV [%]	7,2%	3,8%	9,1%	9,6%
lokaler Zug-E-Modul $E_{t,0,l}$ [N/mm²]				
Anzahl	3	6	6	4
Max	15.266	13.144	14.778	13.199
Min	14.638	10.636	13.192	12.759
Mittelwert	14.855	11.852	14.041	12.914
Median	14.661	11.796	14.084	12.849
Stabw.	356	1.214	511	197
COV [%]	2,4%	10,2%	3,6%	1,5%
globaler Zug-E-Modul $E_{t,0,g}$ [N/mm²]				
Anzahl	3	6	6	4
Max	15.242	13.825	14.623	13.869
Min	15.049	11.263	13.479	13.164
Mittelwert	15.139	12.320	14.156	13.593
Median	15.127	11.973	14.307	13.670
Stabw.	97	1.187	492	301
COV [%]	0,6%	9,6%	3,5%	2,2%
dynamischer E-Modul E_{dyn} [N/mm²]				
Anzahl	3	6	6	4
Max	21.318	17.268	18.883	16.374
Min	20.781	15.846	17.949	15.869
Mittelwert	20.986	16.602	18.289	16.041
Median	20.859	16.525	18.125	15.961
Stabw.	290	481	397	233
COV [%]	1,4%	2,9%	2,2%	1,5%
Bruchkraft F_{max} [kN]				
Anzahl	3	5	5	3
Max	368	291	312	162
Min	314	267	258	135
Mittelwert	346	280	289	146
Median	358	279	298	143
Stabw.	29	10	24	14
COV [%]	8,3%	3,7%	8,3%	9,3%

Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]				
Anzahl	3	6	6	4
Max	807	794	816	625
Min	790	746	780	606
Mittelwert	799	758	804	617
Median	800	752	808	618
Stabw.	8	18	14	8
COV [%]	1,0%	2,3%	1,8%	1,4%
Holzfeuchte u_{FSH} [%]				
Anzahl	3	6	6	4
Max	11,7	14,7	16,2	18,7
Min	11,3	13,1	13,4	17,2
Mittelwert	11,5	13,9	14,8	17,9
Median	11,5	13,8	14,6	17,9
Stabw.	0,2	0,7	1,0	0,6
COV [%]	1,8%	4,7%	6,7%	3,5%

Bez.	F_{max} [kN]	f_{t,0} [N/mm ²]	E_{t,0,l} [N/mm ²]	E_{t,0,g} [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	dF/dw_{lokal} [-]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_6n_01	367,6	128,7	14.638	15.127	21.318	-0,99990	807	11,7
Bu_6n_02	357,9	128,6	14.661	15.242	20.781	-0,99990	790	11,3
Bu_6n_03	313,9	113,2	15.266	15.049	20.859	-0,99990	800	11,5
Bu_12n_01	266,7	96,8	10.821	11.405	16.945	-0,99990	752	13,8
Bu_12n_02	278,6	100,3	10.636	11.271	16.522	-0,99990	757	14,5
Bu_12n_03	291,3	105,5	10.795	11.263	17.268	-0,99990	794	13,8
Bu_12n_04	288,4	101,5	12.945	13.616	16.528	-0,99994	746	13,1
Bu_12n_05	273,3	96,1	13.144	13.825	16.501	-0,99993	750	13,2
Bu_12n_E01	-	-	12.771	12.541	15.846	-0,99997	752	14,7
Bi_12n_01	268,3	89,7	14.062	14.446	17.972	-0,99991	795	14,7
Bi_12n_02	258,2	85,8	13.915	14.169	18.050	-0,99992	805	16,2
Bi_12n_03	298,2	98,9	13.192	13.638	17.949	-0,99990	816	15,6
Bi_12n_04	306,0	103,4	14.105	14.623	18.682	-0,99991	811	14,5
Bi_12n_05	311,8	106,4	14.193	14.581	18.883	-0,99990	816	14,3
Bi_12n_E01	-	-	14.778	13.479	18.199	-0,99993	780	13,4
Fi_12n_01	135,2	47,0	12.887	13.683	15.892	-0,99999	614	18,0
Fi_12n_02	142,5	49,3	12.759	13.658	16.031	-0,99999	622	17,7
Fi_12n_03	161,5	56,4	13.199	13.869	16.374	-0,99999	625	18,7
Fi_12n_E01	-	-	12.811	13.164	15.869	-0,99999	606	17,2

Auswertung Zugprüfungen nach EN 408 - Serie 2		
	Bu_11N	Bu_11N_QL
Zugfestigkeit f_t [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	81,3	70,7
Min	70,4	68,5
Mittelwert	76,4	69,4
Median	79,1	69,6
Stabw.	5,0	0,9
COV [%]	6,5%	1,3%
lokaler Zug-E-Modul $E_{t,0,l}$ [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	12.625	10.526
Min	12.282	10.281
Mittelwert	12.500	10.426
Median	12.511	10.485
Stabw.	131	107
COV [%]	1,0%	1,0%
globaler Zug-E-Modul $E_{t,0,g}$ [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	13.636	11.331
Min	13.239	11.027
Mittelwert	13.498	11.154
Median	13.578	11.091
Stabw.	169	129
COV [%]	1,3%	1,2%
dynamischer E-Modul E_{dyn} [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	15.716	13.484
Min	15.445	13.219
Mittelwert	15.590	13.369
Median	15.596	13.396
Stabw.	112	99
COV [%]	0,7%	0,7%
Bruchkraft F_{max} [kN]		
Anzahl	5	5
Max	205	179
Min	180	172
Mittelwert	194	175
Median	202	175
Stabw.	13	3
COV [%]	6,6%	1,5%

Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]		
Anzahl	5	5
Max	760	778
Min	751	749
Mittelwert	757	761
Median	758	760
Stabw.	3	11
COV [%]	0,4%	1,4%
Holzfeuchte u_{FSH} [%]		
Anzahl	5	5
Max	15,9	16,5
Min	15,5	14,7
Mittelwert	15,8	15,8
Median	15,8	15,7
Stabw.	0,2	0,7
COV [%]	1,1%	4,5%

Bezeichnung	F_{max} [kN]	f_{t,0} [N/mm ²]	E_{t,0,l} [N/mm ²]	E_{t,0,g} [N/mm ²]	E_{dyn} [N/mm ²]	dF/dw_{lokal} [-]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_01	205,5	81,3	12.511	13.414	15.596	-0,99995	751	15,8
Bu_11n_02	201,9	79,5	12.568	13.636	15.677	-0,99994	758	15,7
Bu_11n_03	179,6	70,4	12.282	13.578	15.445	-0,99994	758	15,9
Bu_11n_04	201,5	79,1	12.625	13.239	15.517	-0,99995	755	15,9
Bu_11n_05	180,0	71,7	12.511	13.620	15.716	-0,99993	760	15,5
Bu_11n_QL_01	174,9	69,6	10.485	11.248	13.409	-0,99994	758	15,6
Bu_11n_QL_02	172,0	68,5	10.526	11.331	13.484	-0,99997	749	14,7
Bu_11n_QL_03	176,8	69,8	10.344	11.091	13.336	-0,99996	762	15,7
Bu_11n_QL_04	178,7	70,7	10.281	11.027	13.219	-0,99998	760	16,3
Bu_11n_QL_05	173,9	68,5	10.495	11.072	13.396	-0,99996	778	16,5

Auswertung Hochkantbiegeprüfung nach EN 408 - Serie 1			
	Bu_12n	Bi_12n	Fi_12n
E-Modul lokal 1.Ast $E_{m,l}$ [N/mm²]			
Anzahl	5	5	3
Max	18.746	19.670	17.703
Min	16.992	18.833	17.062
Mittelwert	17.486	19.373	17.415
Median	17.251	19.407	17.479
Stabw.	713	327	326
COV [%]	4,1%	1,7%	1,9%
E-Modul lokal 2.Ast $E_{m,l}$ [N/mm²]			
Anzahl	5	5	3
Max	18.461	19.894	18.108
Min	17.117	18.902	17.777
Mittelwert	17.556	19.548	17.951
Median	17.411	19.667	17.968
Stabw.	522	380	166
COV [%]	3,0%	1,9%	0,9%
G-Modul lokal 1.Ast G [N/mm²]			
Anzahl	5	5	3
Max	733	1.060	644
Min	686	961	604
Mittelwert	704	1.010	620
Median	700	1.006	613
Stabw.	19	37	21
COV [%]	2,7%	3,7%	3,3%
G-Modul lokal 2.Ast G [N/mm²]			
Anzahl	5	5	3
Max	737	1.088	659
Min	711	1.006	627
Mittelwert	720	1.036	641
Median	713	1.034	638
Stabw.	12	31	16
COV [%]	1,6%	3,0%	2,5%
dynamischer E-Modul E_{dyn} [N/mm²]			
Anzahl	5	5	3
Max	16.363	18.396	16.356
Min	15.846	17.589	15.839
Mittelwert	16.160	18.147	16.167
Median	16.232	18.227	16.307
Stabw.	196	321	286
COV [%]	1,2%	1,8%	1,8%

Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]			
Anzahl	5	5	3
Max	768	791	609
Min	752	775	607
Mittelwert	756	782	608
Median	753	780	608
Stabw.	7	6	1
COV [%]	0,9%	0,8%	0,1%
Holzfeuchte u_{FSH} [%]			
Anzahl	5	5	3
Max	15,6	15,1	17,6
Min	14,6	13,2	16,9
Mittelwert	15,1	13,9	17,2
Median	15,2	13,7	17,2
Stabw.	0,6	0,8	0,4
COV [%]	4,2%	5,5%	2,0%

Bez.	$E_{m,l;1.Ast}$ [N/mm²]	$E_{m,l;2.Ast}$ [N/mm²]	$G_{1.Ast}$ [N/mm²]	$G_{2.Ast}$ [N/mm²]	E_{dyn} [N/mm²]	ρ_{FSH} [kg/mm³]	u_{FSH} [%]
Bu_12n_01a	18746	18.461	689	737	15.846	752	14,7
Bu_12n_02	16992	17.117	733	713	16.117	768	15,6
Bu_12n_03	17272	17.411	686	713	16.243	753	15,2
Bu_12n_04	17169	17.335	700	711	16.232	756	15,3
Bu_12n_05	17251	17.458	711	728	16.363	753	14,6
Bi_12n_01	19407	19.703	961	1006	18.199	780	13,4
Bi_12n_02	19670	19.894	1.060	1088	18.324	785	14,2
Bi_12n_03	18833	18.902	1.006	1036	17.589	791	15,1
Bi_12n_04	19366	19.573	994	1017	18.227	775	13,2
Bi_12n_05	19590	19.667	1.032	1034	18.396	779	13,7
Fi_12n_01	17062	17.777	604	627	15.839	607	17,2
Fi_12n_02	17703	18.108	644	638	16.307	609	17,6
Fi_12n_03	17479	17.968	613	659	16.356	608	16,9

Auswertung Hochkantbiegeprüfung nach EN 408 - Serie 2		
	Bu_11n	Bu_11n_QL
E-Modul lokal 1.Ast $E_{m,l}$ [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	16.595	13.891
Min	16.044	13.626
Mittelwert	16.269	13.707
Median	16.288	13.681
Stabw.	229	107
COV [%]	1,4%	0,8%
E-Modul lokal 2.Ast $E_{m,l}$ [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	17.789	14.657
Min	17.166	14.071
Mittelwert	17.477	14.351
Median	17.469	14.424
Stabw.	284	252
COV [%]	1,6%	1,8%
G-Modul lokal 1.Ast G [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	709	706
Min	646	671
Mittelwert	683	687
Median	691	681
Stabw.	24	15
COV [%]	3,6%	2,2%
G-Modul lokal 2.Ast G [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	724	717
Min	689	696
Mittelwert	712	705
Median	719	706
Stabw.	14	9
COV [%]	1,9%	1,3%
dynamischer E-Modul E_{dyn} [N/mm²]		
Anzahl	5	5
Max	15.716	13.484
Min	15.445	13.219
Mittelwert	15.590	13.369
Median	15.596	13.396
Stabw.	112	99
COV [%]	0,7%	0,7%

Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]		
Anzahl	5	5
Max	760	778
Min	751	749
Mittelwert	757	761
Median	758	760
Stabw.	3	11
COV [%]	0,4%	1,4%
Holzfeuchte u_{FSH} [%]		
Anzahl	5	5
Max	15,9	16,5
Min	15,5	14,7
Mittelwert	15,8	15,8
Median	15,8	15,7
Stabw.	0,2	0,7
COV [%]	1,1%	4,4%

Bezeichnung	$E_{m,l;1.Ast}$ [N/mm²]	$E_{m,l;2.Ast}$ [N/mm²]	$G_{1.Ast}$ [N/mm²]	$G_{2.Ast}$ [N/mm²]	E_{dyn} [N/mm²]	ρ_{FSH} [kg/mm³]	u_{FSH} [%]
Bu_11n_01	16060	17.225	675	709	15.596	751	15,8
Bu_11n_02	16288	17.734	709	719	15.677	758	15,7
Bu_11n_03	16044	17.789	691	724	15.445	758	15,9
Bu_11n_04	16358	17.166	646	689	15.517	755	15,9
Bu_11n_05	16595	17.469	695	719	15.716	760	15,5
Bu_11n_QL_01	13637	14.112	681	711	13.409	758	15,7
Bu_11n_QL_02	13699	14.424	700	697	13.484	749	14,7
Bu_11n_QL_03	13626	14.071	677	696	13.336	762	15,7
Bu_11n_QL_04	13681	14.491	671	706	13.219	760	16,3
Bu_11n_QL_05	13891	14.657	706	717	13.396	778	16,5

Auswertung Schubprüfungen nach „Ehrhart“			
	Bu_QL2	Bu_QL3	Bu_QL2m
Rollschubfestigkeit f_r [N/mm²]			
Anzahl	6	6	6
Max	5,7	6,4	6,1
Min	5,2	5,4	5,2
Mittelwert	5,4	6,0	5,5
Median	5,4	6,1	5,4
Stabw.	0,2	0,3	0,4
COV [%]	3,9%	5,8%	6,7%
Schubmodul G [N/mm²]			
Anzahl	6	6	6
Max	516,4	512,9	408,1
Min	413,9	333,6	326,0
Mittelwert	458,2	431,3	376,8
Median	454,4	439,9	383,1
Stabw.	38,1	67,4	29,7
COV [%]	8,3%	15,6%	7,9%
Bruchkraft F_{max} [kN]			
Anzahl	6	6	6
Max	60,1	68,2	65,5
Min	55,6	57,6	55,4
Mittelwert	57,7	64,5	59,2
Median	57,6	64,9	58,1
Stabw.	1,9	3,8	4,2
COV [%]	3,3%	5,9%	7,0%
Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]			
Anzahl	6	6	6
Max	750,5	774,8	747,3
Min	730,6	750,9	724,9
Mittelwert	740,6	761,8	737,6
Median	740,5	761,5	736,9
Stabw.	7,6	10,0	8,2
COV [%]	1,0%	1,3%	1,1%

Bezeichnung	F_{max} [kN]	f_r [N/mm ²]	G_r [N/mm ²]	dF/dw_{lokal} [-]	ρ_{FSH} [kg/m ³]	u_{FSH} [%]	t [s]
Bu_QL2_01	58,3	5,43	475	-0,9997	746	14,3	264
Bu_QL2_02	56,8	5,30	414	-0,9996	736	14,3	253
Bu_QL2_03	55,7	5,20	478	-0,9996	736	14,3	258
Bu_QL2_04	55,6	5,18	434	-0,9995	731	14,3	251
Bu_QL2_05	60,1	5,68	516	-0,9995	751	14,3	239
Bu_QL2_06	59,5	5,58	433	-0,9993	745	14,3	249
Bu_QL3_01	68,2	6,37	513	-0,9997	763	14,0	342
Bu_QL3_02	65,7	6,18	334	-0,9996	760	14,0	310
Bu_QL3_03	67,3	6,26	446	-0,9993	751	14,0	312
Bu_QL3_04	64,1	5,98	433	-0,9990	771	14,0	264
Bu_QL3_05	57,6	5,38	487	-0,9996	751	14,0	243
Bu_QL3_06	64,0	5,98	375	-0,9994	775	14,0	283
Bu_QL2m_01	56,6	5,26	362	-0,9997	745	0,1	251
Bu_QL2m_02	55,4	5,17	408	-0,9996	725	0,1	255
Bu_QL2m_03	59,6	5,59	389	-0,9996	734	0,1	267
Bu_QL2m_04	62,8	5,86	377	-0,9994	737	0,1	270
Bu_QL2m_05	65,5	6,06	326	-0,9996	747	0,1	286
Bu_QL2m_06	55,6	5,23	399	-0,9994	737	0,1	235

Auswertung Schubprüfungen nach „Hirschmann“		
	Bu_LL	Bu_QL
Bruchspannung τ_v [N/mm²]		
Anzahl	6	6
Max	11,4	12,4
Min	9,6	10,8
Mittelwert	10,8	11,9
Median	10,9	12,0
Stabw.	0,6	0,6
COV [%]	5,8%	5,3%
Schubmodul G [N/mm²]		
Anzahl	6	6
Max	99,3	97,7
Min	73,7	90,3
Mittelwert	91,3	93,0
Median	94,0	92,9
Stabw.	9,1	2,6
COV [%]	10,0%	2,8%
Bruchkraft F_{max} [kN]		
Anzahl	6	6
Max	31,2	34,3
Min	25,6	30,0
Mittelwert	29,3	32,6
Median	29,8	32,4
Stabw.	2,0	1,6
COV [%]	6,8%	4,8%
Rohdichte ρ_{FSH} [kg/m³]		
Anzahl	6	6
Max	765,4	742,6
Min	724,0	721,4
Mittelwert	741,9	734,4
Median	737,8	735,3
Stabw.	17,0	7,2
COV [%]	2,3%	1,0%
Holzfeuchte u_{FSH} [%]		
Anzahl	6	6
Max	14,5	14,4
Min	13,6	13,5
Mittelwert	14,1	14,0
Median	14,2	14,1
Stabw.	0,3	0,3
COV [%]	2,4%	2,2%

Bez.	F_{max} [kN]	T_v [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	t [s]
Hi_Bu_LL_01	25,6	9,60	765	13,6	154
Hi_Bu_LL_02	29,1	10,67	724	13,8	239
Hi_Bu_LL_03	30,6	11,18	727	14,1	259
Hi_Bu_LL_04	31,2	11,38	739	14,5	280
Hi_Bu_LL_05	29,6	10,82	736	14,2	238
Hi_Bu_LL_06	29,9	10,93	760	14,3	259
Hi_Bu_QL_01	32,7	12,32	721	13,5	300
Hi_Bu_QL_02	32,2	11,61	733	14,0	336
Hi_Bu_QL_03	34,1	12,35	734	14,1	334
Hi_Bu_QL_04	30,0	10,79	736	14,4	414
Hi_Bu_QL_05	34,3	12,42	738	14,2	321
Hi_Bu_QL_06	32,2	11,64	743	13,9	268

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

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

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

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

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

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

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

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

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

Institutskennzahl:

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

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl