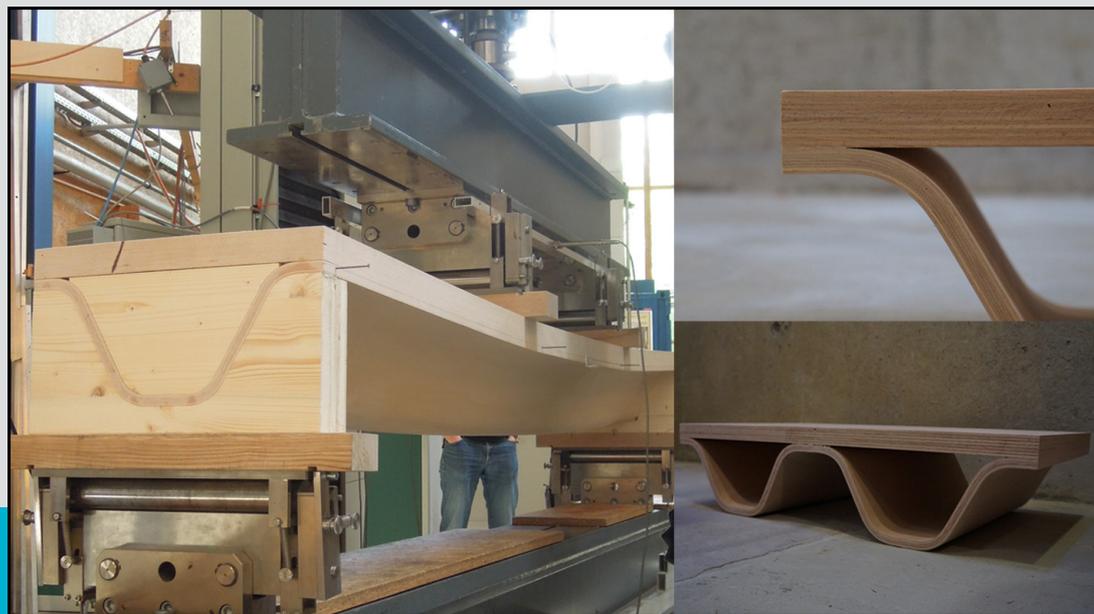


Formgepresste UHPP-Leichtbauprofile für die Herstellung von Holz-Holz-Verbundbauteilen

M-4-05/2015



Markus Bernhard Loik
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Markus Bernhard Loik, BSc

Formgepresste UHPP- Leichtbauprofile für die Herstellung von Holz-Holz- Verbundbauteilen

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
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Dipl.-Ing Markus Grabner
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Juni 2015

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

Herzlichen Dank an alle, die mich während meiner Studienzeit begleitet und mich beim Schreiben dieser Masterarbeit unterstützt haben:

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die Unterstützung während dem Verfassen meiner Masterarbeit. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle seine motivierende Begeisterungsfähigkeit für den Baustoff Holz, welche mich erst dazu gebracht hat, diese Arbeit zu verfassen.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Markus Grabner für seine begleitende Betreuung und Korrektur meiner Arbeit sowie Bernd Heissenberger, ohne den der praktische Teil sicher nicht so leicht von der Hand gegangen wäre.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich nicht nur finanziell, sondern auch mit ihrem Rat unterstützt haben.

Zu guter Letzt danke ich noch meinem Studienkollegen Robert Staudacher, der mit mir gemeinsam an diesem spannenden Projekt gearbeitet hat, dem Beton- und Holzbau Zeichensaal sowie meiner Freundin Johanna und allen anderen, die meine Studienzeit zu einer lustigen und lehrreichen Zeit gemacht haben.

Kurzfassung

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. Auf Grund dieser Situation hat die Laubholzforschung weltweit an Intensität zugenommen. In Mitteleuropa und insbesondere in den DACH – Ländern ist es vor allem die Holzart Buche, welche in großen Mengen verfügbar ist und einer stofflichen Nutzung zugeführt werden will. Eine interessante Möglichkeit, die nachwachsende Ressource „Buche“ zu nutzen, bietet die Verwendung Buchenfurnier-basierter Holzwerkstoffe zur Fertigung von Tragwerkselementen (Platte, Scheibe, Stab). Furnierlagenholzprodukte aus Buche weisen dabei höhere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften als im Baubereich hauptsächlich verwendete Nadelholzprodukte auf. Aus diesem Grund ist es möglich, vergleichsweise schlanke Bauteile auszubilden und damit den Rohstoff Holz ressourcenschonend zu nutzen.

Furnier im Baubereich dient zurzeit vorwiegend als Ausgangsmaterial zur Herstellung von stabförmigen und flächigen Bauteilen mit aufgelöster Struktur (Fachwerk, Hohldeckenelemente), als Stegmaterial für I-Träger (Schalungsträger, I-Joist), oder als Verstärkung für hochbeanspruchte Bereiche (Laschenstoß). All diese Anwendungen haben die Ebenheit des Ausgangsmaterials und des fertigen Bauprodukts gemein. An dieser Stelle knüpfen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vorstudien an. Furniere lassen sich aufgrund ihrer geringen Schichtdicke $s = 0,5$ bis $4,0$ mm mit wenig Aufwand umformen, wodurch sich mittels angepasster Umformtechnologien und -verfahren unterschiedlichste Bauteilformen fertigen lassen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen UHPP-Leichtbauprofile aus Furnierlagenholz entwickelt und hergestellt werden. Ultra High Performance Plywood (UHPP) beschreibt dabei eine neue Sparte von furnierbasierten Holzbauprodukten, welche den Einsatz von beanspruchungsoptimierten ebenen und stabförmigen Bauteilen beabsichtigt. Das „Ultrahochfeste Sperrholz“ besteht aus Schäl furnieren, die bei der Herstellung verklebt und mit Hilfe von Formpressverfahren in zweidimensional umgeformte Profile gepresst werden.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche eine zusammenfassende Darstellung bereits bekannter Furnier-Herstellverfahren und gibt einen Überblick über bekannte Umformtechnologien und -verfahren, ausgehend vom Biegeholz bis hin zu furnierbasierten Formpressprodukten. Darauf aufbauend wird ein einfaches Berechnungsmodell zur Abschätzung des Potentials eines UHPP-Bauteils mit trapezförmiger Querschnittsform, welches als Verbundquerschnitt für großflächige Decken- und Dachkonstruktionen eingesetzt werden könnte (Verbund mit unterschiedlichen Materialkombinationen z. B. Holz, Kunststoff, Beton, Metall), vorgestellt. Dieses dient zum einen zur Definition der Querschnittsgeometrie und ermöglicht zum anderen eine Querschnittsoptimierung unter Berücksichtigung der dem Verwendungszweck angepassten Beanspruchungsbedingungen. Die Ergebnisse der Parameterstudie mittels o. a. Berechnungsmodell bilden die Grundlage zur darauffolgenden Herstellung eines Biegeprüfkörpers, dessen Tragverhalten in einer anschließenden Bauteilprüfung im Prüflabor des Instituts für Holzbau und Holztechnologie, Lignum Test Center (LTC) der Technischen Universität Graz, untersucht wird. Zudem wird der, durch das ebene Furnier hervorgerufene, Rückstelleffekt des Profils an verschiedenen Querschnittsaufbauten experimentell bestimmt.

Abstract

The growth of the hardwood stock in Austria and other countries of Central Europe, such as Switzerland and Germany, increases the pressure concerning a wider utilization of wood species as for instance beech, ash, birch and maple as well as softwood such as spruce (large dimension timber), Douglas fir, pine, fir and larch. Due to this situation global intensification of research activities focusing on hardwood and its utilization can be observed. In Central Europe and in particular in the DACH-countries (Germany (D), Austria (A), Switzerland (CH)) it is mainly beech, which is available in large quantities. Therefore competitive product solutions for a prior material use of beech remain of major interest. Using beech-veneers as raw material for the production of structural elements (plate, slab, bar) seems to be a promising approach, combining technical, economic and ecological aspects. From a technical perspective laminated veneer lumber made of beech leads to higher strength and stiffness properties than comparable softwood products mainly used for timber constructions. Thus, these high performance hardwood products lead to new limits in design and to a more effective and sustainable use of wood.

Veneer in the building sector is mainly used as raw material for bar-shaped components with resolved structure (framework, hollow ceiling panels), as a web material for I-Beams (formwork beam, I-Joist) or as reinforcement parts for highly stressed areas (splice joint). What all these applications have in common is the planarity of the raw material and the final product. In contrast to former studies with emphasize on the load-bearing behavior of planar structural elements the present work comprises a preliminary study on a moulded structural component, regarding the high forming capacity of veneers. Due to their layer thickness from $s = 0,5$ to $4,0$ mm, veneers can be formed with little effort. Thus, it is possible to produce different component shapes by adapted forming technologies and processes. The main purpose of this work is to develop an UHPP-lightweight-profile made of laminated veneer lumber. Ultra High Performance Plywood (UHPP) stands for a new division of veneer based products, which intend the use of stress-optimized formed components for structural purpose. UHPP consists of peeled veneers which are glued together and then pressed in a two-dimensional profile.

The present master thesis gives an overview of veneer manufacturing processes, forming technologies and processes starting with wood bending and ending with veneer moulding. Based on a literature review a simple calculation model for assessing the potential of a UHPP component, having a trapezoidal cross-sectional shape, is presented. This trapezoidal shaped UHPP profile could be used as a composite element for large ceiling and roof structures (composite with different combinations of materials such as wood, plastic, concrete, metal). The calculation model serves to define the cross-sectional geometry of the profile and allows an optimization considering the use of adapted loading conditions. Based on the mentioned model bending-test specimens are produced and tested in the laboratory of the Institute of Timber Engineering and Wood Technology Lignum Test Center (LTC) of Graz University of Technology. In addition, the spring-back effect of the profile caused by the planar raw-material is experimentally determined at different veneer layer set-ups.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 ZIELSETZUNG	2
1-3 GLIEDERUNG DER ARBEIT	4
KAPITEL 2: LAUBHOLZ - BUCHE	6
2-1 ALLGEMEIN.....	6
2-2 MAKROSKOPISCHES HOLZBILD	7
2-3 MIKROSKOPISCHES HOLZBILD	8
2-4 NANOEBENE.....	9
2-5 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	10
2-6 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN.....	10
2-7 VERWENDUNG	10
KAPITEL 3: FURNIERHERSTELLUNG	11
3-1 FURNIER ALLGEMEIN.....	11
3-2 HERSTELLUNG	13
3-2.1 Vorbereitung des Rundholzes.....	13
3-2.2 Dämpfen und Kochen des Rundholzes.....	15
3-2.3 Sägen, Messern und Schälen	19
3-2.4 Trocknen.....	32
3-2.5 Sortieren und Zuschneiden	33
KAPITEL 4: UMFORMEN VON FURNIER	35
4-1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG SPANLOSER FORMGEBUNG VON HOLZ....	35
4-2 BIEGEN VON VOLLHOLZ	39
4-3 UMFORMEN VON FURNIER	42
4-3.1 Definition der Biegerichtung	42
4-3.2 Normal zur Faserrichtung	43
4-3.3 Parallel zur Faserrichtung.....	45
4-3.4 Risse	45
4-4 FORMPRESSEN VON FURNIEREN.....	46
4-4.1 Allgemein	46
4-4.2 Umformprozess	48
4-4.3 Formpressverfahren	49

4-4.4	Formgepresste Profile	56
4-4.5	Rückstelleffekt	60
4-5	BEHANDLUNG DES HOLZES	63
4-5.1	Dämpfen.....	63
4-5.2	Kochen	63
4-5.3	Stauchen.....	64
4-5.4	Chemische Behandlung	64
4-5.5	Hochfrequente Behandlung	64
4-5.6	Temperatur	64
KAPITEL 5: HERSTELLUNG PROTOTYPEN		65
5-1	GEOMETRIE	65
5-2	HERSTELLUNG DER FORM.....	66
5-3	HERSTELLUNG TRAPEZPROFIL	67
5-3.1	Prototyp 1 einwellig.....	67
5-3.2	Prototyp 2 einwellig.....	68
5-3.3	Prototyp 3 zweiwellig	70
5-3.4	Prototyp 4 zweiwellig	71
5-3.5	Prototyp 5 einwellig.....	74
5-4	ANSCHAUUNGSSTÜCKE.....	76
KAPITEL 6: BERECHNUNGSMODELL		77
6-1	QUERSCHNITTSBERECHNUNG	77
6-2	DURCHBIEGUNG.....	78
6-3	NORMALSPANNUNGEN	80
6-4	SCHUBSPANNUNGEN	81
6-5	SCHWINGUNGEN	82
6-5.1	Frequenzkriterium.....	82
6-5.2	Genauere Untersuchung.....	83
6-5.3	Steifigkeitskriterium	84
6-6	VARIATION DER EINGANGSPARAMETER.....	86
6-6.1	Material	86
6-6.2	Geometrie.....	88
6-6.3	Ergebnis	90
6-7	VERGLEICH DER EINGABEVARIATIONEN	92

KAPITEL 7: HERSTELLUNG BIEGEPRÜFKÖRPER.....	94
7-1	HERSTELLUNG FORM94
7-2	HERSTELLUNG PROFIL.....98
7-2.1	Herstellung Deckplatte100
7-2.2	Auflagerverstärkung101
7-2.3	Verbindung Deckplatte – Trapezprofil.....102
7-3	FERTIGER PRÜFKÖRPER103
KAPITEL 8: BIEGEPRÜFUNG	104
8-1	PRÜFKONFIGURATION104
8-2	PRÜFABLAUF106
8-3	ERMITTLUNG DES LOKALEN BIEGE-E-MODULS107
8-4	ERMITTLUNG DES GLOBALEN BIEGE-E-MODULS108
8-5	ERMITTLUNG DER BIEGEFESTIGKEIT109
8-6	AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE109
8-6.1	Lokaler Biege-E-Modul.....110
8-6.2	Schubsteifigkeit112
8-6.3	Biegespannung bei Versagen.....114
8-7	VERGLEICH MIT BERECHNUNGSMODELL114
KAPITEL 9: RÜCKSTELLEFFEKT	117
9-1	HERSTELLUNG117
9-2	LAGERUNG118
9-3	MESSUNGEN.....118
9-3.1	Messung 1.....118
9-3.2	Messung 2.....120
9-4	DISKUSSION DER ERGEBNISSE122
KAPITEL 10: SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK.....	123
ANHANG A VERZEICHNISSE	I
A-1	Literaturverzeichnis I
A-2	Abbildungsverzeichnis IV
A-3	Tabellenverzeichnis X

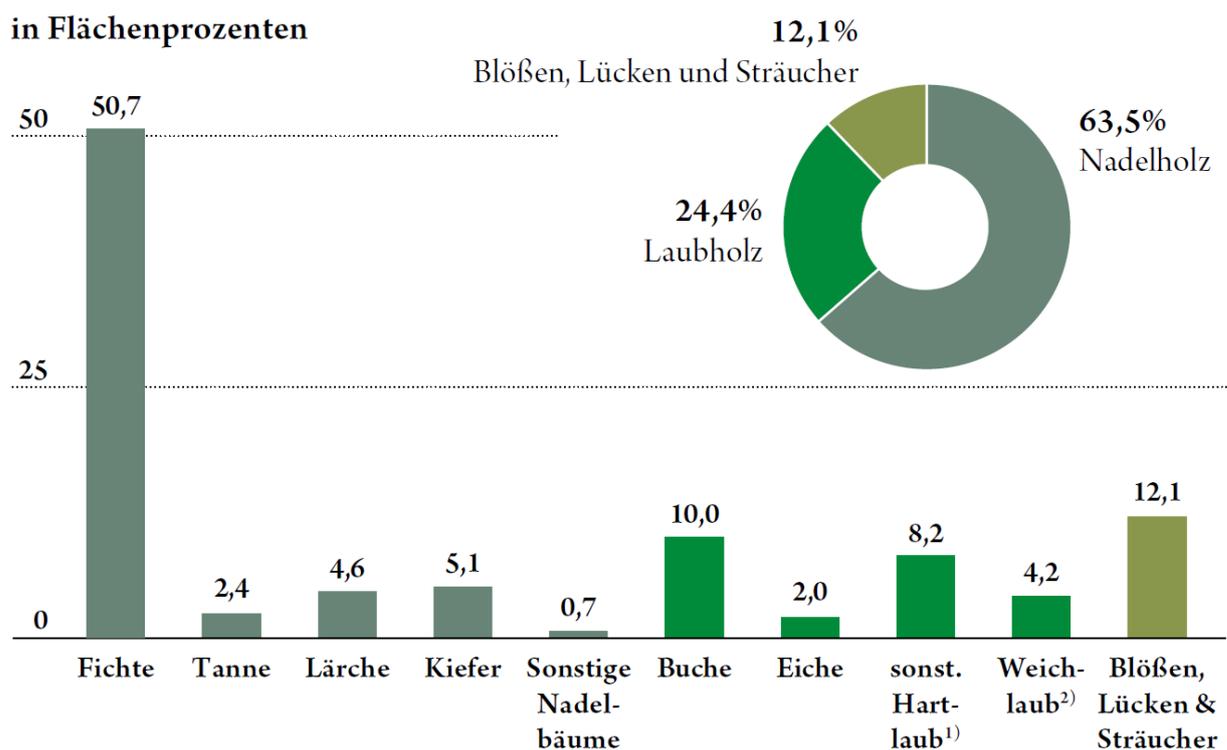
KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION

Die Waldflächen weltweit nehmen ab. Ein Grund dafür ist sicherlich die Rodung der Regenwälder, um Holz oder andere Rohstoffe zu gewinnen und um mehr Flächen für die Landwirtschaft zu schaffen.

In Mitteleuropa hingegen breiten sich die Waldflächen immer weiter aus. Seit 1961, dem Jahr, in dem das erste Waldmonitoring in Österreich durchgeführt wurde, kann in Österreich eine Flächenzunahme der Wälder beobachtet werden. Österreich ist damit eines der am dicht bewaldeten Länder Mitteleuropas. Es entfallen etwa 0,5 ha Waldfläche auf einen Einwohner. In Deutschland stehen hingegen nur 0,14 ha und in der Schweiz 0,17 ha Wald pro Einwohner zur Verfügung.

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Baumarten in österreichischen Wäldern. Es dominiert die Fichte mit mehr als 50 Flächenprozent. Die Buche, als häufigster Laubbaum, liegt bei 10 Flächenprozent.



1) Hainbuche, Esche, Ahorn, Ulme, Edelkastanie, Robinie u.a.

2) Birke, Schwarzerle, Weißerle, Linde, Aspe, Weiß-, Silber-, Schwarz- und Hybridpappel, Baumweide u.a.

Abbildung 1: Baumartenverteilung in Flächenprozent (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW); 2011)

Aus Abbildung 1 geht hervor, dass die Fichte die dominierende Holzart in Österreich ist. Dennoch darf aber die Entwicklung der Bestände nicht außer Acht gelassen werden. Aus Tabelle 1 lässt sich erkennen, dass es einen starken Rückgang der Fichte gibt. Zurückzuführen ist das auf die vermehrte Nutzung und

auf die im letzten Jahrzehnt aufgetretenen Windwurfkatastrophen. Auf der anderen Seite gibt es eine deutliche Zunahme der Laubholzflächen. Der Trend in der Forstwirtschaft geht stark zu laubholzreicheren Mischwäldern und zeigt einen Rückgang von reinen Fichtenbeständen. (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW); 2011)

Tabelle 1: Baumartenentwicklung im Ertragswald (in 1000 ha) (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW); 2011)

	1986/90	1992/96	2000/02	2007/09	Flächenbilanz
Fichte	1.870	1.866	1.810	1.709	-161
Tanne	82	78	78	81	-1
Lärche	150	147	155	154	4
Weißkiefer	193	182	166	152	-41
sonstiges Nadelholz	44	46	46	42	-2
Summe Nadelholz	2.339	2.319	2.255	2.138	-201
Rotbuche	296	309	323	336	40
Eiche	68	67	66	69	1
sonstiges Hartlaubholz	195	229	269	275	80
Weichlaubholz	128	143	144	142	14
Summe Laubholz	687	748	802	822	135
Blößen	54	45	35	69	15
Lücken	151	172	195	240	89
Sträucher im Bestand	68	42	57	73	5
Strauchflächen	32	26	26	25	-7
Ertragswald	3.331	3.352	3.370	3.367	36

Durch die beständige Zunahme des Laubholzvorrates in Österreich sowie in anderen Ländern Mitteleuropas wird der Druck hinsichtlich einer breiteren Verwendung dieser Holzarten immer größer. Die Laubholzforschung hat dadurch weltweit an Intensität zugenommen. In jüngster Vergangenheit werden am Markt vermehrt Produkte aus Buchenholz angeboten. Beispielsweise produziert die Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG die sogenannte BauBuche - ein aus Buchenschäl furnieren bestehendes Furnierlagenholzprodukt. Aus dem Buchenstamm werden mittels Rundschälverfahren dünne Furniere hergestellt und anschließend miteinander unter Druck verklebt. Diese Herstellungsart erlaubt eine nahezu vollständige Verwertung des Stammes. Das Furnierlagenholz aus Buche weist dabei gegenüber typischen, im konstruktiven Ingenieurbau verwendeten, Nadelholzarten höhere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auf. Es können dadurch wesentlich schlankere Dimensionen ausgeführt werden.

1-2 ZIELSETZUNG

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Herstellung von UHPP (Ultra High Performance Plywood) Leichtbauprofilen. Ultra High Performance Plywood steht dabei für „Ultrahochfestes Sperrholz“. Es beschreibt eine neue Sparte von Holzbauprodukten, welche die Verwendung von

beanspruchungsoptimierten Querschnitten aus Furnierlagenholz beabsichtigt. Der Baustoff Furnierlagenholz aus Buche steht dabei im Fokus. In der Praxis werden zurzeit nur ebene Produkte (z. B. Platten, Scheiben, Träger) aus Buchenfurnierlagenholz hergestellt. Zur Herstellung von UHPP-Leichtbauprofilen werden Buchenschäl furniere verklebt, zweidimensional verformt und verpresst. In dieser Arbeit wird ein Trapezprofil entwickelt, welches als Verbundquerschnitt für großflächige Decken- und Dachkonstruktionen eingesetzt werden soll. Wie so ein Deckenelement aussehen könnte, ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieser sogenannte Holz-Holz-Verbund kann mit unterschiedlichen Holzbauprodukten geschehen. So können die Leichtbauprofile mit flächigen Furnierlagenholzplatten oder aber auch mit Brettspertholzplatten zum Verbundquerschnitt werden. Auch die Verwendung anderer Materialien für den Verbund, wie zum Beispiel Beton, ist angedacht.

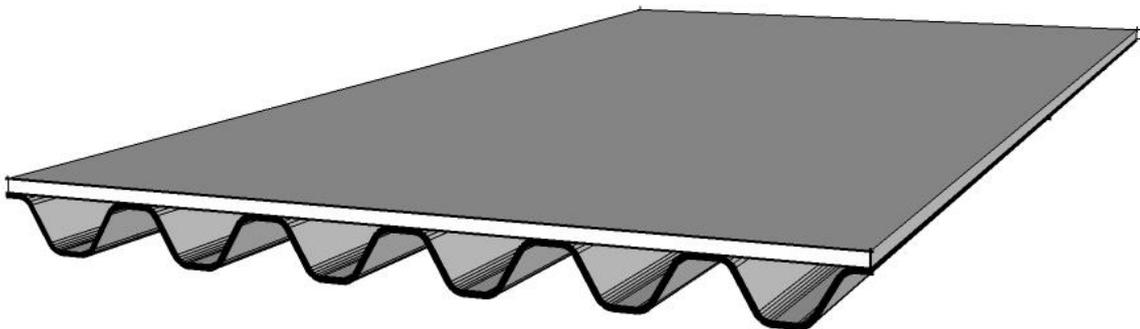


Abbildung 2: mögliches Deckenelement mit Trapezprofilen und einer Deckplatte als Holz-Holz- Verbundbauteil

Die Hauptaufgabe besteht dabei im Entwickeln und Optimieren eines Trapezquerschnitts für das Leichtbauprofil. Einen ersten Formvorschlag gab es am Beginn dieser Arbeit bereits. Dieser basierte auf Erkenntnissen und Erfahrungen des Instituts für Holzbau und Holztechnologie im Umgang mit Umformen von Furnieren. Ein Ziel ist es, Profile mit den Abmessungen dieses ersten Entwurfs zu fertigen, um die Machbarkeit von zweidimensional geformten Profilen zu untersuchen.

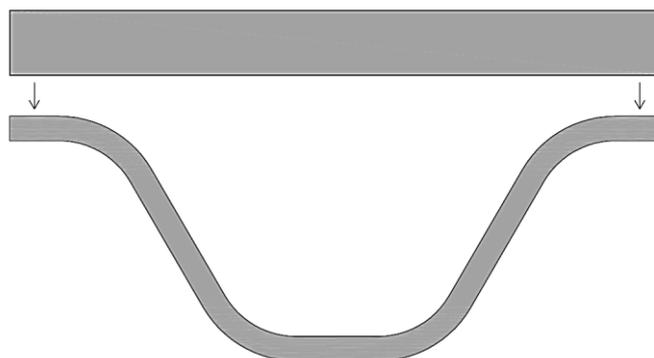


Abbildung 3: Trapezprofil im Schnitt vor dem Verbund mit einer Deckplatte

Eine weitere Aufgabe stellt die Optimierung und Aufstellung eines Berechnungsmodells für die Trapezform dar. Anschließend soll ein drei Meter langes Profil mit der gefundenen Form hergestellt, getestet und mit dem erstellten Berechnungsmodell verglichen werden.

1-3 GLIEDERUNG DER ARBEIT

Die Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel, die hier kurz erläutert werden:

Kapitel 1: Einleitung

Die Einleitung enthält eine kurze Einführung in das Thema und zeigt die Motivation und Ziele der Arbeit.

Kapitel 2: Laubholz – Buche

Dieses Kapitel setzt sich gezielt mit dem Ausgangsmaterial Buche auseinander. Es wird näher auf den Aufbau, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften, sowie die mögliche Verwendung dieser Holzart eingegangen.

Kapitel 3: Furnierherstellung

Die Furnierherstellung wurde in die Arbeit integriert, da im Zuge der Arbeit, die Herstellung der für die Profile benötigten Furniere, in einem Furnierwerk vor Ort mitverfolgt wurde. Es wird der Weg des Furniers vom Baumstamm am Lagerplatz bis zum verwendungsbereiten Holzwerkstoff erläutert.

Kapitel 4: Umformen von Furnier

Die Literaturrecherche über das Umformen von Furnier stellt die Grundlage für die Verarbeitung der Furniere zum Profil dar. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über bekannte Umformtechnologien und –verfahren ausgehend vom Biegeholz bis hin zu furnierbasierten Formpressprodukten.

Kapitel 5: Herstellung Prototypen

Die Herstellung der Prototypen zeigt eine erste Machbarkeitsstudie von der Herstellung zweidimensional geformter Trapezprofile.

Kapitel 6: Berechnungsmodell

Kapitel 7 zeigt den Aufbau eines einfachen Berechnungsmodells, welches zur Abschätzung des Potentials eines UHPP-Bauteils hinsichtlich seiner Tragfähigkeit und Steifigkeitseigenschaften herangezogen wird. Dieses dient zum einen zur Definition der Querschnittsgeometrie und ermöglicht zum anderen eine Querschnittsoptimierung unter Berücksichtigung der dem Verwendungszweck angepassten Beanspruchungsbedingungen

Kapitel 7: Herstellung Biegeprüfkörper

Mit der aus dem Berechnungsmodell gewonnenen optimierten Querschnittsgeometrie wird in Kapitel 8 die Herstellung einer Pressform und eines 3 m langen Trapezprofils erläutert.

Kapitel 8: Biegeprüfung

In diesem Abschnitt werden das Prüfkonzept, für den zu prüfenden Träger, und die aus der Biegeprüfung erhaltenen Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Kapitel 9: Rückstelleffekt

Kapitel 10 zeigt die Untersuchung des Rückstelleffekts auf das Profil, welcher über einen längeren Zeitraum, an unterschiedlichen Querschnittsaufbauten, untersucht wurde.

Kapitel 10: Schlussbetrachtung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse aus der Arbeit zusammenfassend erörtert und es wird ein Ausblick für mögliche zukünftige Forschungen in diesem Themengebiet gegeben.

KAPITEL 2: LAUBHOLZ - BUCHE

Dieses Kapitel erläutert den Aufbau von Laubholz und dabei im Speziellen den der Buche. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sind vor allem zwei Gründe für die Wahl der Buche als Ausgangsmaterial für das Profil ausschlaggebend: die hohen Festigkeits- und Steifigkeitswerte und der steigende Vorrat an Buchenholz.

2-1 ALLGEMEIN

Die Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern. Sie überzeugt durch hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte im Vergleich zu Nadelholz und eine gute Verformbarkeit. Zudem ist diese Baumart in österreichischen Wäldern heimisch und weist hohe Zuwachsraten auf (siehe dazu 1-1 Motivation). Sie ist die zweithäufigste Baumart in Österreichs Wäldern.

Die Rotbuche zeichnet sich durch ihren hohen Wuchs aus, der eine Höhe von bis zu 40 m bei einem Stammdurchmesser von 1,0 bis 1,5 m erreichen kann. Der Baum findet sich in West-, Mittel- und Südosteuropa bis hin zum Kaukasus. (Grosser; 1977) Der Stamm wächst zylindrisch und gerade mit Längen von 15 bis 20 m. Das markanteste Kennzeichen der Buche ist ihre Rinde: Bei jungen Bäumen ist sie glatt, dünn und graugrün mit hellem Schimmer, bei älteren wird sie silbergrau. Die Blätter sind oval und ganzrandig (siehe Abbildung 4). (Wagenführ; 2007)

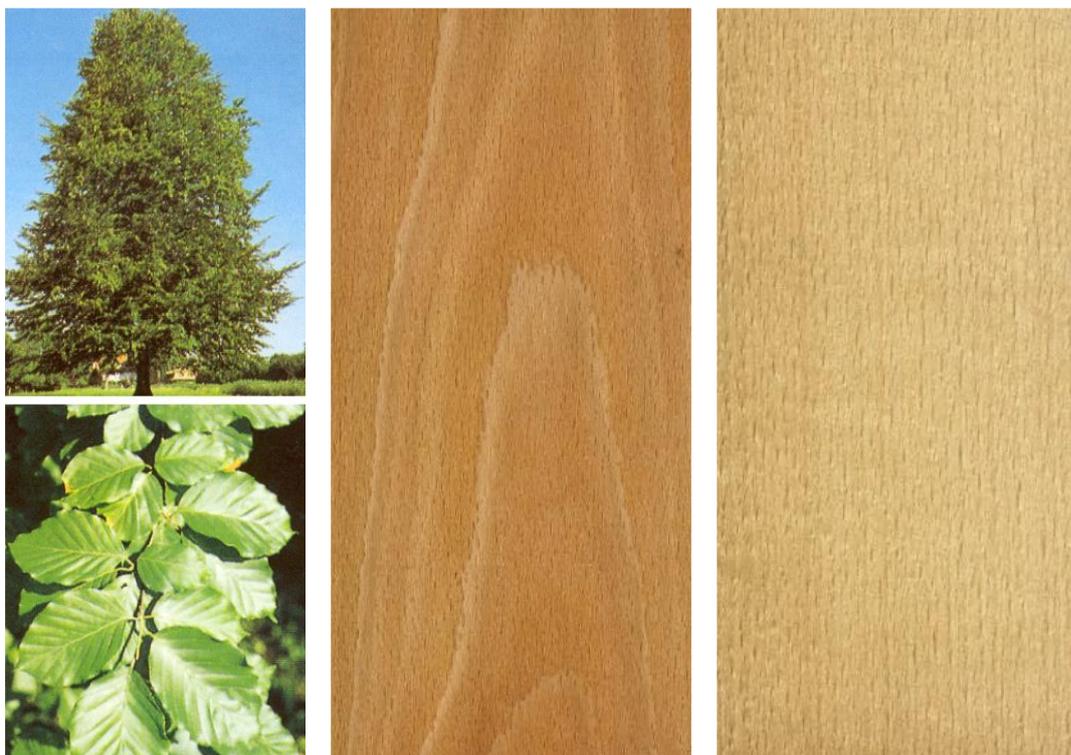


Abbildung 4: Rotbuchenbaum und Blätter (Schickhofer; 2006) leicht gefladerte Holzstruktur durch Jahresringausbildung, gedämpft und fast schlichte Struktur, ungedämpft (Wagenführ; 2007)

2-2 MAKROSKOPISCHES HOLZBILD

Unter einem makroskopischen Holzbild versteht man die Holzstruktur, welche noch mit freiem Auge zu erkennen ist. Am aufgeschnittenen Baumstamm (Abbildung 5) ist der Aufbau des Holzes gut zu erkennen. Von außen nach innen besteht der Stamm aus der Rinde, welche sich aus Borke und Bast zusammensetzt, dem makroskopisch nicht wahrnehmbaren Kambium, dem Hauptteil des Holzes, bestehend aus Kern- und Splintholz sowie dem im Inneren liegenden Mark.

Die Zuwachszonen im Holz werden durch das sich übers Jahr verändernde Klima gesteuert. Sie entstehen durch Ruhepausen des unterbrochenen Baumwachstums. In gemäßigten und kalten Zonen entsprechen die Ruhepausen der winterlichen Vegetationsruhe. Dadurch ergibt sich ein ringförmiger, jährlicher Zuwachs, der sogenannte Jahrring. Durch Zählen der Jahrringe am unteren Baumquerschnitt kann das ungefähre Baumalter abgelesen werden. Entsprechend der Ausbildung dieser Zuwachszonen gibt das Holz Auskunft über wachstumsfördernde bzw. wachstumshemmende Umstände. So können zum Beispiel über das Klima Rückschlüsse gezogen werden. Die Jahrringbreite ist die radiale Ausdehnung des Jahrringes und setzt sich aus Früh- und Spätholz zusammen. Sie ist abhängig von

- Holzart,
- Boden,
- Klima,
- Baumalter,
- physiologischen und ökologischen Schädigungen,
- forstwirtschaftlichen Maßnahmen
- und anderen Einflüssen.

Im Wesentlichen beeinflusst die Jahrringbreite die physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Laubholz. Zu Beginn und am Ende der Vegetationsperiode bilden sich Zellen unterschiedlicher Art, Größe, Anzahl und Verteilung aus. Man unterscheidet deshalb innerhalb eines Jahresringes zwischen Früh- und Spätholz. Das Frühholz hat dabei zu Beginn der Vegetationsperiode für den Wassertransport im Holz zu sorgen. Das Spätholz hingegen bildet sich im Sommer und hat die Aufgabe der Festigung des Holzes. (Schickhofer; 2006)

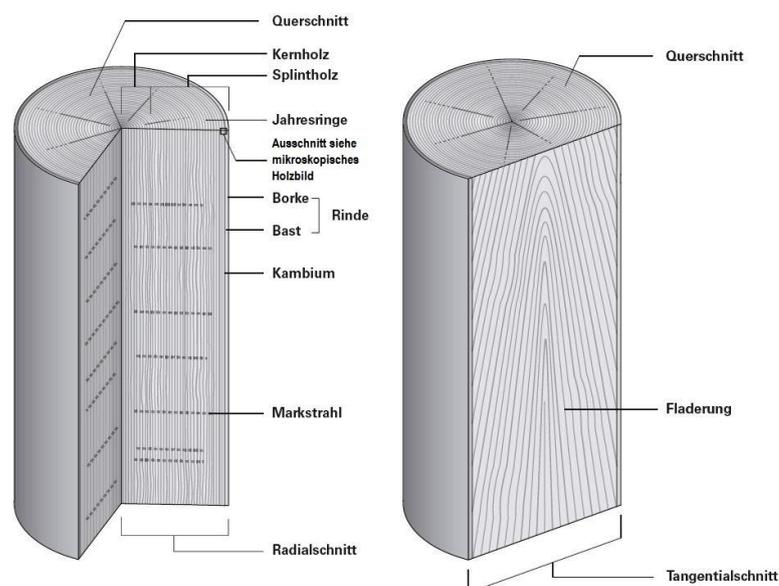


Abbildung 5: aufgeschnittener Baumstamm und seine Strukturmerkmale (Moro et al.; 2009)

In Abbildung 5 sind zudem die drei Hauptschnittrichtungen ersichtlich. Der Querschnitt oder Hirnschnitt erlaubt dabei den umfassendsten Einblick in den anatomischen Aufbau. Der Querschnitt wird senkrecht zur Stammachse geführt. Der Tangentialschnitt verläuft längs zur Stammachse und bildet die Tangente der Jahrringe. Er wird auch als „Fladerschnitt“ bezeichnet, da die angeschnittenen Jahresringe fladerförmig, also als parabelförmige Bögen, auftreten. Der Radialschnitt schneidet die Jahrringe im rechten Winkel an und geht durch den Mittelpunkt des Stammes.

Beim Schnitt durch den Stamm der Rotbuche kommt das rötlichweiße Erscheinungsbild des Holzes zum Vorschein (Abbildung 4). Farblich kann dabei zwischen Splint- und Kernholz nicht unterschieden werden; es sei denn, der Baum ist über 80 Jahre alt. Dann besitzt die Buche häufig eine irreguläre Verkernung mit wolkgig, rotbraunem Kern (fakultative Kernbildung). Die Jahrringe setzen sich bei der Rotbuche durch porenärmeres, dunkleres Spätholz scharf voneinander ab. Die Gefäße sind zerstreutporig und in Schnittrichtung ohne optische Hilfsmittel deutlich zu erkennen. Die Struktur des Holzes ist im Tangentialschnitt leicht gefladert (Abbildung 4) bzw. im Radialschnitt gestreift. (Grosser; 1977)

2-3 MIKROSKOPISCHES HOLZBILD

Der mikroskopische Aufbau des Laubholzes ist in Abbildung 6 dreidimensional dargestellt. Es zeigt die Anordnung und Form der unterschiedlichen, unter dem Mikroskop zu erkennenden Bestandteile.

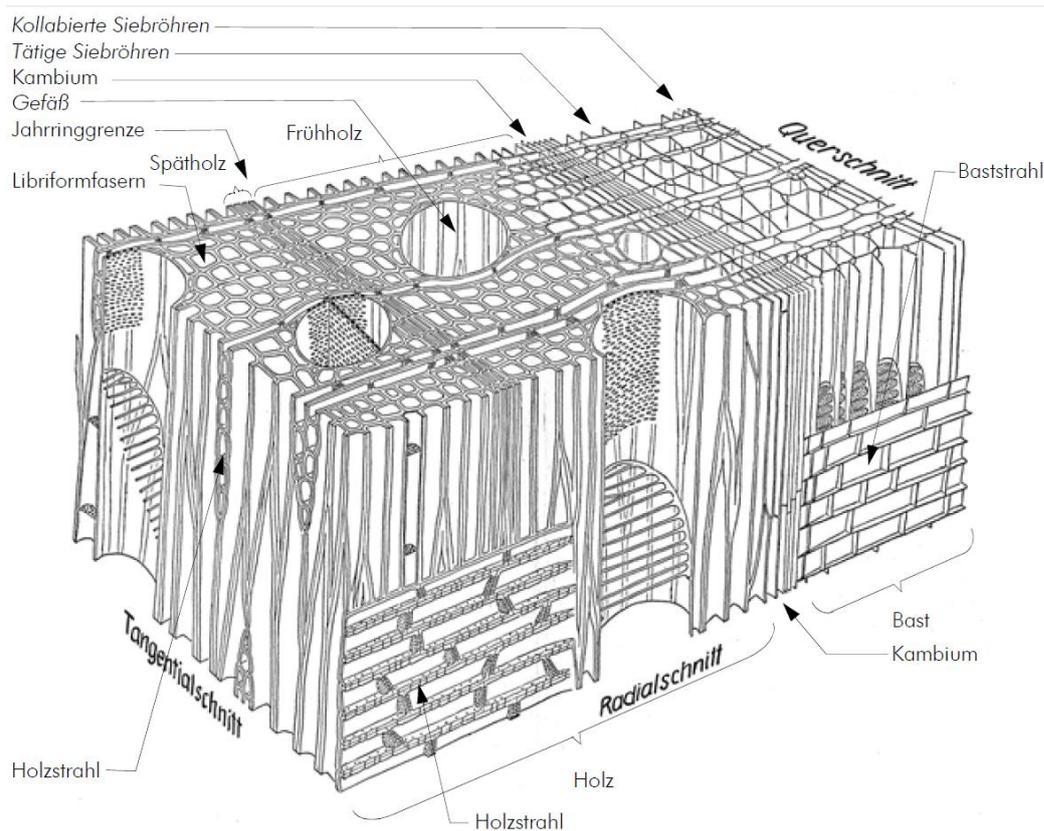


Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast eines zerstreutporigen Laubholzes in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau; 1951)

Der in Abbildung 6 dargestellte Holzkörper besteht aus Millionen von Zellen. Diese unterscheiden sich nach Größe, Art, Form, Verteilung und Anzahl. Das Holz hat die folgenden Funktionen zu erfüllen: die Wasserleitung, die Stoffspeicherung und die mechanische Festigung. Aus diesen Funktionen folgend, bilden gleichartige Zellen größere Verbände (Gewebe) und übernehmen die Funktionen des Holzes.

So haben die Gefäße die Funktion der Wasserleitung. Sie bestehen aus röhrenartig axial verlaufende Zellreihen, in denen das Wasser ungehindert von Element zu Element fließen kann. Die Größe und Verteilung der Gefäße teilt die Laubhölzer in ringporige, zerstreutporige und halbringporige Arten ein. Die Buche ist ein zerstreutporiges Laubholz und hat daher Gefäße, die sich in ihrer Größe über den Jahresring nur wenig unterscheiden und auch annähernd gleichmäßig verteilt sind. Sie sind oval und haben im Querschnitt einen tangentialen Durchmesser von maximal 60 bis 80 μm .

Das Längsparenchym ist axial ausgerichtet und hat zusammen mit dem radial ausgerichteten Holzstrahlparenchym (in Abbildung 6 als Holzstrahl gekennzeichnet) die Aufgabe der Leitung und Speicherung der Nährstoffe. Das Längsparenchym ist bei der Buche reichlich und einzeln bzw. in kleinen Zellgruppen zwischen dem Grundgewebe verteilt. Die Holzstrahlen sind homogen, das bedeutet, sie bestehen ausschließlich aus liegenden Zellen.

Zu guter Letzt sind noch die Fasern von größerer Bedeutung, die für die Festigung der Holzstruktur verantwortlich sind. Sie bilden den Hauptanteil der Holzmasse. Man unterscheidet vordergründig zwischen Libriformfasern und Fasertracheiden. Die langgestreckten Libriformfasern bilden bei der Buche den überwiegenden Teil des dickwandigen Grundgewebes. Die Fasertracheiden stellen den restlich Teil des Gewebes dar, jedoch nur mit einem geringen Anteil. (Grosser; 1977)

2-4 NANOEBENE

Die Nanoebene zeigt einen noch detaillierteren Blick auf das Holz als die mikroskopische Ebene. Es ist die letzte Strukturebene vor der molekularen Ebene und beschreibt den Zellwandaufbau des Holzes.

Holz ist ein Verbundwerkstoff bestehend aus den makromolekularen Zellwandkomponenten Cellulose, Hemicellulose, Lignin, Pektine und anteilmäßig weniger vorkommenden, akzessorischen Bestandteilen. Die Zellwand (Abbildung 7) besteht aus der Mittellamelle (M), einer Primärwand (P) und der Sekundärwand, welche sich aus drei Schichten (S1, S2, S3) zusammensetzt. Die Laubholzfasern werden durch die Mittellamelle verbunden, daran schließt die Primärwand an und darauf folgt die dreischichtige Sekundärwand. Die einzelnen Wände bestehen aus den zuvor genannten Zellwandkomponenten.

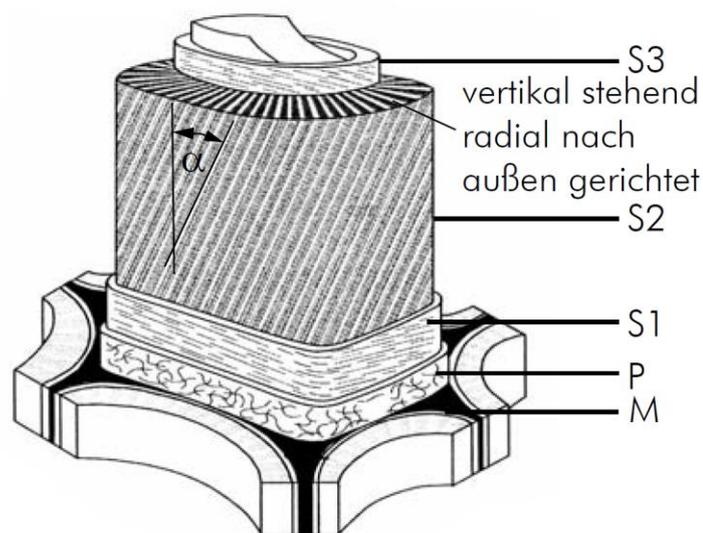


Abbildung 7: Zellwandmodell (Zimmermann, Sell; 1997)

Die Sekundärwand S2 hat eine große Bedeutung für die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes. Der Mikrofibrillenwinkel (α in Abbildung 7) beträgt dort etwa 10 bis 30°, während in den

Sekundärwänden S1 und S3 größere Winkel zu finden sind. Der Mikrofibrillenwinkel zeigt den Winkel zwischen der Längsrichtung der Holzzelle und der Orientierung der Cellulosefibrillen. Die Cellulose bildet eine Struktur, die durch eine Matrix aus Pektin und Hemicellulose verkittet ist. Die Cellulose ist verantwortlich für die Zug- und Biegefestigkeit der Zelle. Der Mikrofibrillenwinkel hat einen großen Einfluss auf die bruchmechanischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes. Denn je höher dieser Winkel ist, desto geringer ist der E-Modul längs, wie die Zugfestigkeit und die Streckgrenze. Es steigen hingegen aber die maximal erreichbare longitudinale Dehnung, die Kerbzugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie. (Schickhofer; 2006)

2-5 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Die folgenden Punkte wurden aus Wagenführ (2007) übernommen:

Darrdichte: 680 kg/m³

Rohdichte: 720 kg/m³

Porenanteil: etwa 55 %

Schwindsatz

Längs: 0,3 %

Radial: etwa 5,8 %

Tangential: etwa 11,8 %

Auf Grund des hohen Quell- und Schwindvermögens der Buche, vor allem in tangentialer Richtung, ist es sinnvoll Buchenfurniere herzustellen, da dieses Verhalten beim Verarbeiten von Furnieren leichter in den Griff zu bekommen ist.

2-6 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Die folgenden Punkte wurden aus Wagenführ (2007) übernommen:

Druckfestigkeit: 62 N/mm²

Biegefestigkeit: 123 N/mm²

Zugfestigkeit: 135 N/mm²

Querzugfestigkeit: 7,0 N/mm²

Scherfestigkeit: 8,0 N/mm²

E-Modul: 16.000 N/mm²

2-7 VERWENDUNG

Die Rotbuche wird für Furnierholz, überwiegend als Schälholz, und im weiteren Sinne für Sperr- und Verbundplatten, Presslagenholz und dgl. verwendet. Bei der Möbelherstellung dient die Buche als Ausstattungsholz, und im Innenausbau wird sie als Vertäfelung sowie Parkett genutzt. Im Fahrzeug- und Maschinenbau verwendet man sie als Konstruktionsholz, ebenso wird sie im Musikinstrumentenbau, in der Papierherstellung, für Sport- und Haushaltsgeräte und die Herstellung von Holzkohle verwendet. Zudem eignet sie sich hervorragend als Biegeholz. Dies ist nur ein kleiner Auszug aus den möglichen Verwendungsbereichen. Es sind etwa 250 verschiedene Anwendungen des Holzes der Rotbuche bekannt. (Wagenführ; 2007; Krackler et al.; 2010)

KAPITEL 3: FURNIERHERSTELLUNG

In diesem Kapitel soll die Herstellung des Furniers, ausgehend vom grünen, waldfrischen Stamm bis hin zum fertigen Holzwerkstoff, näher betrachtet werden. Das Furnier dient als Ausgangsmaterial zur Herstellung des Leichtbauprofils.

3-1 FURNIER ALLGEMEIN

Bereits im Altertum wurden erstmals Furniere aus ausgesuchten Hölzern für Einlegearbeiten mit Elfenbein, Metallen und kostbaren Steinen verwendet. Dazu wurden dünne Streifen der verschiedenen Materialien zu Reliefs verarbeitet. Ein Beispiel dafür ist eine Reisetruhe aus dem Grab im ägyptischen Tal der Könige von Tutanchamun. (Knigh, Wulpi; 1930)

Eine genauere Behandlung der Geschichte des Furniers findet sich in Staudacher (2015).

Das Wort Furnier gibt es allerdings erst seit 400 Jahren. Der Name leitet sich vom französischen Wort „fournir“ ab, was so viel bedeutet wie „bestücken“. (Kalweit et al.; 2012)

Furniere (siehe Abbildung 8) sind dünne Holzblätter, welche vom Baumstamm gesägt, gemessert oder geschält werden. Durch diese Art der Produktion kann nahezu der ganze Baumstamm zu Furnieren verarbeitet werden. Der Anteil der während des Auftrennprozesses (Schälen, Messern) von Furnieren anfallenden Nebenprodukte ist abhängig vom Ausgangsmaterial „Rundholz“ (Abholzigkeit, Krümmung, ...). Vergleicht man derzeitige Einschnittechnologien zur Gewinnung von Brettware mit gebräuchlichen Auftrennprozessen (Schälen, Messern) zur Herstellung von Furnieren so ergeben sich höhere Ausbeuten. Dadurch kann eine effiziente Nutzung des Holzes erreicht werden.

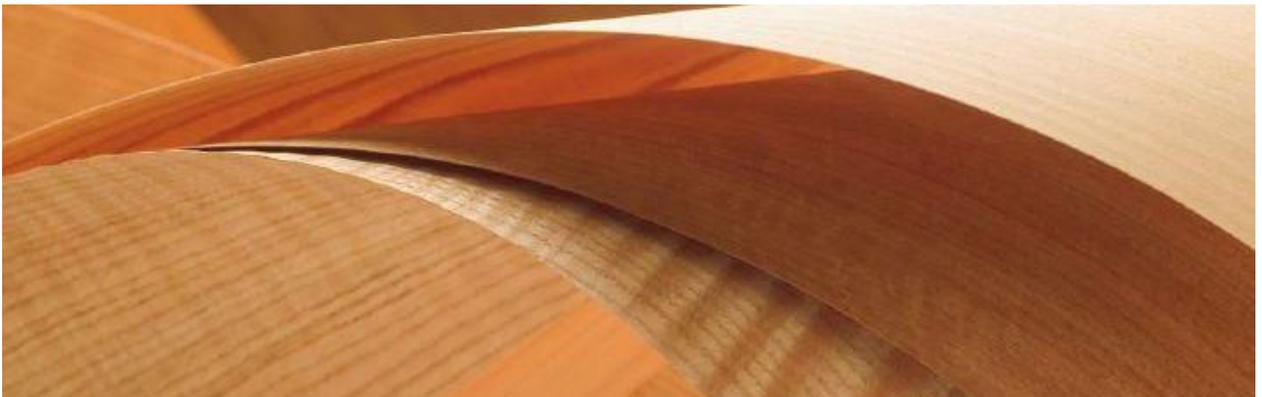


Abbildung 8: Auswahl an verschiedenen Furnieren (Danzer Europe Veneer)

Furniere sind ein wichtiger Bestandteil der Holzindustrie, sei es für die Erzeugung von hochwertigen Inneneinrichtungen oder die Erzeugung von Sperrholzplatten und Furnierlagenholz. Gerade in der Möbelherstellung kommen die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten von Furnieren zum Ausdruck. So wird zum Beispiel die Maserzeichnung des Holzes besonders zur Geltung gebracht. Unterstützen kann man dies auch noch durch eine symmetrische Verlegung derselben. (Kollmann; 1955)

Eine Einteilung der Furniere gibt die DIN 68330 (1976): „Furniere, Begriffe“ wieder (siehe Abbildung 9). Sie teilt die Furniere einerseits nach der Verwendung und andererseits nach der Herstellung (siehe dazu Kapitel 3: Furnierherstellung) ein. Bei der Einteilung nach der Verwendung wird zwischen Deck-, Unter- und Absperrfurnier unterschieden. Deckfurniere werden für Sichtflächen, entweder an Außenflächen oder Innenflächen eines Fertigerzeugnisses eingesetzt. Außenfurniere bestimmen dabei das Erscheinungsbild der Erzeugnisse maßgeblich, während die Innenfurniere an der Innenseite das Erscheinungsbild in geringerem Maße beeinflussen. Unter- und Absperrfurniere sind nicht sichtbar und befinden sich unter den Deckfurnieren. Sie sorgen hauptsächlich für die mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. (Wagenführ et al.; 2011)

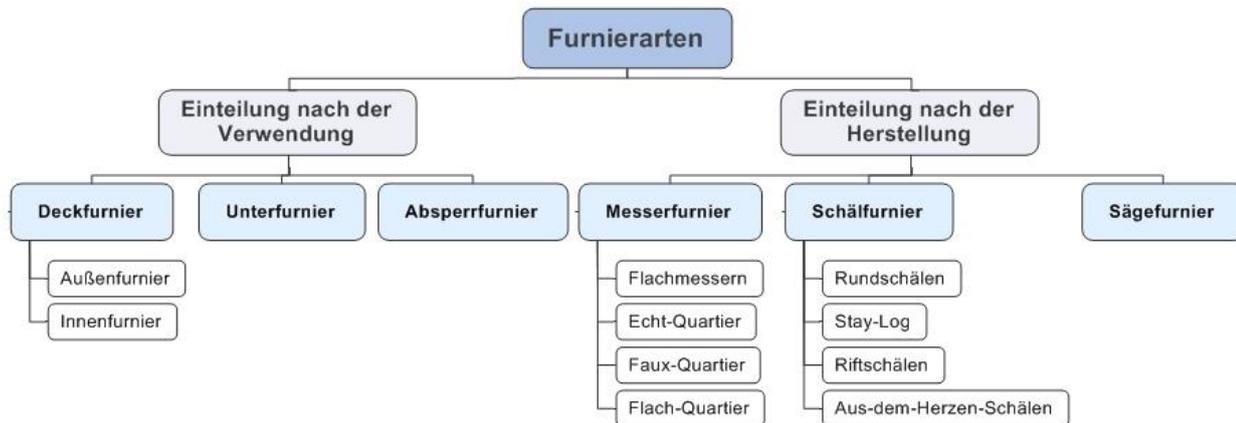


Abbildung 9: Einteilung der Furnierarten nach DIN 68330 (1976)

3-2 HERSTELLUNG

Die Herstellung von Furnieren benötigt eine Reihe von unterschiedlichen Prozessen, die aus einem Rundholzstamm schlussendlich ein für den Markt taugliches Furnier herstellen. Abbildung 10 zeigt eine Übersicht des Herstellungsprozesses. Auf die einzelnen Produktionsschritte wird im Nachfolgenden genau eingegangen. So kann anstelle des Dämpfprozesses das Holz auch gekocht werden, um es für den weiteren Prozess besser bearbeitbar zu machen. Auch bei der Auftrenntechnik gibt es mehrere Möglichkeiten. So kann das Holz gesägt, gemessert oder geschält werden.

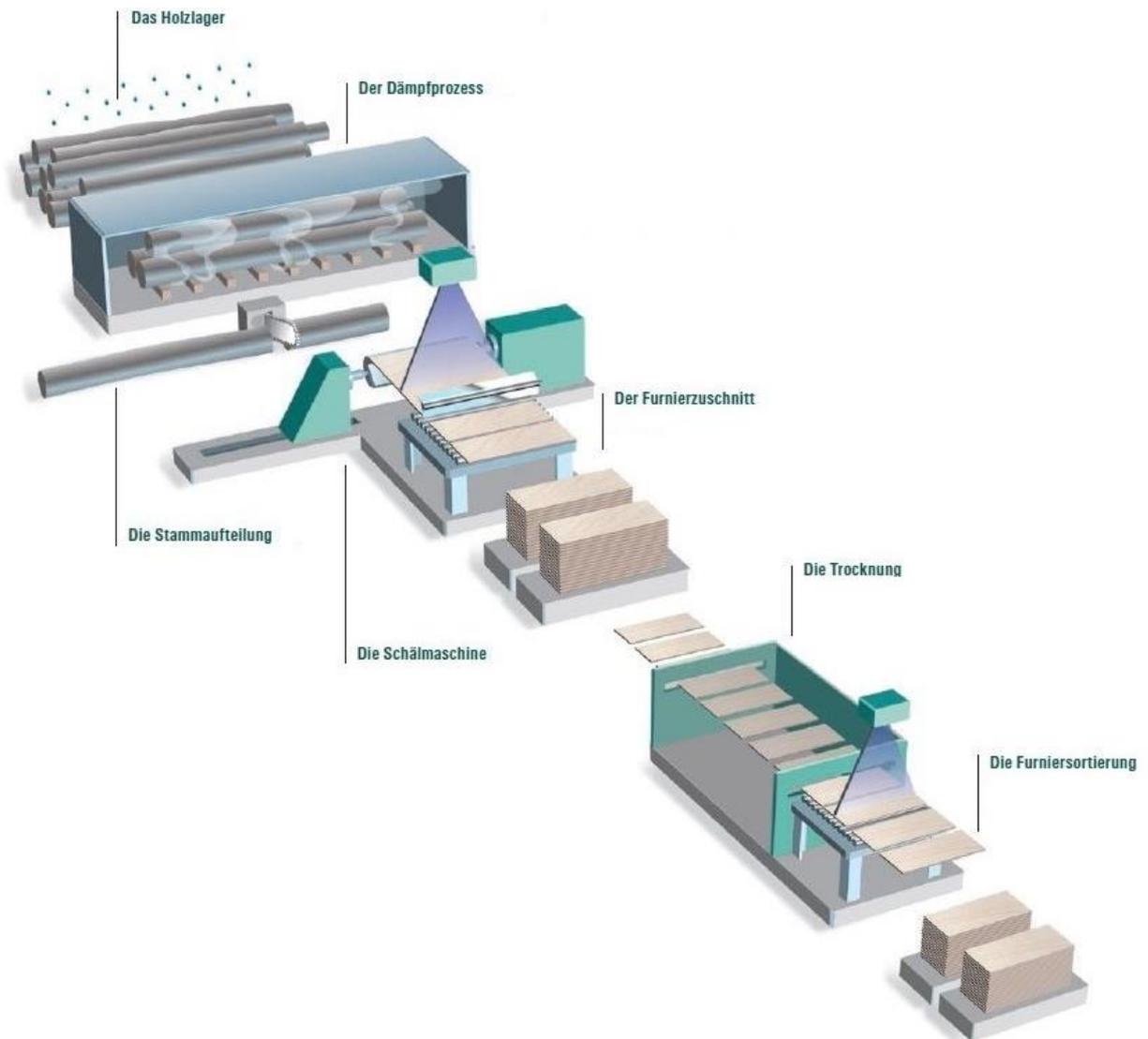


Abbildung 10: Furniererzeugungsprozess im Überblick (Becker, Zimmer; 2014)

3-2.1 VORBEREITUNG DES RUNDHOLZES

Die für die Furniererzeugung vorhandenen Stämme werden im Werk vorbereitet. Es erfolgt eine erste Qualitätssortierung, um in der Folge möglichst fehlerfreie, einheitliche Furnieroberflächen zu erhalten. Je regelmäßiger die Furniere hinsichtlich Farbe und Struktur sind, desto hochwertiger sind sie für eine eventuelle Verwendung als Deckfurniere. Weniger hochwertige Furniere werden als Blind- und Absperrfurniere verwendet.

Die Stämme werden nach dem Sortieren entrindet und etwaig vorhandene Fremdteile, wie Metallteile oder Steine werden entfernt (Abbildung 11). In von Kriegsgeschehen heimgesuchten Gebieten werden die Stämme noch zusätzlich mit Metalldetektoren untersucht, um eventuell vorhandene Granatsplitter im Baum lokalisieren und dann entfernen zu können.



Abbildung 11: Entrindungsvorgang mittels Fräse (Danzer Europe Veneer)

Nach dem Entrinden werden die Stämme zugerichtet. Das Längsaufteilen und Zuschneiden wird als Zurichten bezeichnet. Der Stamm wird dabei halbiert, gedrittelt oder geviertelt. Die dabei entstehenden Furnierblöcke (Fitches) entscheiden über das endgültige Furnierbild. Daher ist die Vorbereitung ein nicht zu unterschätzender Arbeitsschritt. Einzig beim Rundschälverfahren werden die Stämme in Längsrichtung nicht aufgeteilt. (Wagenführ et al.; 2011)

Bei der Lagerung des Rundholzes werden auch mechanische Hilfsmittel verwendet, um Risse im Holz zu vermeiden und dadurch die Furnierqualität zu steigern. Um Risse, welche sich an den Stammenden bilden können, zu vermeiden werden in die Hirnflächen der Rundstämme Eisenklammern eingetrieben (Abbildung 12). Diese sollen so viele Markstrahlen wie nur möglich im rechten Winkel schneiden. Wichtig ist, dass diese Klammern vor dem Dämpfen, Kochen bzw. Zuschneiden entfernt werden. Bei kleinerem Stammdurchmesser gibt es auch noch die Möglichkeit den Stamm mittels Bandeisens und Spannschlössern zu umspannen, um die Bildung von Kernrissen zu unterbinden. (Kollmann; 1962)

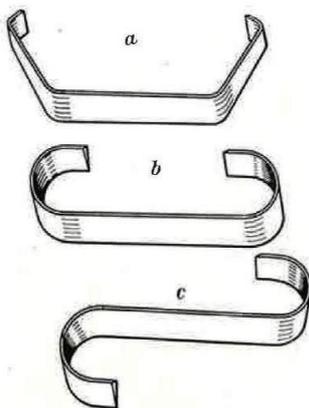


Abbildung 12: Eisenklammern zur Verhütung von Endrissen a) Bügelform b) C-Klammer c) S-Klammer und Anordnung von S-Klammern im Rundholz (Kollmann; 1962)

Kollmann (1962) beschreibt, dass sich eine Nasshaltung des Holzes während der Lagerung positiv auf die Holzqualität auswirkt. Das Nasshalten der Holzstämme schützt das noch grüne Holz vor Pilzinfektionen, Verfärbungen und vor Rissbildung. Dies wird meist durch eine Wasserbesprühanlage am Holzlagerplatz erreicht.

3-2.2 DÄMPFEN UND KOCHEN DES RUNDHOLZES

Wenn das Holz im weiteren Produktionsverlauf entweder gemessert oder geschält wird, ist es notwendig das Holz zuvor zu erweichen. Dies geschieht entweder durch Kochen oder Dämpfen mit Wasser. Dadurch wird die Plastizität des Holzes erhöht. Eine Erhöhung der Plastizität bedeutet so viel wie den Übergang eines Stoffes von seinem festen in einen verformbaren oder fließfähigen Zustand, welcher für die weitere Verarbeitung erforderlich ist. Ein Nebeneffekt dieser Vorbehandlung ist, dass einige Holzarten ihre Farbe sehr stark verändern. Bei manchen Holzarten ist dies sogar erwünscht. Bei Edelhölzern, wo dies nicht gewünscht ist, kommt das Sägen der Furniere zum Einsatz, da beim Sägen keine Vorbehandlung durch Dämpfen oder Kochen des Holzes erforderlich ist.

Ein positiver Nebeneffekt des Kochens bzw. Dämpfens ist, dass sich Schmutz- und Rindenreste während dem Vorgang lockern und sich anschließend leicht entfernen lassen.

Notwendig ist diese Vorbehandlung, da sich nur wenige Holzarten waldfrisch messern bzw. schälen lassen. (Kollmann; 1955)

Beim Kochen bzw. Dämpfen des Holzes, sowie schon bei der Auswahl der zu verarbeitenden Stämme, ist darauf zu achten, welchen endgültigen Verwendungszweck das herzustellende Furnier schlussendlich haben wird. So gibt es bei Furnierwerken, welche beispielsweise Deckfurniere für den Möbelbau fertigen, ein anderes Anforderungsprofil hinsichtlich Qualität als bei Furnierwerken, welche das Ausgangsmaterial für Bauteile produzieren. Bei Bauteilen sollte der Schwerpunkt auf einer optimalen Anpassung der unterschiedlichen Prozessschritte zur Erzielung möglichst hoher und gleichmäßiger Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften innerhalb der gefertigten Schäl- und Messerfurnierchargen liegen.

3-2.2.1 Kochen

Kochen ist das Behandeln des Holzes mittels warmem oder heißem Wasser. Die Temperatur des Wassers liegt dabei aber immer unter dem Siedepunkt. Das Holz wird dabei in Kochgruben für den Schäl- bzw. den Messerprozess vorbereitet. Die Kochgruben können dabei in Hallen oder im Außenbereich situiert sein. Im Innenbereich sind die Gruben wesentlich energieeffizienter, vor allem bei niedrigen Außentemperaturen. Allerdings ist der Bau einer solchen Anlage wesentlich teurer. Bei einer Anlage sind zumeist mehrere Gruben hintereinander angeordnet. In der ersten findet die Lagerung der zu kochenden Blöcke statt, in der zweiten erfolgt die Anwärmung bzw. das Kochen der Blöcke und in der dritten werden sie als Vorrat gelagert. Anzahl, Aufteilung und Verwendung dieser Gruben ist von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich. Üblicherweise wird die Grube, in die das Holz eingebracht wird, zuerst bis zu einem Drittel mit Wasser gefüllt, um die Holzblöcke beim Einbringen in die Grube vor Beschädigungen durch das Aufschlagen am Boden zu schützen. Ist das Holz eingebracht, wird die Grube weiter mit warmem Wasser gefüllt. Dabei kommt das Wasser auch aus anderen Gruben, in denen das Holz bereits fertig gekocht und bereit für den weiteren Prozessschritt ist. Das Wasser wird mittels Heizschlangen am Boden erwärmt. Die Temperatur des Wassers und die Kochdauer sind dabei stark von der Holzart und der Größe der zu kochenden Blöcke abhängig. Um für den Auftrennprozess (Schälen, Messern) eine ausreichende Bearbeitbarkeit sicherzustellen, ist es erforderlich eine Mindesttemperatur (möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung) über den gesamten Rundholzquerschnitt zu erreichen. Die Blöcke müssen solange im Wasser bleiben, bis diese gleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt der Blöcke erreicht ist. Daher sollte bei der Beschickung der Kochgruben immer darauf geachtet werden, möglichst gleiche Partien zur gleichen Zeit zu verarbeiten. (Kollmann; 1962)



Abbildung 13: gefüllte und leere Kochgrube

Dupleix et al. (2013) untersuchten die Aufheiztemperatur des Rundholzes auf die Furnierqualität und den Schälprozess hin. Das Ziel der Untersuchung war es, die optimale Aufheiztemperatur in Bezug auf die Furnierqualität zu finden. Die Temperaturen wurden zwischen 20 und 80°C variiert und anschließend die aufgeheizten Blöcke geschält und auf die Dickenschwankung und Schälrisshäufigkeit, wie Tiefe untersucht. Herangezogen wurden die Holzarten Birke, Buche und Fichte.

Erste Ergebnisse zeigten, dass bereits bei einer Temperatur von 50°C effizient geschält werden kann. Ist die Temperatur allerdings niedriger, treten tiefe Risse in größeren Abständen im Furnier auf.

Zwischen den unterschiedlichen Unternehmen variieren die Kochtemperatur und Zeit bei gleicher Holzart relativ stark. Diese Unterschiede beruhen vermutlich zum einen auf verschiedenen Erfahrungswerten im Umgang mit dem Kochen bzw. Dämpfen von Holz und zum anderen auch auf der Verwendung von unterschiedlichen Koch- und/oder Dämpfeinrichtungen. Auch wird die Temperatur oft erhöht, um den Kochprozess zu beschleunigen. Dies kann allerdings zu einer Überhitzung des Stammes führen. Die Überhitzung ist meist der Grund für eine wollige Oberfläche nach dem Schälprozess und die Furnierqualität wird dadurch gemindert. Das Überhitzen führt bei einer kürzeren Kochdauer auch manchmal dazu, dass die Außentemperatur nicht bis in das Stamminnere vordringen kann, was sich auf eine schlechtere Qualität auswirkt. Ein Furnier mit einer guten Qualität zeichnet sich durch eine konstante Dicke, geringe Schälrisshäufigkeit und –tiefe, sowie eine glatte Oberfläche aus.

Bei den Untersuchungen von Dupleix et al. (2013) wurden 40 cm dicke Buchen-, Birken- und Fichtenstämmen für 48 Stunden mit Temperaturen zwischen 20 und 80°C erhitzt und geschält. Bei der anschließenden Messung der Dicken konnte bei Buche und Birke festgestellt werden, dass schon bei geringen Temperaturen ein stabiler Schälprozess erreicht werden kann, da die Dickenabweichungen gering sind (Abbildung 14). Bei der Fichte wurde ein positiver Effekt des Erhitzens beobachtet. Mit zunehmender Aufheiztemperatur wurde die Dickenabweichung wesentlich geringer.

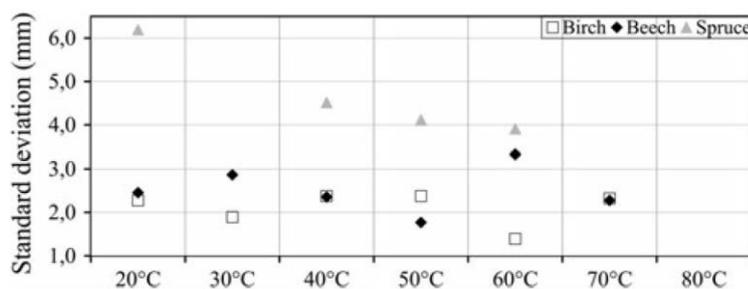


Abbildung 14: Einfluss der Aufheiztemperatur auf die Dickenschwankung (Dupleix et al.; 2013)

Das Fuitometer, dargestellt in Abbildung 15, misst die Differenz des Luftaustritts zwischen offener (die beim Auftrennen dem Messer zugewandte Seite) und geschlossener Seite (die dem Messer nicht zugewandte Seite beim Auftrennprozess) des Furniers und berechnet daraus den Rissindex (Checking Index). Der Rissindex ist maßgeblich durch die Schälrisse (siehe dazu 3-2.3.3 Schäl furnier) und Oberfläche des Furniers bestimmt. Je mehr Schälrisse und je rauer die Oberfläche, desto mehr Luftdurchtritt und desto höher der Wasserstand im Fuitometer.

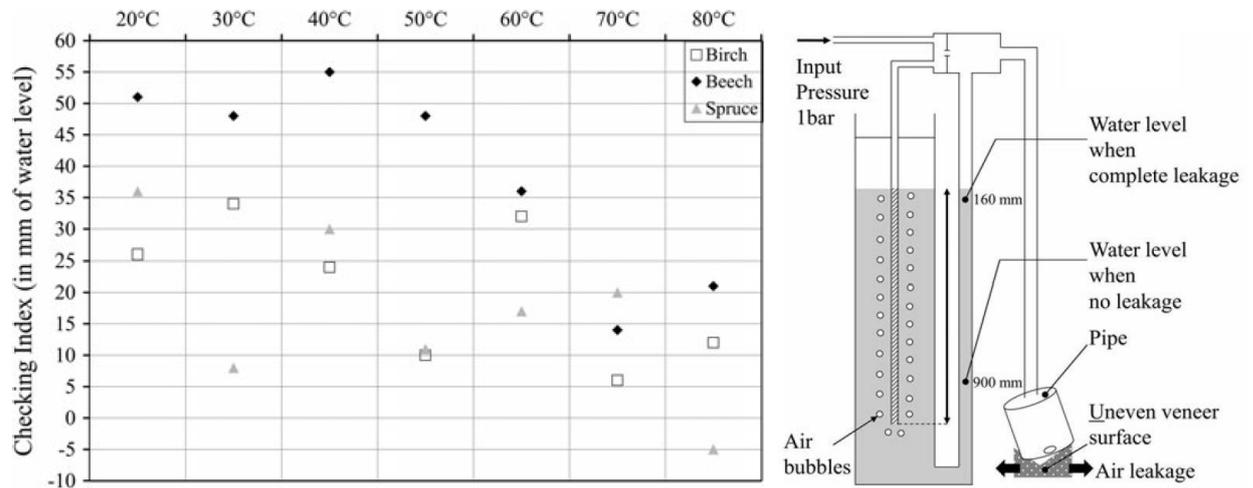


Abbildung 15: Einfluss der Aufheiztemperatur auf den Rissindex (CI) und Funktionsprinzip des Fuitometers (Duplex et al.; 2013)

Man kann in der Auswertung in Abbildung 15 erkennen, dass der Rissindex bei steigender Temperatur sinkt. Für Birne und Buche wurden bei 70°C die besten Ergebnisse erzielt. Ein kleiner Rissindex spiegelt eine bessere Furnierqualität wieder. Mit dem Fuitometer können keine konkreten Aussagen über die Risshäufigkeit und Risstiefe wiedergegeben werden, aber es ist dennoch ein brauchbares Instrument um sich einen Überblick über den Einfluss der Aufheiztemperatur auf die Furnierqualität zu schaffen. Für die Ermittlung der exakten Risstiefen und Rissabstände hat sich das in 4-3.4 Risse erläuterte SMOF-Verfahren bewährt.

3-2.2.2 Dämpfen

Der Prozess des Dämpfens besteht, wie beim Kochen, aus einem Wärmeaustausch des heißen Dampfes in der Luft mit dem Holz. Wird frisches, grünes Holz mit Wasser in der Dämpfkammer behandelt, so kommt es zuerst zu einer Trocknung des Holzes bei atmosphärischem Druck, ehe die Erwärmung des Stammes erfolgt. Beim Dämpfen gehen die Pektine des Holzes in Lösung, und Anteile des Lignins werden zu wasserlöslichen Stoffen. Der Abbau der Kitt-Substanz in der Mittellamelle (Erläuterung siehe 2-4 Nanoebene) lockert zudem den Zellverband. Diese Lockerung bewirken die für die weitere Verarbeitung gewünschten besseren Schäleigenschaften.

Die erforderliche Temperatur und Dauer beim Behandlungsvorgang mit heißem Wasserdampf sind sehr unterschiedlich. Aus diversen Untersuchungen ging aber hervor, dass mit steigender Rohdichte des zu verarbeitenden Holzes höhere Temperaturen notwendig sind. Abhängig ist dies neben der verwendeten Holzart auch noch von der Größe des zu dämpfenden Holzes. Probleme können beim Dämpfen durch große Stammdurchmesser hervorgerufen werden. Durch die sehr lange Dämpfzeit kommt es an den Stammenden zu Rissen. Dies ist bedingt durch den inneren Aufbau von Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Holzfeuchte und Temperaturgradienten über den Rundholzabschnitt. Dies geschieht längs wie quer zur Stammachse. Daher sollen möglichst lange Stämme verwendet werden, um im

späteren Verlauf diese Risse entfernen zu können. Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht darin, das Holz in einem ersten Schritt zu dämpfen und zwar solange, bis es möglich ist, den Stamm bis zu einem Durchmesser von 40 cm zu schälen. Nach dem ersten Schälvorgang wird das Holz ein zweites Mal gedämpft, ehe der restliche Stamm geschält wird.

Grundsätzlich werden zwei Dämpfverfahren unterschieden: das indirekte und das direkte Dämpfverfahren. Beim direkten Verfahren (Abbildung 16) wird der Dampf außerhalb der Grube erzeugt und über Rohre in die Kammer mit dem zu dämpfenden Holz eingeleitet. Das Holz wird in der Kammer so gelagert, dass der Dampf die Möglichkeit hat, das gesamte Holz zu umspülen. Werden bereits zugeschnittene Messerblöcke gedämpft, so werden diese so gelagert, dass ihre Schnittflächen nicht aufeinander liegen. Hierbei ist es notwendig, die Hölzer mittels Einlegen von Zwischenhölzern voneinander zu trennen. Die Rohre, über die der Dampf eingebracht wird, sind so zu verlegen, dass der Dampf gleichmäßig in die Grube einströmt und sich dort verteilt. Eine ungleichmäßige Verteilung und eine Ausleitung des Dampfes direkt auf das Holz sind zu vermeiden. Besser ist es hierfür den Dampf zuerst Richtung Boden zu leiten und ihn von dort zurückprallen zu lassen oder Prallbleche zu verwenden. (Kollmann; 1962)

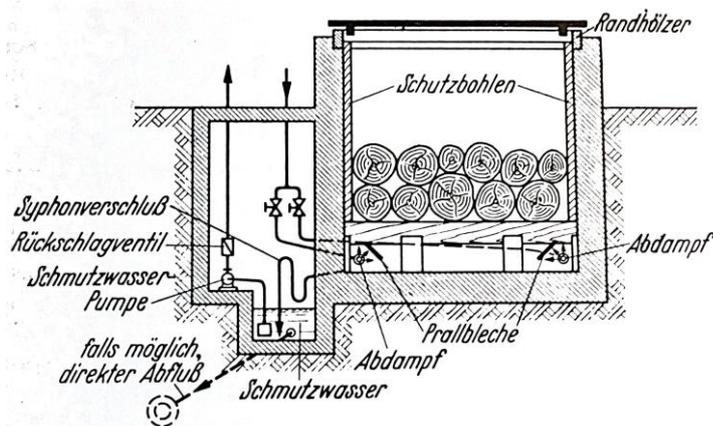


Abbildung 16: Dämpfgrube für direkte Beheizung (Doffiné; 1956)

Das indirekte Verfahren (Abbildung 17) ist dem direkten überlegen, da hier die Plastifizierung des Holzes wesentlich gleichmäßiger erfolgt. Der Dampf wird nicht von außen zugeführt, sondern in der Grube erzeugt. Am Boden befindet sich ein Wasserbad, das mit Heizschlangen durchzogen ist. Die Heizschlangen, welche mit Heißwasser betrieben werden können, erhitzen das Wasserbad und bringen das Wasser zum Verdampfen. Der Temperaturanstieg erfolgt dabei wesentlich gleichmäßiger, was zu einem schonenderen Dämpfvorgang des Holzes führt. (Kollmann; 1962)

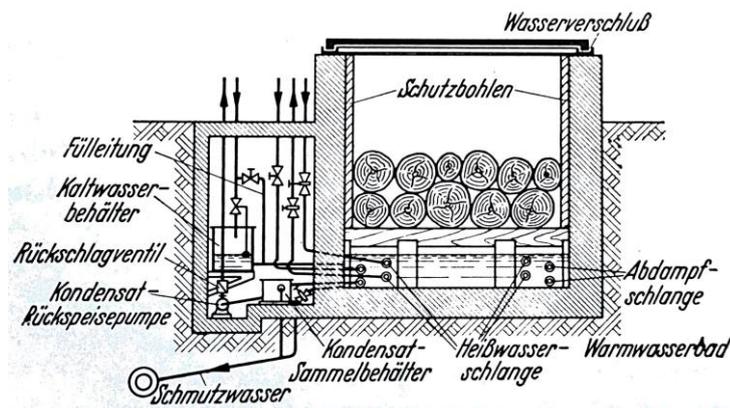


Abbildung 17: Dämpfgrube für indirekte Beheizung (Doffiné; 1956)

Das schnellere Aufheizen beim direkten Verfahren führt bei empfindlichen Holzarten zu einem Aufreißen. Durch den Temperaturanstieg nennt Vorreiter (1958) zwei mögliche Arten der Rissbildung: Zum einen ist der Grund für starke Außenrisse in einer verstärkten Quellung des Holzes zu finden. Zum anderen können Kernrisse auftreten, wenn die Dämpftemperaturen, durch das schnelle Aufheizen, im Inneren zu gering sind. Zudem soll nicht allzu heiß gedämpft werden, um die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens zu gewährleisten (Kollmann; 1962).

Rowell (2013) schreibt, dass es besonders wichtig ist, auf die Ausbildung der Kammern acht zu geben. So sind die meisten Kammern aus Stahlbeton. Diese sollen so geplant werden, dass eine gute Zirkulation des Dampfes gewährleistet ist. Die Türen und Abdeckungen sollen gut isoliert sein, um unnötige Energieverluste so gering wie möglich zu halten. Temperatursensoren im Inneren sollen den Prozess überwachen und steuern. Mit einem exakten System bleibt die Temperaturschwankung in einem Bereich zwischen 1 und 2°C.

Die Temperatur im Inneren des Holzes ist äußerst wichtig, da bei zu kurzer Dämpfdauer der Stamm außen warm und weich ist, im Inneren aber Bereiche im Stammquerschnitt vorhanden sind, welche noch nicht plastifiziert und daher nur bedingt schälbar bzw. messerbar sind. Dies führt dazu, dass die Furniere, wenn das Messer auf die kalte Schicht trifft, brechen. Im schlimmsten Fall kommt es zu einem „chuck spin-out“. Dabei dreht sich die Einspannung des Blockes am Hirnholz weiter und der normalerweise rotierende Stamm bleibt am Messer stehen. Daher sollte die Differenz zwischen Innen und Außen kleiner als 6°C sein. Die Heizzeit ist laut Rowell (2013) proportional zum Durchmesser des Stammes. Bei einer Verdopplung des Durchmessers vervierfacht sich die Aufheizzeit. Für Buche gibt Rowell (2013) eine Dämpftemperatur von 80° Celsius an

3-2.3 SÄGEN, MESSERN UND SCHÄLEN

Für das Herstellen der Furniere werden drei verschiedene Verfahren angewendet, die im Folgenden beschrieben werden. Zum einen das Sägefurnier, als spangebende Methode, und zum anderen die Messer- und Schälurniere, als die spanlosen Arten der Herstellung. Messer- und Schälurniere müssen, wie bereits zuvor beschrieben vorbehandelt werden, um die für den Zuschnitt Prozess notwendige Plastizität (siehe 3-2.2 Dämpfen und Kochen des Rundholzes) zu erreichen.

Kollmann (1962) zählt folgende Punkte zur Erzielung ausreichender Furnierqualität auf, um bei der Herstellung eine gleichmäßige Dicke, Riss- und Bruchfreiheit sowie glatte Oberfläche zu erreichen:

- geeignete Holzart
- einwandfreier Faserverlauf und Wuchs, ausreichende Stammqualität
- wenn erforderlich: entsprechende Vorbehandlung durch Kochen oder Dämpfen
- Wahl der entsprechenden Schnittgeschwindigkeit
- Vibrationsfreiheit der Maschine
- entsprechende Einstellung, Schliff und Form von Messer und Druckleiste
- rechtzeitiger Werkzeugwechsel
- Schutz der Eisenteile gegen chemische Einwirkungen, um Verfärbungen des Holzes zu vermeiden

3-2.3.1 Sägefurnier

Die älteste Herstellungsart von Furnieren ist die mittels einer Säge. Sie gehört zur Art der spanhebenden Holzverarbeitung. Diese Herstellungsart hat aber deutlich an Bedeutung verloren, seit die spanlose Furniererzeugung entwickelt wurde. Die Holzausbeute ist beim Sägen deutlich geringer als beim Messern

oder Schälen und zudem weniger leistungsfähig. Das Auftrennen eines ganzen Holzstammes zu Furnieren ist deutlich zeitintensiver als bei der Herstellung von Messer- und Schäl furnieren.

Das Sägen wird heutzutage nur mehr bei hohen Qualitätsanforderungen an das Furnier verwendet bzw. wenn die Kosten für das Material keine große Rolle spielen. Angewendet wird es zudem auch noch dort, wo die spanlose Verarbeitung nicht möglich ist. Dies ist zum Beispiel bei folgenden Holzarten und Verwendungszwecken der Fall: Eiche für Türen, Zirbelkiefer für den Innenausbau, Erle und Riegelahorn für Musikinstrumente und Birnbaum für die Klavierindustrie. Die Furnierdicke von Sägefurnier bewegt sich zwischen 0,9 und 3 mm. (Kollmann; 1962)

Zur Herstellung werden zwei verschiedene Sägetypen verwendet: einerseits die Furnier-Gattersäge und andererseits die Furnier-Kreissäge.

Die Gattersäge ist ein Gerät zum Längssägen von Holz. Mittels eines Kurbelantriebs werden Hubbewegungen in Führung laufenden Längsrahmens ausgeführt. In diesem Rahmen sind ein oder mehrere Sägeblätter eingespannt. Die Vorschubrichtung erfolgt dabei senkrecht. In Abbildung 18 ist eine im Betrieb befindliche Gattersäge zur Herstellung von Furnieren zu sehen. Diese werden heute allerdings nicht mehr verwendet. Bei namhaften Herstellern sind zur Gänze nur mehr Furnierkreissägen im Einsatz. (Vorreiter; 1963)



Abbildung 18: Furnier-Gattersäge in Betrieb. Der Lattenverschlag verdeckt den Kurbeltrieb zwecks Unfallverhütung (Kollmann; 1962)

Die Furnier-Kreissäge setzte sich mit der Furniererzeugung um die Wende des 18. Jahrhundert durch, da zu dieser Zeit die industrielle Erzeugung von Sägefurnieren einsetzte. Die Kreissäge besteht aus versteiften Sägeblättern und hat, um die Schnittgenauigkeit und um das Furnier gegen Beschädigung zu sichern, einen eigenen Vorschubmotor für den Holzblock. Der Spanabfall beträgt zwischen 40 % und 60 %. Dies ist der große Nachteil gegenüber der spanlosen Verarbeitung. Das Sägefurnier weist dafür höhere Steifigkeitseigenschaften auf und ist unverfärbt, da die Vorbehandlung durch Dämpfen oder Kochen wegfällt und hat einen besseren Verbund der Fasern als Messer- oder Schäl furniere gleicher Dicke. Bei den Sägefurnieren bleiben die elastischen Kenngrößen gleich, da es zu keinen Strukturveränderungen durch das Plastifizieren auf Grund des Dämpfens bzw. Kochens kommt. Lediglich am Rand des Furniers kommt es durch den Auftrennprozess der Säge zu geringen Strukturstörungen. (Vorreiter; 1963) In Abbildung 19 ist eine moderne italienische Furnierkreissäge zu sehen.



Abbildung 19: Furnier- und Plattensäge mit Nachfräsaggregat Typ FILA (Casati Maschine; 2000)

3-2.3.2 Messerfurnier

Beim Herstellen von Messer-Furnier werden Holzblöcke, mittels Schneidwerk, in dünne, großflächige Furniere aufgetrennt.

Bei der Messerfurnierherstellung sind meist Edelfurniere das gewünschte Resultat. Es werden edle Holzarten, wie zum Beispiel Eiche, Ahorn, Kirschbaum, Nussbaum mit ungefähr 0,6 mm Dicke gemessert. Diese Furniere dienen meist als dekorative Decklage an die hohe Anforderungen bezüglich des Furnierbilds gestellt werden. Aus diesem Grund ist das Messern hierfür bestens geeignet, da man durch Aufteilen des Stammes unterschiedliche Maserungen des Holzes hervorrufen kann. Der Stamm kann dazu halbiert, gedrittelt oder geviertelt werden, ehe die Furniere mit der Messermaschine aufgetrennt werden. Mögliche Furnierbilder sind dabei entweder eine „blumige“ oder „gestreifte“ Maserung, wie in Abbildung 20 ersichtlich. (Becker, Zimmer; 2014)

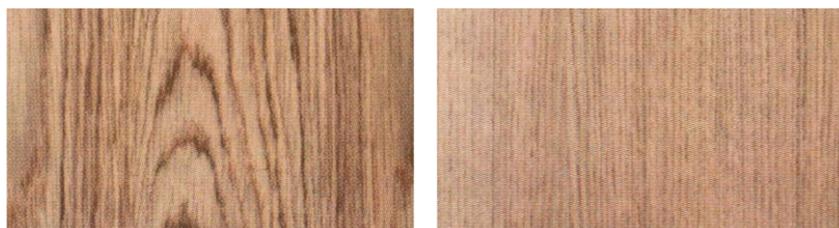


Abbildung 20: Eiche Blume und Eiche Streife (Becker, Zimmer; 2014)

In den nachfolgenden Erläuterungen sind die unterschiedlichen Herstellungstechnologien laut Becker, Zimmer (2014) angeführt.

Flachmessern

Beim Flachmessern wird der Stamm halbiert und mit der Kernseite am Messertisch befestigt. Das Messer schneidet von außen nach innen das Holz kontinuierlich ab. Der dabei durchgeführte Tangentialschnitt wird auch als Fladerschnitt bezeichnet. Am Beginn des Messervorgangs zeichnet sich am Furnier eine eher lebhaftere Fladertextur ab. Gegen Ende des Vorgangs, in der Nähe des Kernholzes, werden die Jahrringe im rechten Winkel angeschnitten. Dadurch erhält man ein streifiges Muster.



Abbildung 21: Flachmessern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Echt-Quartier-Messern

Bei diesem Verfahren wird der Stamm zu Beginn geviertelt. Der Schnitt erfolgt fast durchgehend im rechten Winkel zu den Jahrringen, daher erhält man hier eine streifige Textur.

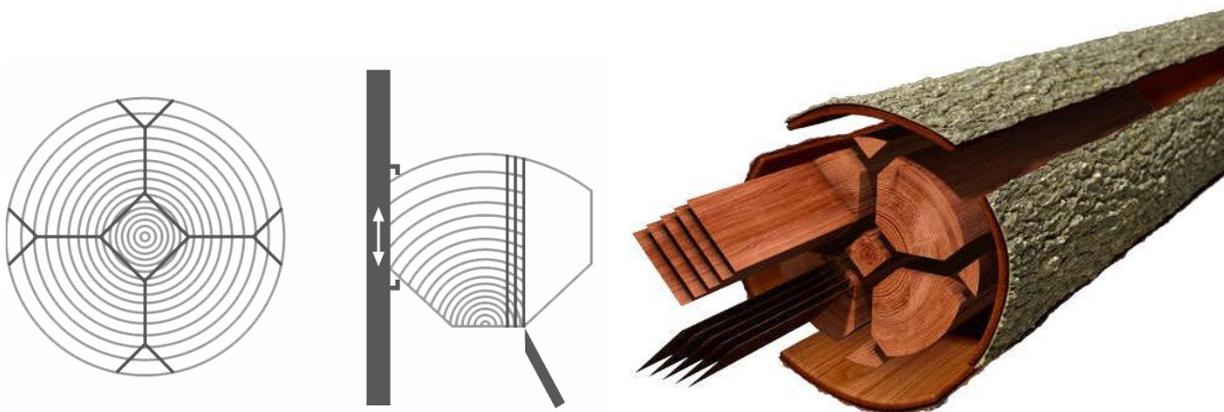


Abbildung 22: Echt-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Faux-Quartier-Messern

Faux-Quartier-Messern bedeutet so viel wie Halbrift-Messern. Dabei wird der Stamm geviertelt und parallel zum Radialschnitt gemessert. Am Beginn stellt sich ein halbblumiges Muster ein, das zum Ende in ein gestreiftes übergeht.

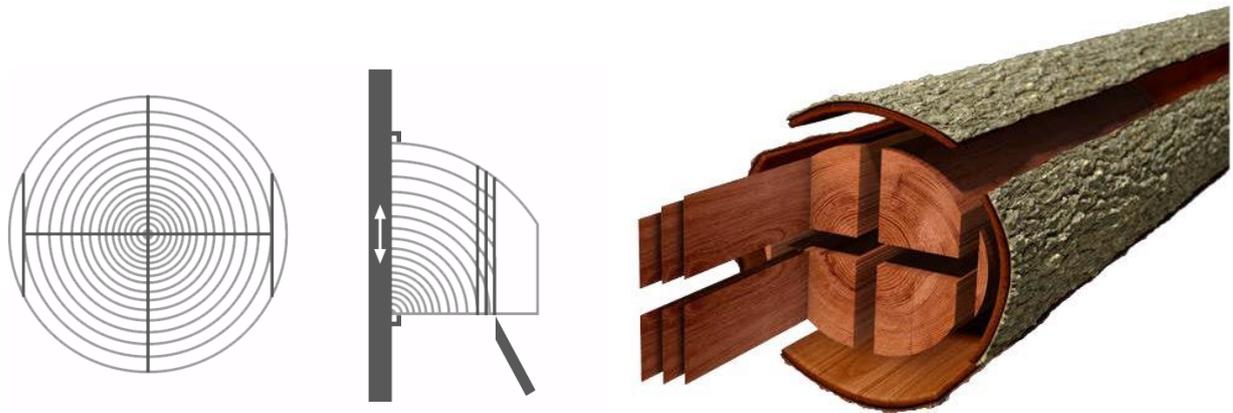


Abbildung 23: Faux-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Flach-Quartier-Messern

Das Flach-Quartier-Messern ist ähnlich dem Flachmessern, lediglich wird es hier mit einem Viertelstamm durchgeführt. Die Textur des fertigen Furniers ist blumig.

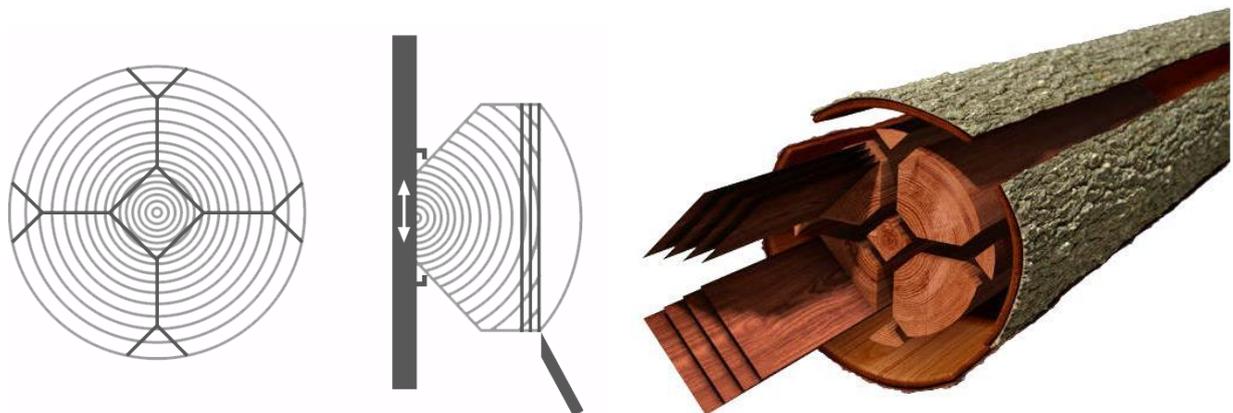


Abbildung 24: Flach-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Beim Furniermessern unterscheidet man hauptsächlich zwischen 2 verschiedenen Verfahren: das waagrechte und senkrechte Furniermessern. Beim waagrechten Messern wird der vorbehandelte Block zurecht gehobelt, damit er eine ebene Fläche aufweist. Anschließend wird der Block, mit der gehobelten Fläche nach unten, auf einen waagrechten Tisch aufgelegt und mittels Spannhacken auf diesen gepresst. Der Block muss fixiert sein und darf sich während des Messervorgangs nicht verschieben lassen. Zudem darf der Tisch keine Durchbiegungen aufgrund des Eigengewichts des Holzes und des auftretenden Drucks beim Schneiden zulassen. Eine gute Furnierqualität kann nur bei Einhaltung dieser Punkte erreicht werden.

Seitlich des Tisches sind die Ständer angeordnet. Auf ihnen liegen die Führungsbahnen, auf denen der Werkzeugschlitten gleitet. Wichtig ist, dass die Führungsbahnen sehr eben und stets sauber sind, um ein gefahr- und möglichst reibungsloses Gleiten zu ermöglichen. Immerhin muss auf diesen Bahnen das ganze Gewicht des sich in Bewegung befindlichen Werkzeugschlittens abgefangen werden. Der Werkzeugschlitten wiegt zwischen 5000 und 7000 kg. Am Werkzeugschlitten ist der Messer- und Druckbalken angebracht, mit dem die Furniere (durch Vor- und Rückwärtsbewegungen des gesamten Werkzeugschlittens) vom Block geschnitten werden. Seitlich des Schlittens sind die Bettschlitten montiert, welche auf den Führungsbahnen gleiten. Nachdem ein Schneidezyklus absolviert ist, wird der Tisch nach dem Rücklauf des Schlittens für den nächsten Schneidevorgang um die gewünschte Furnierdicke gehoben.

Große Bedeutung für die beste Erzeugung von Furnieren kommt dem Druck- und Messerbalken (Abbildung 25) zu. Wichtig ist dabei, dass die beiden sehr starr sind und sich in keiner Weise während des Schneidevorganges verschieben lassen. Zudem sollen die Messer schnell gewechselt und eingestellt werden können.

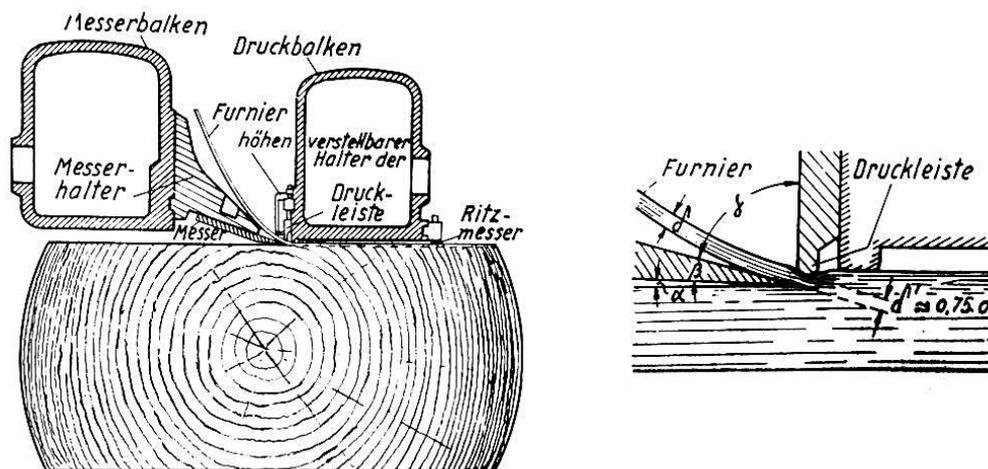


Abbildung 25: Teile und Wirkung eines Schneidwerkes von Furniermessermaschinen (Vorreiter; 1963)

Das Furnier soll nach dem Schneiden unbeschädigt aus dem Spalt zwischen Messer- und Druckbalken herausgleiten können. Die Druckleiste ist in der Waagrechten und in der Höhe verstellbar. Die richtige Einstellung ist essentiell für eine gute Furnierqualität und zudem abhängig von der Holzart, der Furnierdicke und dem Feuchtigkeitsgehalt bzw. der Dämpfung oder dem Kochen. Hier bedarf es langer Erfahrung im Umgang mit dem Messern von Furnieren, um hier die richtigen Einstellungen vorzunehmen. Der Spalt zwischen Messer- und Druckleiste beträgt zwischen 65 und 90 % der späteren Furnierdicke. In Abbildung 25 ist der Abstand mit 75 % der Dicke vermerkt. Um einen besseren Anschnitt des Holzes zu ermöglichen, sind das Messer und der Druckbalken schräg am Werkzeugschlitten befestigt und treffen in einer Schräglage zwischen 2° und 10° auf das Holz auf.

Beim senkrechten Messern steht der Tisch senkrecht. Der Block wird mittels Hebezeug zum Tisch gebracht und mit Spannklauen auf diesem befestigt. Bei modernisierten bzw. neuen Maschinen erfolgt die Befestigung mittels Unterdruck. Dadurch wird wertvolle Zeit bei der Befestigung des Blockes gespart. Im Gegensatz zum waagrechten Verfahren bewegt der Tisch den Holzblock am Messer vorbei. Der Werkzeugschlitten bleibt waagrecht und wird nach einem Schneidezyklus um die Furnierdicke vorgeschoben. Beim Messern von Furnieren wird nicht der ganze Block verarbeitet. Gegen Ende bleibt ein Restbohlen von ca. 20 bis 25 mm Dicke übrig. (Kollmann; 1962)



Abbildung 26: Einheben eines Blockes, Messervorgang beim senkrechten Furniermessern, Restbohle auf Unterdruckhalterung, Messer- und Druckbalken

In Abbildung 26 ist das Einheben des Blockes mittels Hebezeug zu sehen. Es handelt sich dabei um eine senkrecht arbeitende Furniermessermaschine. Der Block wird flachgemessert und daher der halbierte Stamm mit der Kernseite am Tisch befestigt. Die Befestigung geschieht hier mithilfe von Unterdruck. Im nächsten Bild ist der Schneidprozess ersichtlich. Der Tisch mit dem Stamm rechts bewegt sich auf und ab, während sich der Werkzeugschlitten nur um die Furnierdicke nach vor bewegt. Im unteren Bild sind zuerst der Restbohlen auf der Maschine zu sehen und der Messer- und Druckbalken.

Kollmann (1962) geht im Detail auf die Schneidwerkzeuge ein. Sie haben einen großen Einfluss auf die Furnierqualität. Das Messer hat die Aufgabe, das Furnier vom Stamm zu trennen, während die Druckleiste das abgetrennte Furnier zusammenpresst. Die Druckleiste hat dabei zwei Aufgaben zu erfüllen. Zum einen muss die Druckleiste die Messerschneide führen. Zum anderen drückt sie das Holz vor der Messerschneide zusammen. Dadurch wird ein Spalten des Holzes verhindert. Das Holz würde sonst entlang seiner Struktur aufspalten und es würde sich keine glatte Furnieroberfläche ausbilden. Messer und Druckbalken sind meist aus Stahl und dürfen sich im eingespannten Zustand nicht durchbiegen.

In Abbildung 27 sind das Messer und die Anordnung der Druckleiste erkennbar. Der Keilwinkel β beträgt zwischen 16° und 20° . Für den Schnittwinkel δ ist noch der Freiwinkel α_1 erforderlich, der meist 1° beträgt. Der Freiwinkel ist notwendig, um ein leichtes Vorbeigleiten des Schneidwerkzeuges am Stamm nach dem Messern zu ermöglichen.

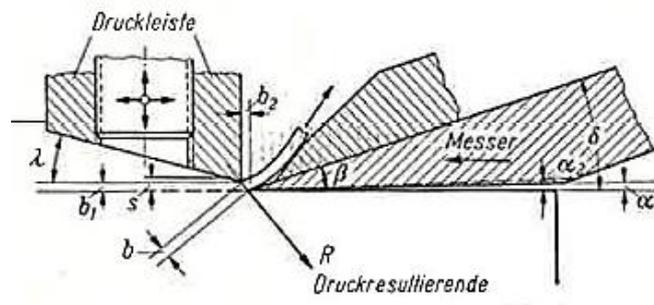


Abbildung 27: Anordnung von Messer und Druckleiste mit zugehörigen geometrischen Bedingungen (Kollmann; 1962)

Ein stumpfer Keilwinkel sorgt dafür, dass das Messer über einen längeren Zeitraum genutzt werden kann, da es sich nicht so stark abnützt. Ein spitzerer Winkel erzielt eine geringere Spaltwirkung und ist vor allem bei empfindlichen und weichen Hölzern zu verwenden, da sich daraus eine bessere Schnittgüte ergibt. Wichtig ist zudem stets auf die geradlinige und scharf geschliffene Beschaffenheit des Messers zu achten.

Bei der Druckleiste ist weiters darauf zu achten, dass durch die zwangsläufige Verdichtung des Holzes der aufbrachte Druck auf das Holz nicht zu groß wird. Dies kann zur Folge haben, dass das Gewebe zerstört wird und sich Risse und Brüche in der Oberfläche abzeichnen. Besonderes Augenmerk gilt dem Andrückwinkel λ . Ist er zu klein gewählt, wirkt er als Maschinenbremse und dies kann eine Minderung der Oberflächenqualität zur Folge haben. Ist der Winkel zu groß und die Leiste dadurch zu spitz am Holz angesetzt, kann es zu einem Aufreißen der Furnieroberfläche kommen.

3-2.3.3 Schäl furnier

Das Schäl furnier ist ein bogenförmiges, gleichmäßig dickes und großflächiges Furnierblatt. Bei der Herstellung wird der Holzblock eingespannt und um seine faserparallele Achse gedreht. Das Messer, mit dem das Furnier vom Stamm geschält wird, bleibt dabei starr. Es wird lediglich um die Furnierdicke vorgeschoben. Die Messerkante kann dabei parallel oder schräg zur Faserrichtung des Holzes sein. Die geschälten und gekrümmten Furnierlagen werden nach dem Schälprozess flachgelegt. Es gibt wie beim Messern verschiedene Arten der Blockeinspannung. (Vorreiter; 1963)

Diese sind das Rund-Schälen, Halbrund-Schälen (Stay-Log-Schälen), das Rift-Schälen und das Aus-dem-Herzen-Schälen. Im Folgenden sind die verschiedenen Arten nach Wagenführ et al. (2011) erläutert.

Halbrundschälen

Zum Halbrundschälen wird der Stamm halbiert und mit seiner Kernseite auf einem Drehbalken befestigt. Die Drehachse liegt dabei am Drehbalken. Aufgrund dieser exzentrischen Drehbewegung wird dieses Verfahren auch als exzentrisches Schälen bezeichnet. Der Block wird von außen her geschält. Die Jahrringe werden dabei flach angeschnitten und es entsteht seitlich am Furnier eine streifige und in der Mitte eine blumige Textur.

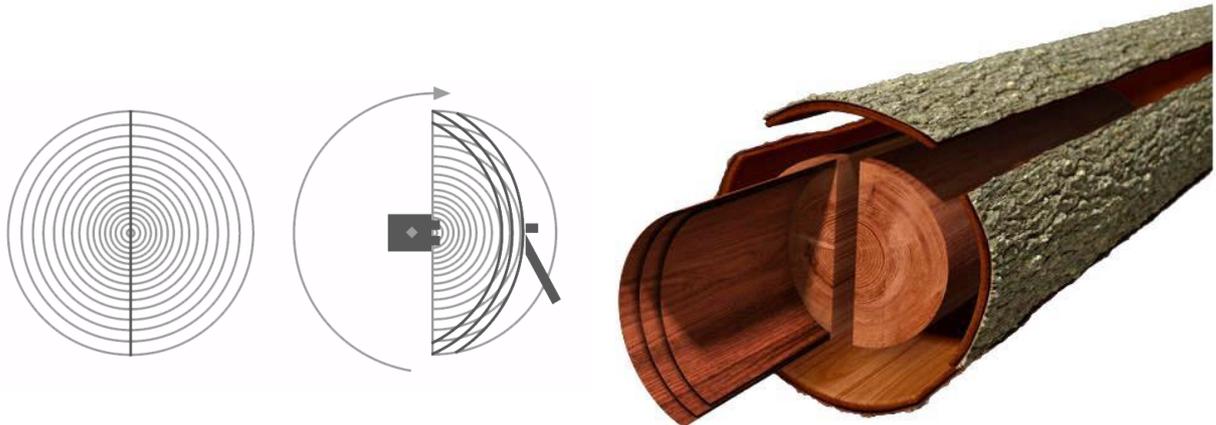


Abbildung 28: Schältechnik beim Halbrundschälen (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Riftschälen

Bei dieser Technik wird der Stamm geviertelt und mit einer ebenen Seite am Drehbalken befestigt. Von der gekrümmten Seite des Blockes her wird geschält. Auch dieses Verfahren arbeitet exzentrisch. Die Maserung nach dem Schälen ist streifig.

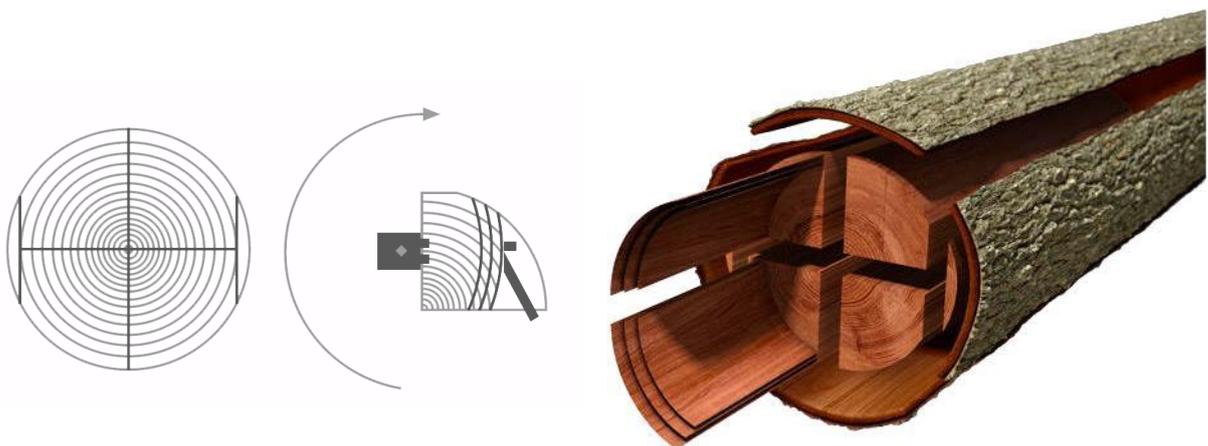


Abbildung 29: Schältechnik beim Riftschälen (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Aus-dem-Herzen-Schälen

Hierbei wird der Stamm geviertelt oder gedrittelt. Beim Befestigen am Drehbalken wird die Kernseite des Blockes zum Messer hin platziert. Geschält wird daher von innen heraus. Dieses Verfahren ermöglicht die Gewinnung von breiteren Furnieren aus dem Block heraus. Die Maserung ist besonders blumig.

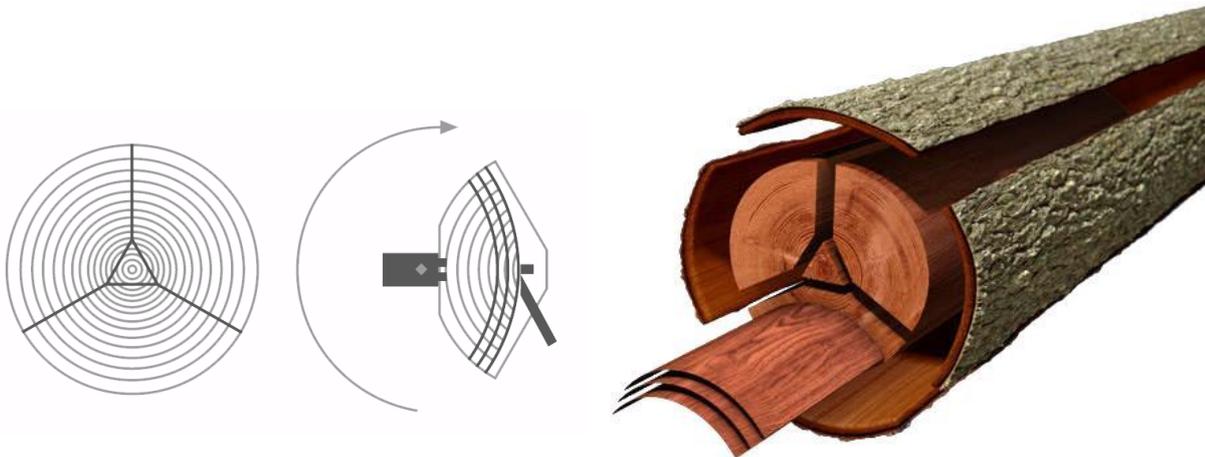


Abbildung 30: Schältechnik beim Aus-dem-Herzen-Schälen (Danzer Europe Veneer) (Wagenführ et al.; 2011) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)

Rundschälen

Beim Rundschälen wird der gesamte Stamm verwendet. Dieser wird in seiner Mittelachse eingespannt und spiralförmig abgeschält. Theoretisch können Furniere in der Länge der gesamten Abwicklungslänge des Stammes erzeugt werden. Meist werden die Furniere aber mittels Clippmesser abgelängt oder es wird vor Beginn des Schälvorgangs ein Schnitt mittels einer Handkreissäge über die gesamte Stammlänge gemacht, der die Furniere bereits während des Schälvorgangs ablängt. Es entsteht beim Rundschälen eine unregelmäßig gefladerte Maserung.

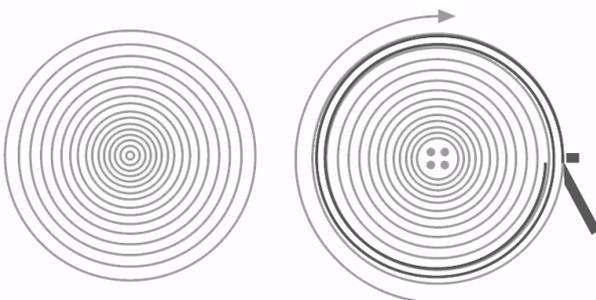


Abbildung 31: Schältechnik beim Rundschälen (Danzer Europe Veneer)

Das Rundschälen ist sicherlich das wichtigste Verfahren, aufgrund der großen Furnierausbeute. Eine Schälmaschine besteht dabei aus seitlichen Ständern, welche die Hauptlast abtragen und auch die Antriebsteile beherbergen. Zwischen den Ständern sind der Druck- und Messerbalken platziert mit denen das Furnier vom Stamm geschält wird. Die Stammeinspannung erfolgt mit seitlich an den Ständern angebrachten hydraulischen Spindeln mit Klauen, siehe Abbildung 32, welche sich in die Stammenden bohren. Die Größe der Klauen ist von der Beschaffenheit des Holzes abhängig. Bei einer höheren Qualität und einem guten Zustand des Stammes können kleinere Spindeln verwendet werden als bei Stämmen schlechterer Qualität. Hier müssen größere Spindeln verwendet werden, um den Einspanndruck

gleichmäßiger auf die Holzfläche aufzuteilen. Der Stamm muss in der Lage sein den Einspanndruck der Spindeln aufzunehmen ohne an der Hirnholzseite aufzuspalten. Ist die Einspannung erfolgt, wird der sich drehende Holzstamm mit dem Messer immer weiter abgeschält, indem der Werkzeugschlitten mit dem Messer um die gewünschte Furnierdicke gegen den Stamm geschoben wird und zwar solange, bis nur mehr eine Restrolle übrig bleibt. Die Größe dieser Rolle hängt von der Größe der Einspannklaue ab. Deswegen sollen diese, um eine gute Holzausbeute zu gewährleisten, so klein wie möglich sein. In Abbildung 32 ist eine Spindel erkennbar, die eine äußere zurückfahrbare Klaue besitzt. Dadurch kann gegen Ende die äußere, nicht mehr benötigte Klaue zurückgefahren und mit einer kleineren Klaue weitergeschält werden. Zusätzlich bedarf es allerdings einer Abstützung der Restrolle über die Stammlänge, um Durchbiegungen zu vermeiden und den Druck auf das Messer aufrechterhalten zu können.



Abbildung 32: Spindel mit zurückfahrbarer Außenklaue und angeschälter Rundholzstamm, Restbohlen mit zusätzlicher Abstützung und Werkzeugschlitten mit Messer- und Druckbalken

Auch gibt es, um die Restrolle effizient zu nutzen, die Möglichkeit, die Rollen auf kleineren Maschinen, sogenannten Restrollenschälmaschinen, weiter zu schälen.

Der Werkzeugschlitten besteht aus dem Messer- und Druckbalken sowie zwei Lagern, den sogenannten Supportern. In den Supportern sind der Messer- und Druckbalken gelenkig gelagert. Diese Lager müssen stark bemessen sein, da es beim Anschälen unrunder Stämme oder beim exzentrischen Schälen zu sehr großen Beanspruchungen kommt. Die Kräfte, die durch Stöße entstehen können, müssen von den Supportern weiter in die Ständer abgetragen werden.

Beim Messer- und Druckbalken gilt das gleiche Prinzip, wie bei der Furniermessermaschine. Die Drucklinie der Druckleiste soll genau auf die Messerschneide ausgerichtet sein und der Druckbalken

immer parallel zum Messer verlaufen. Die Abmessungen und Anordnung von Messer und Druckbalken sind in Abbildung 33 zusehen. (Kollmann; 1962)

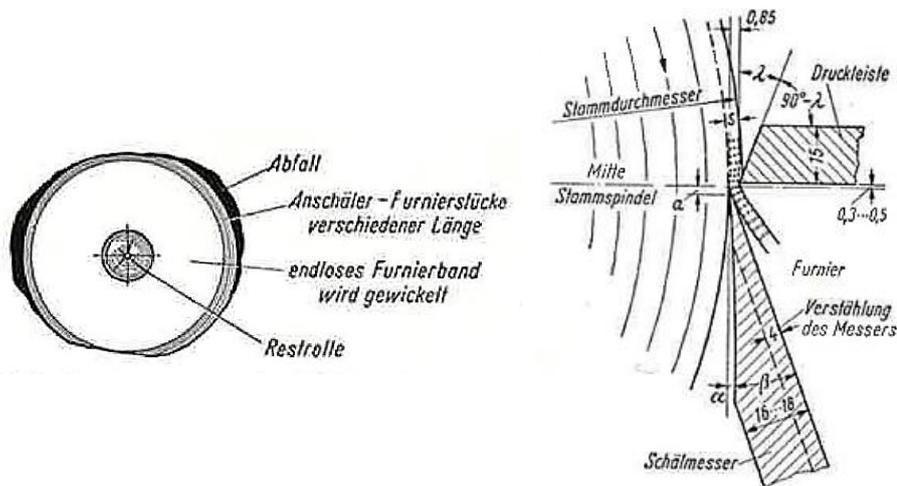


Abbildung 33: Gesamtausbeute (Abfall, Anschäler, endloses Furnierband, Restrolle) beim normalen Rundschälen und wichtigste Größen beim Schnittvorgang in Rundschälmaschinen (Kollmann; 1962)

Abbildung 33 zeigt schematisch die Furnierausbeute bei einem normalen Stamm. Der äußere Ring der abgeschält wird, ist Abfall, da aus diesem Material keine brauchbaren Furniere aufgrund der zu kleinen Abmessungen gewonnen werden können. Der Anschäler bringt schon Furniere in gleichmäßigen Dicken mit größerer Fläche hervor. Lediglich müssen die Furniere nach dem Schälen noch von ihren unregelmäßigen Kanten befreit werden. Dies geschieht durch Zurechtschneiden der Furniere. Ist der Stamm über den gesamten Umfang gleichmäßig abgeschält, ist die Form des Stammes annähernd kreisrund, so ist dies der Hauptteil, aus dem die meisten Furniere gewonnen werden. Er kann zu einem endlosen Furnier verarbeitet werden. Die Restrolle in der Mitte wird durch den Klauendurchmesser an der Einspannvorrichtung bestimmt. (Kollmann; 1962)

Kollmann et al. (1975) erläutern mit Hilfe von Abbildung 34 die Wichtigkeit des Druckbalkens. Der Druck auf die jeweilige Holzart abgestimmt sein, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Bei falscher Einstellung kommt es zu zahlreichen Schälrisen und einer rauen Furnieroberfläche.

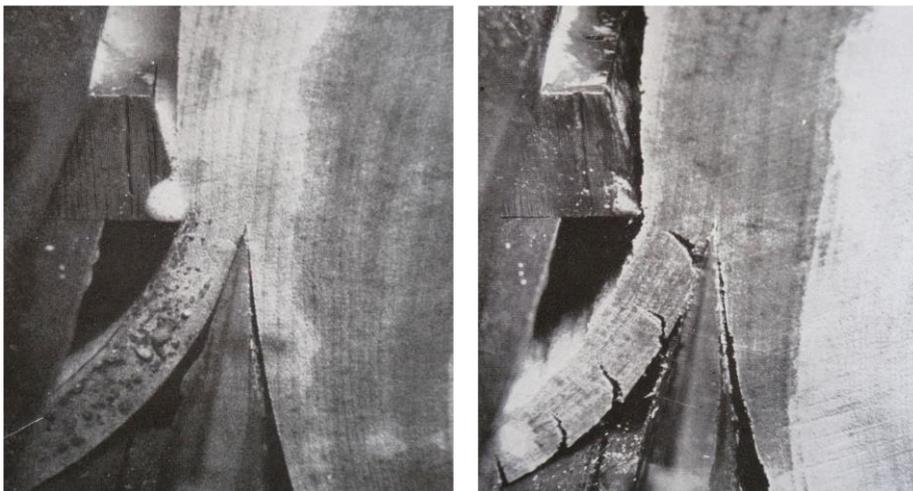


Abbildung 34: zu starker Druck des Druckbalkens mit dennoch exzellenter Furnierqualität und Schneidvorgang ohne Druckbalken mit Schälrisen (Fleischer; 1949)

Die Herstellung von Schäl furnieren erfolgt heutzutage durch computergesteuerte Anlagen. So werden die Stämme vor dem Einspannen durch Laserkameras digitalisiert und dann automatisch zentriert. Nach der Zentrierung erfolgt das Einspannen in die Anlage. Hinter dem Messer, wo die Furniere die Schälmaschine verlassen, werden sie von einer Kamera gescannt, die gleich die Qualität der Furniere erkennt und mittels einer Software eine Schnittoptimierung vornimmt. Die Software steuert sechs rotierende Messer, die die Furniere auftrennen. (Becker, Zimmer; 2014)

3-2.3.4 Spiralschäl furnier

Die Herstellung von Spiralfurnieren ist ein Sonderfall, der zur Anwendung kommt, wenn ganz besonders gemaserte Furniere hergestellt werden sollen. Hierbei wird der Stamm um die Längsachse gedreht und ähnlich wie beim „Bleistiftspitzen“ unter einem Winkel zur Drehachse abgeschält. Das Messer wird dabei am Hirnholzende des Stammes angesetzt. Dieses Verfahren wurde vom Kunstschlermeister V. Ovenhausen in Steinheim/Westfalen entwickelt. Die Furniere haben eine reizvolle Zeichnung und werden vor allem für das Überfurnieren von Möbeln verwendet. Die Festigkeit ist gegenüber den anderen Herstellungsarten relativ gering, weil die Furniere einen schrägen Faserverlauf besitzen. Die Furniere müssen daher sehr schonend behandelt werden. Verwendet wird frisches oder gedämpftes Holz, das zu Furnieren mit einer Dicke von 0,6 bis 0,8 mm verarbeitet wird. Der Stamm wird oben mit einer Stammspindel eingespannt, welche auch für die Drehung verantwortlich ist. Seitlich angeordnete Leitrollen sorgen für die Führung des Stammes. In Abbildung 35 ist das Spiralschälens schematisch dargestellt. (Vorreiter; 1963)

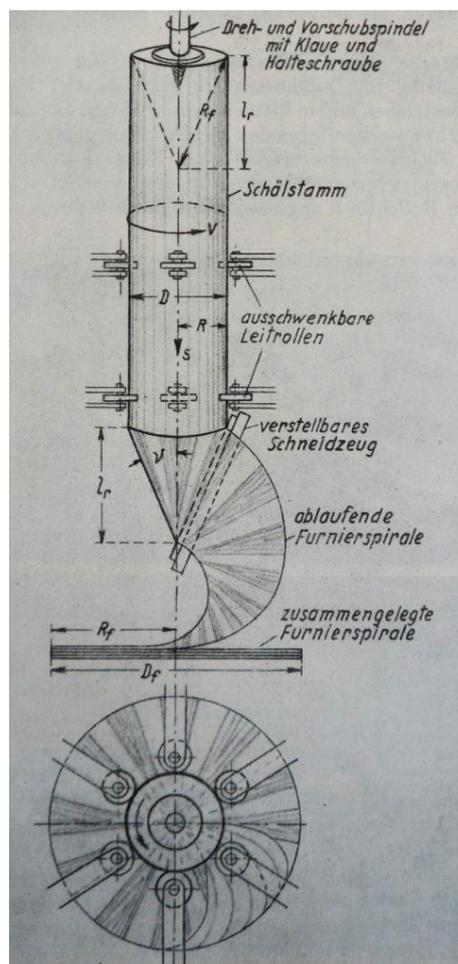


Abbildung 35: schematische Darstellung des Spiralfurnierschälens (Vorreiter; 1963)

3-2.4 TROCKNEN

Nach dem Auftrennen weisen die Furniere eine hohe Feuchtigkeit auf. Diese schwankt abhängig von der Holzart und dem Kern- und Splintholzanteil. Weiters spielt es eine Rolle, ob das Holz gedämpft oder gekocht wurde. Der Feuchtigkeitsgehalt liegt meist zwischen 30 % und 110 %. Die Trocknung ist erforderlich, um die Furniere weiterverarbeiten zu können und sie vor Pilzbefall und chemischen Reaktionen zu schützen. Hauptsächlich wird hierfür die künstliche Trocknung mit Maschinen und warmer Luft verwendet. Nach dem Trocknungsvorgang soll die Endfeuchtigkeit der Furniere zwischen 8 % und 12 % liegen. Bei Furnieren für die Sperrholzindustrie zwischen 6 % und 8 %. Zudem soll die Feuchtigkeit gleichmäßig und die Furniere nicht wellig sein. Eine glatte Oberfläche ist für die weitere Verarbeitung von großer Bedeutung.

Früher wurden die Furniere noch an der Luft getrocknet oder in Trockenkammern gelagert. Heutzutage werden moderne Durchlauftrockner verwendet. (Kollmann; 1962)

Folgende Forderungen müssen nach Ebert (1950) für Trocknungsmaschinen gelten:

- kurze Trocknungszeiten
- geringer Platzbedarf bei großer Leistung
- niedriger spezifischer Wärmeverbrauch
- automatisches Arbeiten
- gleichmäßige Trocknung über die gesamte Fläche
- glatte und rissfreie Furniere nach der Trocknung

Die Durchlauftrockner sind kanalartige Trocknungsanlagen, die gut isoliert sind, um die Energieverluste so gering wie möglich zu halten. Sie beinhalten zudem eine Innenheizung und eine Belüftung, mit denen die warme Luft zum Trocknen erzeugt wird. Die Trocknungsanlage wird an einem Ende mit den feuchten Furnieren beschickt und diese werden dann über eine Fördereinrichtung während dem Trocknungsvorgang durch die Anlage an das andere Ende befördert, wo sie die Maschine mit dem gewünschten Trocknungsgrad verlassen. Bei den Fördereinrichtungen unterscheidet man hauptsächlich zwischen Rollenbahnen und Drahtgewebebändern. (Kollmann; 1962)

3-2.4.1 Rollenbahntrockner

Beim Rollenbahntrockner befördern Rollenpaare, welche in gewissen Abständen angeordnet sind, die Furniere durch die Anlage. Die Rollen werden durch Ketten angetrieben. Wichtig für den Trocknungseffekt ist der Abstand der Rollen. Diese sind herstellerabhängig und werden zudem durch die Furnierdicke bestimmt. So kann der Abstand für 1 mm dicke Furniere zum Beispiel 85 mm betragen. Ein kleiner Rollenabstand bringt einen besseren Glätteffekt der Furniere mit sich, während ein größerer Abstand eine bessere Luftführung zur Folge hat. Belüftet wird die Anlage entweder längs oder quer zur Bewegungsrichtung der Furniere. Der Luftstrom bei der Längsbelüftung bewegt sich entgegen der Förderungsrichtung der Furniere. Die Luft bei der Querbelüftung wird hingegen seitlich, über die gesamte Länge des Trockners, eingeblasen. Die Temperatur im Trockner beträgt, abhängig von Holzart, Dicke und Feuchtegehalt der Furniere zwischen 90 und 150°C. Hat das Furnier die gewünschte Trocknung erreicht, kommt es am Ende in ein Kühlfeld und wird dort mit Frischluft bei Raumtemperatur abgekühlt. Über die Geschwindigkeit der Rollen lässt sich der Trocknungsgrad sehr gut steuern. Die Durchlaufzeit beträgt dabei im Mittel zwischen 15 und 20 Minuten. In der Anlage können mehrere Furniere, durch die Anordnung mehrerer Rollenbahnen übereinander, getrocknet werden. Abbildung 36 zeigt einen modernen Rollenbahntrockner mit angeschlossener Furnierzuschnittanlage. (Kollmann; 1962)

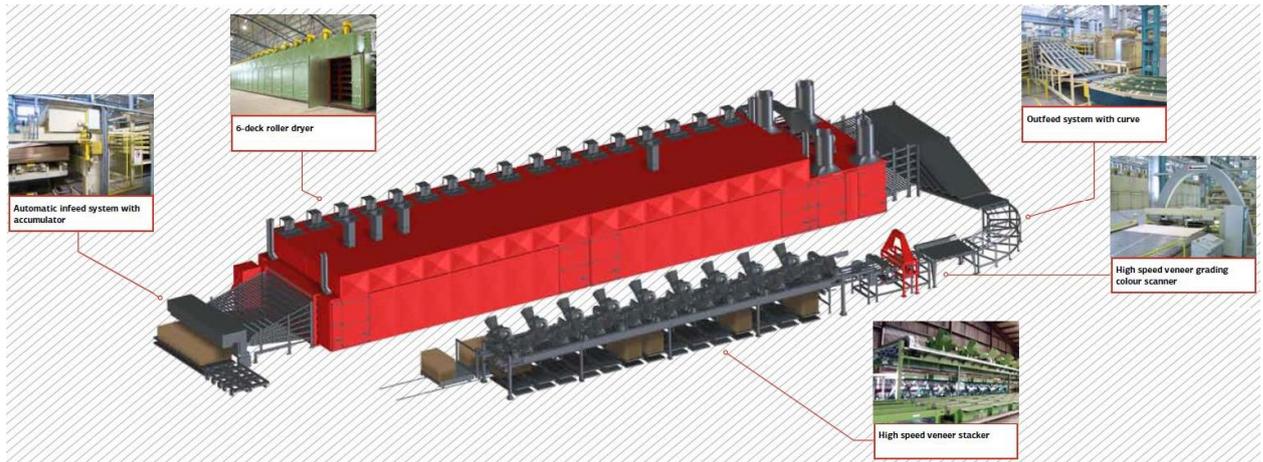


Abbildung 36: Durchlauffurniertrockenanlage mit Rollenförderung (Grenzebach; 2013)

Die Rollenbahntrockner sind energieeffizienter als Bandtrockner, da die Rollen beheizt sind und die Furniere durch den direkten Kontakt der Rollen durch Wärmeleitung zusätzlich getrocknet werden. Die Rollen werden mit Wasserdampf oder heißem Wasser beheizt. Der Rollendurchmesser beträgt dabei im Mittel 100 mm. (Rowell; 2013)

3-2.4.2 Bandtrockner

Beim Bandtrockner werden die Furniere durch paarweise zusammenwirkende, endlose Drahtgewebebänder durch die Anlage befördert. Die Furniere befinden sich dabei zwischen den Bändern. Die Bänder werden durch Walzen angetrieben. Mit ihnen kann die Durchlaufgeschwindigkeit geregelt werden. Der Vorteil gegenüber der Trocknungsanlage mit Rollenförderung besteht darin, dass sehr empfindliche Furniere transportiert werden können. Sind die Furniere zudem sehr dünn oder klein, kann nur mehr mit dem Bandtrockner gearbeitet werden, da ein Durchhängen, wie beim Rollentrockner zwischen den Rollen, nicht möglich ist. Die Belüftung erfolgt entweder längs oder quer. Die warme Luft weist eine Temperatur, abhängig von der Holzart, zwischen 80 und 140°C auf. Zudem sind mehrere Bahnen übereinander möglich. Bei den Bändern ist zu beachten, dass sie regelmäßig kontrolliert und nachgespannt werden, da es zu Längungen kommen kann. Auch hier befindet sich am Ende ein Kühlfeld um die getrockneten Furniere für die weitere Verarbeitung schnell auf Raumtemperatur abkühlen zu können. (Kollmann; 1962)

3-2.5 SORTIEREN UND ZUSCHNEIDEN

Nach dem Trocknen wird mithilfe einer Kamera eine optoelektronische Prüfung durchgeführt. Eine Software verarbeitet dabei die Bilder und sortiert die Furniere nach festgelegten Qualitätskriterien. Wuchsmerkmale sind dabei Äste, Farbflecken, Risse und Wimmerwuchs. Die Klassifizierung erfolgt nach EN 635-2 Sperrholz – Klassifizierung nach dem Aussehen der Oberfläche – Teil 2: Laubholz. Dort wird die Oberfläche in 5 Klassen eingeteilt. Von den Decklagen mit höchsten Anforderungen bis hin zu den Mittellagen, welche Äste, Farbflecken, Wimmerwuchs und Risse aufweisen dürfen. (Becker, Zimmer; 2014)

Das Zuschneiden der sortierten Furniere erfolgt mit sogenannten Furnierpaketscheren. Diese müssen stabil gebaut sein, damit die Maschine während dem Schneiden keine Schwingungen erzeugt und die Messer nicht ausweichen können. Für die Furnierpakete ist ein sauberer Schnitt erforderlich. Die Furniere werden in der Maschine vor dem Schnitt hydraulisch oder pneumatisch eingespannt. Es werden immer mehrere Furnierlagen zu sogenannten Paketen zusammengefasst und gleichzeitig geschnitten. Hilfsmittel,

wie Anschläge, sind an der Maschine angebracht und ermöglichen ein paralleles Schneiden der Furniere. Die Furniere werden meist in einem Vorschnitt geschnitten und dann mit einem nachlaufenden Obermesser, welches nur wenige Zehntelmillimeter abschneidet, zugeschnitten. Dadurch hat der Schnitt eine geringere Spaltwirkung und man erhält einen sauberen Schnitt des Holzes. (Kollmann; 1962)

Laut Vorreiter (1963) gibt es 8 Scherenarten, die sich in Form und Bewegungsrichtung unterscheiden und in Abbildung 37 dargestellt sind:

- a) schräge Schneidkante
- b) keilförmige Schneidkante
- c) dachförmige Schneidkante
- d) gerade Schneidkante mit Hebelschnitt
- e) gerade Schneidkante mit Schwingschnitt
- f) gerade Schneidkante mit Hubschnitt
- g) gerade Schneidkante mit Wiegenschnitt
- k) gerade Schneidkante mit Rollenschnitt

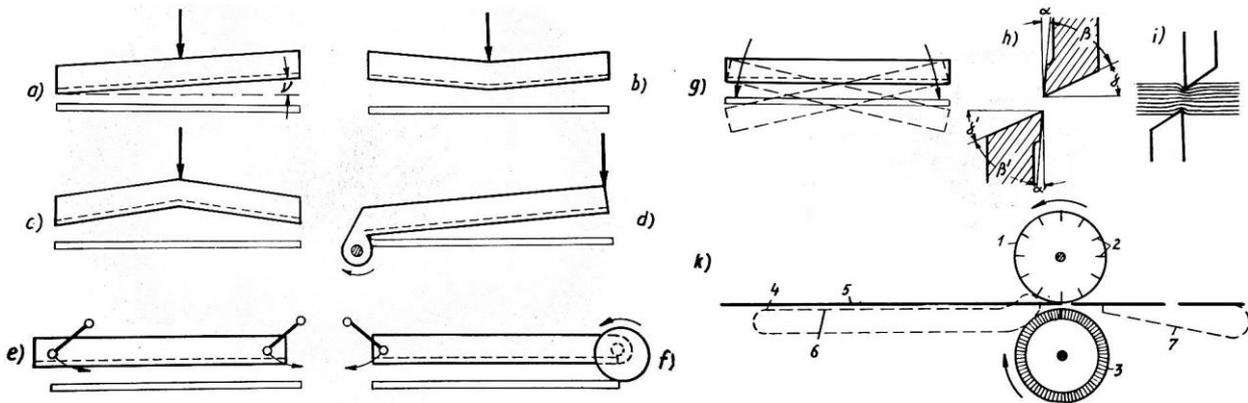


Abbildung 37: Scherenarten, h) Schneiden-Übergriff und i) Schnittkerbe (Vorreiter; 1963)

KAPITEL 4: UMFORMEN VON FURNIER

In diesem Kapitel sollen die Möglichkeiten des Umformens von Furnieren aufgezeigt werden. Dieser Umformungsprozess gehört zur spanlosen Formgebung von Holz. Spanlos aus dem Grund, da während dem Umformprozess keine Holzspäne als Nebenprodukt anfallen. Das spanlose Umformen von Furnieren, im Besonderen das Formpressen, entwickelte sich aus dem Biegen von Vollholz, welches hauptsächlich an stabförmigen Holzstücken vorgenommen wird. Durch das Formpressen von Furnieren gelingt es, auch größere flächige Bauteile umzuformen.

4-1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG SPANLOSER FORMGEBUNG VON HOLZ

Die Anfänge des Holzbiegens und Umformens reichen bis zum Beginn der Menschheitsgeschichte. So wurden anfangs aus Zweigen und Rindenstreifen verschiedenste Flechtwerke für die Herstellung von Körben und Zäunen verwendet. Etwas später wurde festgestellt, dass frisch gefälltes Holz gute Biegeeigenschaften aufweist und nach dem Trocknen seine Form behält. Das war der Beginn der Entwicklung erster Werkzeuge aus Holz. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die meisten landwirtschaftlichen Geräte aus Holz hergestellt.

Eine für die Entwicklung der Menschheit wichtige Erfindung waren Pfeil und Bogen aus elastischem Holz. Funde belegen, dass Pfeil und Bogen bereits in der Altsteinzeit (30.000 bis 10.000 v. Chr.) zur Nahrungsbeschaffung und als Waffe bei kriegerischen Auseinandersetzungen eingesetzt wurden. Zur Herstellung wurde unter anderem das Holz der Eibe, welches sich durch seine guten elastischen Eigenschaften auszeichnet, verwendet. So wurde bei der in den Alpen gefundenen Mumie „Ötzi“ ein ca. 5300 Jahre alter Bogen aus Eibenholz gefunden.

Auch im Bootsbau spielte gebogenes Holz schon im Altertum eine große Rolle. Stämme, die krumm gewachsen waren, wurden für den Bootsrumppf verwendet. Allerdings kam es sehr schnell zu einer Verknappung des zur Verfügung stehenden natürlich geformten Stammmaterials. Der Bedarf führte zu neuen Lösungsansätzen und zur Entwicklung früher Umformtechniken, die es erlaubten nahezu unabhängig vom Ausgangsmaterial, Bootsrumpfe zu fertigen. Um aus den gerade gewachsenen Stämmen die gewünschte Rumpfform herzustellen wurde anfangs der Innenquerschnitt des Holzes eingekerbt. Das Material konnte dann soweit gebogen werden, bis sich die Einkerbungen berührten. Diese Einkerbungen führten jedoch zu einer Schwächung des Querschnitts. Abhängig von der erforderlichen Stabilität der Rumpfstruktur bewegten sich erreichbare Krümmungen und Umformgrade in engen Grenzen.

In Abbildung 38 ist eines von mehreren Schiffsmodellen zu sehen, welche dem Pharao Tutanchamun als Grabbeigabe beigelegt wurden.



Abbildung 38: ägyptisches Schiffmodell, Grabbeigabe des Tutanchamun-Grabes (Fiwek; 2011)

Eine Steigerung des Umformvermögens konnte durch Vorbehandeln des Holzes erreicht werden. Das Holz wurde durch Wärme und Feuchtigkeit biegsam und in die gewünschte Form gebracht. Nach dem Abkühlen des Holzteiles behielt es seine Form. Diese Art der Vorbehandlung wurde bereits im alten Ägypten angewandt.

Am Festland wurden zunächst für den Bau von Kufen für Schlitten und Ähnlichem auch krumm gewachsene Baumstämme verwendet. Gleich dem Bootsbau suchte man für die eingeschränkt verfügbaren Stämme eine Alternative und fand diese im Biegen des Holzes. Dass für das erfundene Rad lange Zeit Holz als Werkstoff verwendet wurde, ist eine logische Folge daraus. Der Höhepunkt der Verwendung von Holz war die ringförmig gebogene Felge, ehe Metall für die Herstellung verwendet wurde.

Neben den o.a. Verwendungen wurde gebogenes Holz auch zur Fertigung von Behältnissen eingesetzt, die zur Lagerung verschiedenster Güter dienten. Das heute bekannteste und auch noch in Verwendung stehende Behältnis ist das Holzfass.

Die Erfahrungen und Erkenntnisse des Umformens hielten auch in der Kunst Einzug und erlaubten es beispielsweise neuartige Musikinstrumente aus Holz herzustellen. Seit dem 15. Jahrhundert werden Einzelteile verschiedenster Zupf- und Streichinstrumente aus gebogenem Holz hergestellt. Für den Bau dieser Instrumente werden ausgesuchte Hölzer, sogenanntes Klangholz, das vor allem ein gutes Stehvermögen aufweisen muss, verwendet. Zur Fertigung wurden verschiedene Methoden vom Vornässen über das Biegen mit Erhitzen des Holzes bis zum Formpressen, um dem Holz die endgültige Form des Instrumentes zu geben, entwickelt und optimiert. Abbildung 39 zeigt eine Außenform einer Geigenzarge, an welche das Holz angelegt und mit Zwingen befestigt wird und die fertige Zarge nach dem Umformprozess. Nicht nur Geigen werden aus umgeformtem Holz hergestellt. (Fiwek; 2011)



Abbildung 39: Zargenaußenform und fertige Zarge einer Geige (Fiwek; 2011)

Bei einem Verhältnis Biegeradius r zur Holzstärke d von r/d unter 30 kommt es unter vorheriger Behandlung des Holzes häufig zu Biegebrüchen. Dieser Tatsache nahm sich Möbeltischler Michael Thonet an. Er stellte immer wieder Brüche an der konvexen Außenseite seiner gebogenen Teile fest, während die konkave Seite unbeschädigt blieb. Der Weg über das Kochen in Leim führte nicht zum gewünschten Erfolg. Durch Thonets Erfindung, das Holz an der konvexen Seite mittels eines Biegebandes zu fixieren und somit die Streckung der Fasern weitgehend zu verhindern, führte dazu, dass der gesamte Querschnitt überdrückt wird und wesentlich kleinere Biegeradien möglich sind. (Kollmann; 1955) Wichtig dabei ist die Feuchtigkeit des Holzes. Ist das zu stauchende Holz an der Druckseite zu nass, wird die Trocknung nach dem Biegen sehr kostspielig und aufwändig. Ist es zu trocken, benötigt man eine sehr große Kraft um das Holz zu verformen. Wird lufttrockenes Holz verwendet, so soll der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes zwischen 15 % und 20 % liegen. Wird das Holz vor dem Umformen gedämpft, so liegt der obere Grenzwert der Feuchtigkeit bei 25 %. (Kollmann; 1952)

Thonet fertigte mit diesem Verfahren Sitzmöbel. Der Thonet Stuhl „Nr. 14“ (Wiener Kaffeehausstuhl, siehe Abbildung 40) gehört zu den erfolgreichsten Möbelstücken weltweit. Der Grund dafür ist die rasche Zusammensetzbarkeit der 6 Einzelteile und 10 Schrauben zum fertigen Stuhl und die daraus resultierenden geringen Transportkosten des zerlegten Möbelstücks. Dies ebnete den Weg für den Export in die ganze Welt. Er war das erste wirkliche Industrieprodukt des Möbelbaus. Es wurden über 50 Millionen Stück produziert. (Fiwek; 2011)



Abbildung 40: Thonet Stuhl „Nr. 14“ (Wiener Kaffeehausstuhl) (Fiwek; 2011)

Mit dem Beginn der industriellen Erzeugung von Furnieren wurden die ersten hydraulischen Heißpressen und mit ihnen die ersten Kunstharzleime entwickelt. Dieser Fortschritt machte nun das Formpressen von Furnieren zu Sperr- und Schichtholzerzeugnissen möglich (Vorreiter; 1958). Beim Formpressen werden mehrere Schichten Furnier miteinander verklebt und mit Druck gepresst. Es sind neben ebenen auch geformte Strukturen möglich. Näheres hierfür siehe 4-4 Formpressen von Furnieren. Das Formpressen erlaubt dem Verarbeiter in der Formgebung von Holz größere Freiheiten gegenüber der Verarbeitung von Vollholz mittels Biegen. Es können Holzbauteile mit größeren Abmessungen und mehrfachen Krümmungen hergestellt werden. (Vorreiter; 1958)

Patente aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts belegen eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Furnier und Furniererzeugnissen und Überlegungen zur Herstellung geformter Furnier-Strukturen. So wurde durch den Schiffs- und Flugzeugbau die Biege- und Umformtechnik von Holz sehr stark gefördert (Kollmann; 1952). In Abbildung 41 ist ein Schnitt durch einen Teil eines Flugzeugflügels dargestellt. Der von Jensen (1941) entwickelte Flügel besitzt eine aus Furnierlagenholz bestehende Außenhaut (20, 21). Sie besteht aus drei oder mehr Schichten und passt sich, an die durch die Unterkonstruktion vorgegebene, Krümmung an. Der tragende Teil des Flügels, das I-Profil, wird mittels

Wärme und Druck gepresst. Der Steg besteht aus zwei C-Profilen aus Furnieren. Diese wurden zuerst in einer eigenen Form gepresst. Die Verklebung erfolgte mittels Polyvinylbutyral, einem Kunststoff, unter Hitze und Druck.

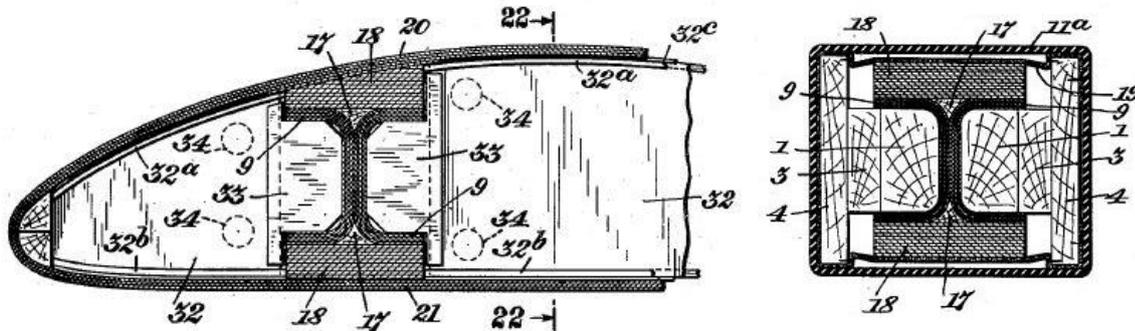


Abbildung 41: Flugzeugflügel aus Holz mit Verwendung von gepressten Formhölzern aus Furnieren und Pressform mit Furnieren für ein I-Profil (Jensen; 1941)

Die zwei C-Profil, sowie die Furniere für den Flansch, werden eingerichtet und mit den Pressteilen (1, 3, 4, 19) versehen. Zur Verklebung dient der zuvor erwähnte Kunststoff. Das Ganze wird nach dem Ausrichten mit einem undurchlässigen Sack (11a) umschlossen und unter Druck und Wärme gesetzt. Nach dem Pressvorgang und dem Abkühlen kann das I-Profil für den Flügel verwendet werden.

Zum heutigen Stand der Technik gehört auch das dreidimensionale Umformen von Furnieren. Dazu werden, wie beim Formpressen, mehrere Lagen Holz Furniere verklebt und verformt. Die wohl bekannteste Anwendung dieser Technik findet man in der Herstellung von ergonomisch geformten Sitzmöbeln (Fiwek; 2011). Die Firma Danzer (ehemals Rehholz) patentierte für das 3D Umformen ein Verfahren mit dem sich stark verformte Teile herstellen lassen. Dabei werden schmale Streifen (siehe Abbildung 42) von Furnieren mittels Fadenverleimung zusammengefügt. Die Furniere werden mit einem erhitzten Polyamid Leimfaden verbunden und anschließend in die gewünschte Form gepresst. (Becker, Zimmer; 2014)



Abbildung 42: dreidimensional geformte Sitzschale (Fiwek; 2011)

Es können aber auch ebene Furniere, welche nicht in Streifen geschnitten wurden, zu dreidimensionalen Formbauteilen verarbeitet werden. Um dies möglich zu machen, ist es erforderlich, die Furniere vor dem Pressen zu bearbeiten, um ein Überfalten der Furniere zu umgehen. Dies geschieht durch entsprechendes Einkerbungen der Furniere (siehe Abbildung 43).

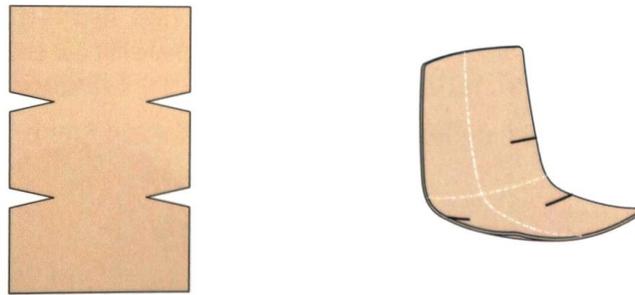


Abbildung 43: Furnierzuschnittmuster vor dem Pressvorgang und gepresste Sitzschale mit dargestellten Einkerbkanten (Becker, Zimmer; 2014)

Das dreidimensional umgeformte Furnier stellt die neueste Entwicklung der Umformung von Furnieren da. Doch bereits 1952 stellte Kollmann (1952) sechs Gründe fest, warum die Umformung durch Formpressen und Biegen von Holz damals zweckmäßig war:

- Da das Biegen und Formpressen zur spanlosen Holzverarbeitung (kein bzw. geringer Materialverlust beim Umformen) gehört, bringt diese Art der Herstellung von verformten Holzteilen keine großen Schnittverluste im Vergleich zur spanabhebenden Umformung mit sich. Mit den vorhandenen Ressourcen wird dadurch ökonomisch umgegangen.
- Gegenüber den spanabhebenden Maschinen ist das Biegen in der Regel einfacher und rascher.
- Die Kosten für Anlagen zur Verformung sind bei der spanlosen Bearbeitung niedriger als die der spangebenden bei gleicher Formgebung.
- Der benötigte Energieaufwand beim Biegen ist geringer als jener bei der Zerspanung.
- Die Steifheit und Festigkeit ist bei ähnlich geformten Teilen beim Biegen deutlich höher als beim Ausschneiden. Die Oberflächenqualität ist auch meist besser.
- Bei verschiedenen Produkten sind technisch und wirtschaftlich nur das Biegen und Formpressen sinnvoll. Wie zum Beispiel bei der Herstellung von Sportgeräten, Stuhlzargen, Sitzschalen, Stock- und Schirmgriffe, Holzringen, usw.

4-2 BIEGEN VON VOLLHOLZ

Bevor auf das Umformen von Furnieren eingegangen wird, wird zuerst das Biegen von Vollholz behandelt, welches die Grundlage für das Umformen bildet.

Das Biegen von Holz ist die dauernde Umformung, senkrecht oder quer zur Längsausdehnung eines Körpers, und gehört zur spanlosen Art der Verformung. Zur spanlosen deshalb, da die Umformung ohne den Anfall von Holzspänen geschieht. Beim Vollholz erfolgt die Biegung meist normal zur Faserrichtung, seltener parallel zur Faser (Vorreiter; 1958). Dies hat den Grund, da es bei auftretenden Zugbelastungen quer zur Faser, sehr bruchanfällig und zudem leicht spaltbar ist. (Stevens, Turner; 1948)

Beim Biegen wird ein Stab mit der Dicke d um einen Mittelpunkt M gebogen (Abbildung 44). Dabei stellt sich ein Biegeradius r ein. Entlang der neutralen Faser behält der Biegestab seine ursprüngliche Länge l_0 . Der Radius der sich an der neutralen Faser einstellt, wird als Nullradius R bezeichnet.

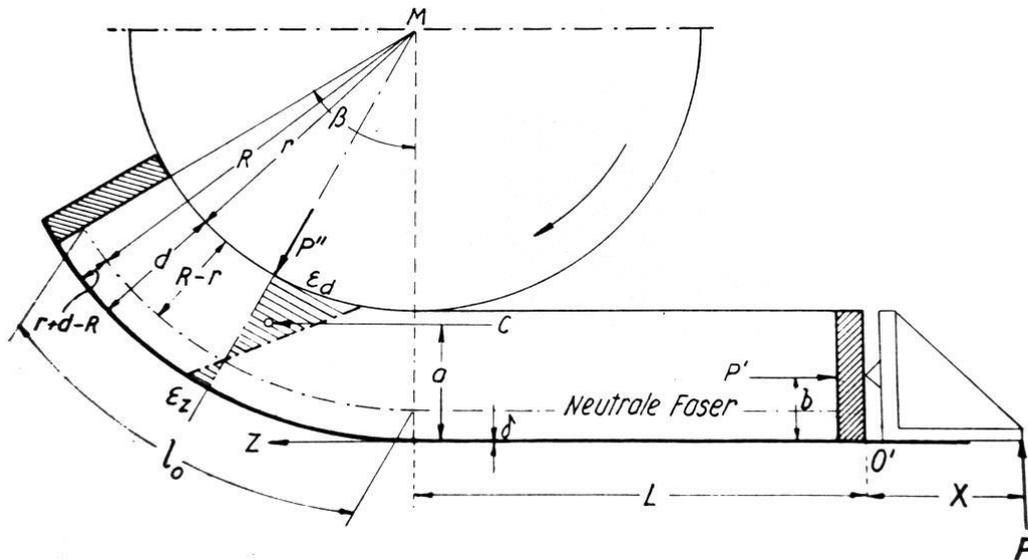


Abbildung 44: Zahlensymbole für biegetechnische Berechnungen nach Wilson (1941) und Prodehl (1930)

Durch das Biegen wird das Holz an der konvexen Außenseite gedehnt und steht daher unter Zug. An der konkaven Innenseite der Biegung tritt eine Druckspannung und mit ihr eine Stauchung bzw. Verkürzung des Holzes auf. Bei nicht durch Dampf oder Kochen vorbehandeltem Holz befindet sich die neutrale Faser, während des gesamten Biegevorgangs, ungefähr in der Mitte des Querschnitts. Die neutrale Faser, oder auch Nulllinie genannt, weist stets die ursprüngliche Länge des zu biegenden Holzstückes auf und steht während des Umformvorgangs nicht unter Spannung. Das Holz kann solange gebogen werden, bis die zulässige Zugdehnung an der konvex verformten Seite des Holzes erreicht ist. Der Bruch tritt zuerst an der Zugseite auf, da die zulässigen Zugdehnungen an der gezogenen Seite wesentlich kleiner als die zulässigen Druckkürzungen an der gestauchten Seite sind. Durch Erweichen des Holzes, zum Beispiel in heißem Wasser oder mit Dampf, wird das Holz formbarer (siehe dazu 4-5 Behandlung des Holzes). Die mögliche Zugdehnung wird nur gering gesteigert, hingegen vergrößert sich die Zusammendrückbarkeit des Holzes in größerem Maße. Beim Biegen können dadurch kleinere Biegeradien realisiert werden, da die neutrale Faser aus der Mitte Richtung Zugseite wandert. Der unter Druck stehende Bereich wird größer und mit ihm verringert sich die Zugdehnung an der konvexen Seite. Die Verschiebung der neutralen Faser bei den unterschiedlichen Zuständen ist in Abbildung 45 ersichtlich.

Das Umformvermögen wird durch die Verformungszahl r/d Biegeradius zu Holzdicke beschrieben. Je kleiner dieser Wert, desto besser lässt sich das Holz biegen. Wird das Holz vorbehandelt so lassen sich kleinere Verformungszahlen erreichen. Genauso mit der Anwendung von Hilfsmitteln beim Biegen.

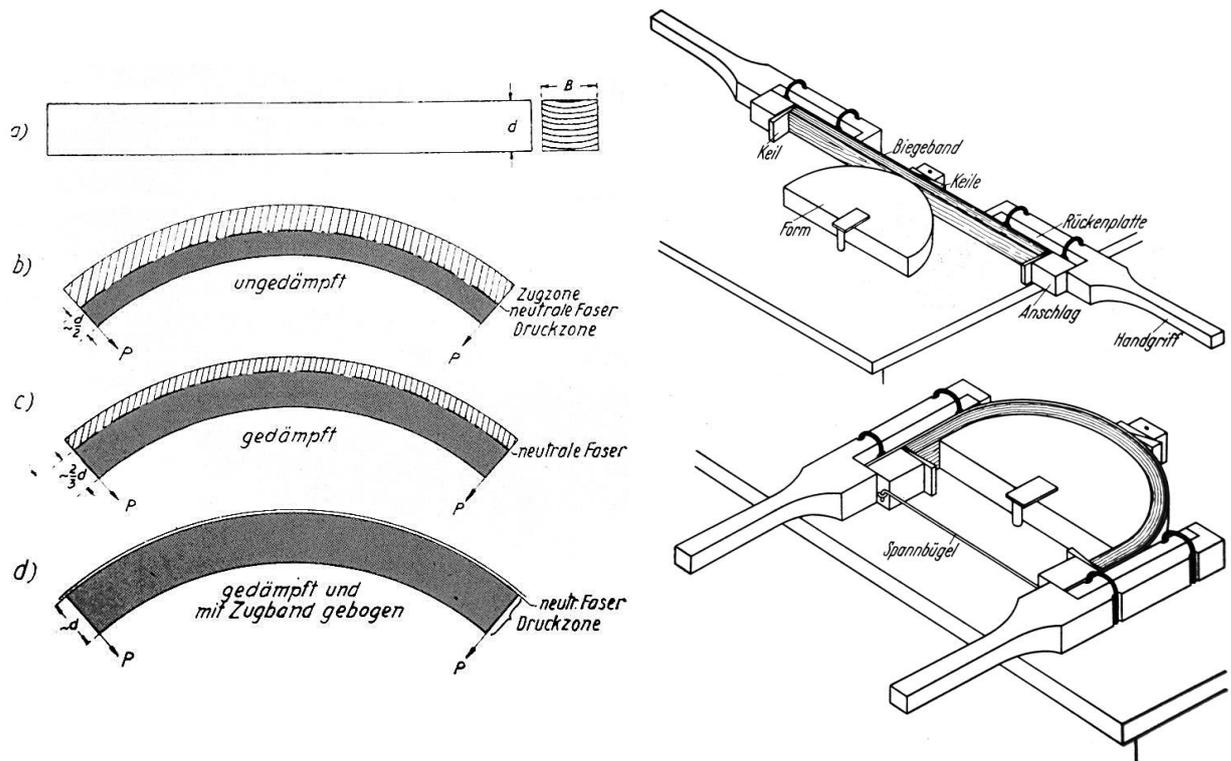


Abbildung 45: Verschiebung der neutralen Faser a) Ausgangszustand b) ungedämpft gebogen c) gedämpft gebogen d) gedämpft und mit Zugband gebogen (Vorreiter; 1958); Biegen mittels Zugband, A Anfangsstufe, B Endstufe (Kollmann; 1955)

Die bereits unter 4-1 erwähnte Erfindung von M. Thonet, das Holz mittels Biegeband zu biegen, ermöglicht noch kleinere Biegeradien bei gleicher Holzstärke als bei Bauteilen welche ohne Biegeband gebogen werden. Hierbei wird ein Stahlband (Zugband), wie in Abbildung 45 ersichtlich, am Holz mittels einer Endenspannung an den Enden des zu biegenden Teils fixiert. Beim Biegen wird die Zugdehnung dadurch weitgehend verhindert, d.h. die neutrale Faser befindet sich während des Biegevorgangs an der konvexen Seite. Fast der gesamte Querschnitt steht dabei unter Druck und wird gestaucht. Es kann nunmehr mit wesentlich größeren Verformungszahlen fehlerfrei gebogen werden. (Vorreiter; 1958)

Die entstehenden Zugkräfte beim Biegen des Holzes werden größtenteils von der Cellulose aufgenommen. Sie bildet den kristallinen Bereich in den Lamellen der Holzfasern, welcher hochelastisch ist. Nach Rowell (2013) bilden sich durch eine erhöhte Packungsdichte von Cellulose, kristalline Bereiche aus. Die Moleküle ordnen sich regelmäßig an. Die Cellulose des Holzes ist hochkristallin und etwa 65 % der Cellulose bildet kristalline Bereiche aus. Der Rest hat eine geringere Packungsdichte und bildet den nichtkristallinen (amorphen) Bereich. Die Cellulose nimmt den Großteil der Zugkräfte auf und daher ist der linear-elastische Bereich fast bis zum Bruch gültig und es herrscht zudem eine geringe Bruchdehnung. Der Druck wird hauptsächlich von der Mittellamelle (ligninreiche Verkittungsschichten) und den amorphen Lockerstellen aufgenommen. (Kollmann; 1955; Rosenthal; 2009)

Ist ein Holzstück gebogen, so möchte es nach dem Lösen des Umform- oder Biegezwanges in seine ursprüngliche Form zurückzukehren. Die bleibende Verformung ist eher gering, da der Querschnitt, wie bereits zuvor angesprochen, unter Druck- bzw. Zugspannungen steht, die bestrebt sind, den Körper in seine Ausgangsform zurückzubringen. Die Druckspannungen wirken der eingetretenen Kürzung an der konkaven Druckseite entgegen und die Zugspannungen den Dehnungen an der konvexen Zugseite. Die dabei aufgewandte Biegekraft entspricht der Summe der Zug- und Druckspannungen, vervielfältigt mit

der Querschnittsfläche des verformten Holzteils. Die gebogene Form lässt sich daher nur beibehalten, wenn man das gebogene Holzstück auf eine starre Unterlage nagelt, klebt, festbindet oder man beide Enden miteinander verbindet, ähnlich wie bei einem Pfeilbogen. (Vorreiter; 1958)

Eine gute Möglichkeit der Formbeibehaltung bei flächenhaften Bauteilen ist das Verkleben mit anderen Schichten, die zur gleichen Zeit gebogen werden. Nach dem Abbinden des Klebstoffs bleibt die gebogene Form erhalten. Der sogenannte Rückstellereffekt wird unter 4-4.5 behandelt.

4-3 UMFORMEN VON FURNIER

Die Grundlage für das Umformen von Furnieren bildet das zuvor erläuterte Biegen von Vollholz. Furniere lassen sich durch ihre geringe Querschnittsdicke, im Vergleich zum Vollholz mit verhältnismäßig kleinem Radius biegen. Der Biegeradius ist dabei abhängig von der Richtung in der das Furnier umgeformt werden soll.

4-3.1 DEFINITION DER BIEGERICHTUNG

Beim Biegen von Holz und in diesem Fall von Furnieren unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Biegerichtungen: normal und parallel zur Faser. In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind die unterschiedlichen Biegerichtungen am Furnier dargestellt.

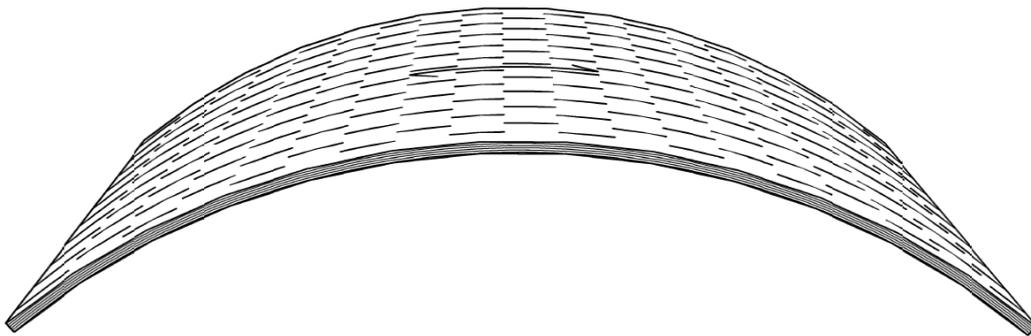


Abbildung 46: Biegung eines Furniers normal zur Faser

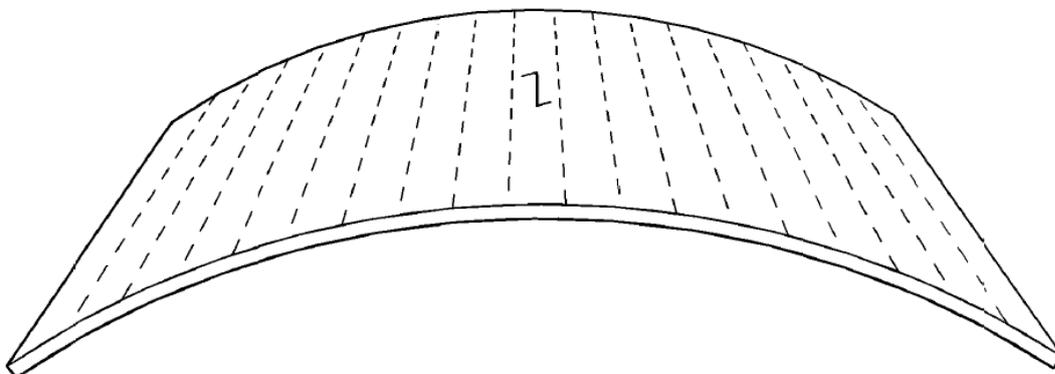


Abbildung 47: Biegung eines Furniers parallel zur Faser

Wagenführ et al. (2006) haben die unterschiedlichen Biegerichtungen miteinander verglichen. Der Biegeversuch erfolgte mit Ahorn-, Buchen- und Walnuss-Furnieren mit Dicken von 0,2 mm bis 0,9 mm.

Die Furniere wurden dabei um verschieden starke Zylinder, welche den jeweiligen Biegeradius darstellen, gebogen. Die Furniere wurden soweit gebogen, ohne diese dabei zu zerstören.

Das Verhältnis der durch den Versuch erhaltenen Biegeradien normal zur Faser zu den möglichen Biegeradien parallel zur Faser ist ein Maß für die Anisotropie des Holzes. Diese Verhältnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Wäre dieses Verhältnis 1, so würde dies bedeuten, dass sich das Holz in beide Richtungen gleich gut biegen lassen würde.

Tabelle 2: mittels Regressionsgleichungen berechnete Biegeradien und Verhältnis der minimalen Biegeradien normal und parallel zur Faserrichtung (Wagenführ et al.; 2006)

wood specie	veneer thickness	bending radius		ratio perpendicular : parallel
		perpendicular	parallel	
sycamore maple	0.25 mm	2.5 mm	1.5 mm	1.67 : 1
	0.4 mm	6.0 mm	3.0 mm	2.00 : 1
	0.6 mm	11.0 mm	5.0 mm	2.20 : 1
	0.8 mm	15.0 mm	7.0 mm	2.14 : 1
beech	0.25 mm	3.5 mm	3.5 mm	1.00 : 1
	0.4 mm	7.0 mm	7.5 mm	0.93 : 1
	0.6 mm	11.5 mm	12.0 mm	0.96 : 1
	0.8 mm	16.0 mm	17.0 mm	0.94 : 1
American walnut	0.25 mm	1.5 mm	1.0 mm	1.50 : 1
	0.4 mm	6.0 mm	3.5 mm	1.71 : 1
	0.6 mm	12.5 mm	7.0 mm	1.79 : 1
	0.8 mm	18.5 mm	10.5 mm	1.76 : 1

Die Untersuchungen von Wagenführ et al. (2006) zeigen sehr gut das starke anisotrope Verhalten des Holzes. Die Furniere lassen sich, wie in Tabelle 2 dargestellt, parallel zur Faser leichter biegen als normal zur Faser. Die erhaltenen Werte zeigen bei der Buche ein Verhältnis der Biegeradien normal zu jenen parallel zur Faser von etwa 1. Bei den Ahornfurnieren beträgt das Verhältnis rund 2 zu 1. Die Furniere lassen sich parallel zur Faser mit einem halb so großen Biegeradius biegen. Der Grund für das unterschiedliche Biegeverhalten der Furniere in seine unterschiedlichen Richtungen liegt im Vergleich zum Vollholz darin, dass es sich beim Aufbringen einer Biegebelastung normal zur Faserrichtung biegsam verhält. Das heißt, es ist nicht in der Lage, Biegemomente zu übertragen. In Faserrichtung hingegen können sehr wohl Biegemomente aufgenommen werden. Dieses richtungsabhängige Verhalten wird von der Zellstruktur verursacht.

Nachfolgend wird auf die Unterschiede der beiden Biegerichtungen, normal und parallel zur Faser, näher eingegangen.

4-3.2 NORMAL ZUR FASERRICHTUNG

In Faserrichtung sind die Zellen bei Ahorn, Buche und Walnuss nach Wagenführ et al. (2006) etwa 800 bis 1200 µm lang (Fasern). Sie überlappen sich bis zu einem Drittel ihrer Länge. Die Faserlängen von Laubholzarten variieren zwischen 150 und 6600 µm (Buche: 600 bis 1300 µm), bei Nadelhölzern sind die Fasern zwischen 1700 und 9000 µm lang (Wagenführ, Scheiber; 1985). Aufgrund ihrer Mikrostruktur kann die Zelle Biegemomente übertragen. Durch die Überlappung der Zellen und die dadurch erreichte Verbindung untereinander natürlich umso mehr. Je dicker das Furnier, desto größer ist die Differenz zwischen dem erreichbaren Biegeradius normal und parallel zur Faser. Daher hat die Dicke einen großen Einfluss auf das Umformvermögen und auch auf die Anisotropie. (Wagenführ et al.; 2006)

Kossatz, Klieber (1955) haben in einem Versuch (Abbildung 48), nach Junkers, die zulässigen Biegeradien für Rotbuchenschäl furniere ermittelt. Die Furniere, die normal zur Faser gebogen wurden, hatten eine Holzfeuchtigkeit von 7 % bis 12 %. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 3 ersichtlich.

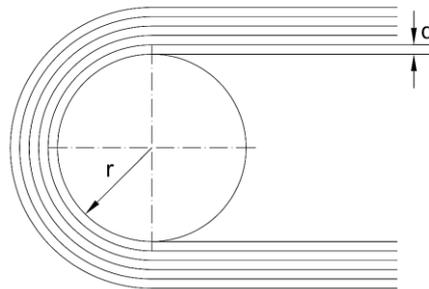


Abbildung 48: Versuch zur Ermittlung des Biegeradius von Furnieren (Kossatz, Klieber; 1955)

Tabelle 3: zulässige Biegeradien für Rotbuchenschäl furniere (Kossatz, Klieber; 1955)

Furnierdicke [mm]	Biegeradius [mm]	Furnierdicke [mm]	Biegeradius [mm]
0,2	4	1,0	30
0,3	6	1,2	40
0,4	8	1,6	55
0,5	10	1,8	65
0,7	20	2,2	80

Die Werte aus Tabelle 4 in Kollmann (1955) gibt nach dem Forest Products Research Laboratory in Princes Risborough folgende Werte für fehlerfreie, geradfaserige Furniere an, die um eine ungeheizte Form normal zur Faserrichtung gebogen wurden.

Tabelle 4: Grenzwerte für den kleinstzulässigen Krümmungsradius bei Furnieren normal zur Faser (Kollmann; 1955)

Holzart	Furnierdicke s mm	Mittlere Holzfeuchtigkeit %	Kleinsten Krümmungsradius r, bei dem weniger als 5% der Lamellen brachen mm	$\frac{r}{s}$
Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	3,2	13,0	112	35
Eiche (<i>Quercus robur</i> L.)	3,2	12,5	148	46
Rüster (<i>Ulmus hollandica</i> var. <i>major</i> Mill.)	3,2	13,0	99	31
Douglasie (<i>Pseudotsuga taxifolia</i> Brit.) . .	2,5	13,2	216	86
Fichte, Sitka (<i>Picea sitchensis</i> Carr.) . . . }	3,2	12,5	152	48
	2,65	12,2	152	57
	2,0	12,3	92	46
Hemlock, Western (<i>Tsuga heterophylla</i> Sarg.)	2,5	13,3	135	54

Das Verformungsvermögen von Furnieren wird genauso wie beim Vollholz berechnet. Lediglich wird anstatt d für die Holzstärke, s für die Furnierdicke verwendet. Das Verformungsvermögen ist daher mit r/s , Biegeradius zu Furnierdicke, gegeben.

4-3.3 PARALLEL ZUR FASERRICHTUNG

Laut Wagenführ et al. (2006) grenzen die Zellen aneinander an, wie Rohre mit einem Durchmesser von etwa 20-150 μm in radialer oder tangentialer Schnittrichtung. Bei der Buche beträgt der Faserdurchmesser 14,6 μm . Die Verbindung zwischen den Zellen ist nahezu flexibel. Die Furniere werden dabei in einem tangentialen Schnitt erzeugt. Die Holzstrahlen werden dadurch nur angeschnitten (siehe Abbildung 49).

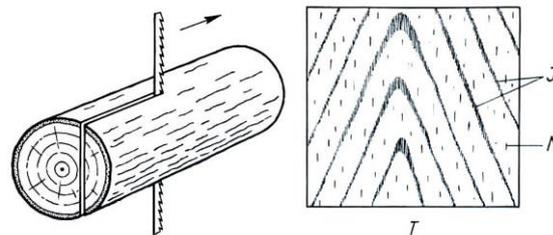


Abbildung 49: Tangentialschnitt mit M Markstrahl, Holzstrahl; J Jahrring (Wagenführ, Scheiber; 1985)

Die Tatsache, dass mehrere Zellen auf der jeweils anderen in diesem dünnen Furnier liegen, bringt eine gewisse Biegesteifigkeit mit sich. Jedoch grenzen die Zellen nur aneinander an und überlappen sich in dieser Richtung nicht. Daher verhält sich das Furnier beim Umformen parallel zur Faser wie ein textiles Material.

Heebink (1953) gibt für die Verformung an amerikanischen Hölzern folgende Werte an: Für die Umformung von Furnieren normal zur Faserrichtung wird ein Wert für r/s von 100 angegeben. In die andere Richtung, parallel zur Faserrichtung beträgt der Wert r/s 50. Die Furniere können dieser Aussage nach parallel zur Faserrichtung doppelt so stark gebogen werden als normal zur Faser. Der Versuch wurde an trockenen Furnieren mittels Flüssigdruckformung durchgeführt.

Laut Kollmann (1955) soll bei gemesserten und geschälten Furnieren die offene Seite mit der konkaven Schicht des Bieeteils übereinstimmen. Es lässt sich in dieser Richtung leichter biegen und die Risse (siehe 4-3.4 Risse) an der offenen Seite, der beim Schneiden dem Messer zugewandten Seite, schließen sich, da das Furnier beim Umformen an der offenen Seite unter Druck stehen würde. Erfolgt die Biegung in die entgegengesetzte Richtung, die geschlossene Seite stimmt mit der konkaven Schicht überein, so kann laut Kollmann (1955) das Verhältnis r/s um 50% größer werden. Daher ist die Betrachtung der Thematik Risse von großer Bedeutung.

4-3.4 RISSE

Wie bereits zuvor erwähnt, haben die Risse einen wesentlichen Einfluss auf das Umformvermögen der Furniere. Beim Schälen, aber auch beim Messern der Furniere erhalten sie während des Schneidevorgangs an der dem Schälblock zugewandten Seite feine Mikrorisse durch den Aufbiegevorgang des Messers. Wie bereits unter 3-2.3 Sägen, Messern und Schälen erwähnt, gilt hier besonderes Augenmerk der Einstellung des Druckbalkens und des Messers beim Schäl- bzw. Messervorgang. Beim Rundschälen ist zudem zu beachten, dass das Furnier spiralförmig vom Stamm abgeschält wird und nach dem Schälvorgang die natürliche Wölbung des Ursprungszustands beibehält. Wird das geschälte Furnier nun gebogen, mit den Mikrorissen bzw. der durch den Schälvorgang konkaven Seite nach unten, so weiten sich diese Risse auf, wie in Abbildung 50 ersichtlich. (Kollmann; 1962)

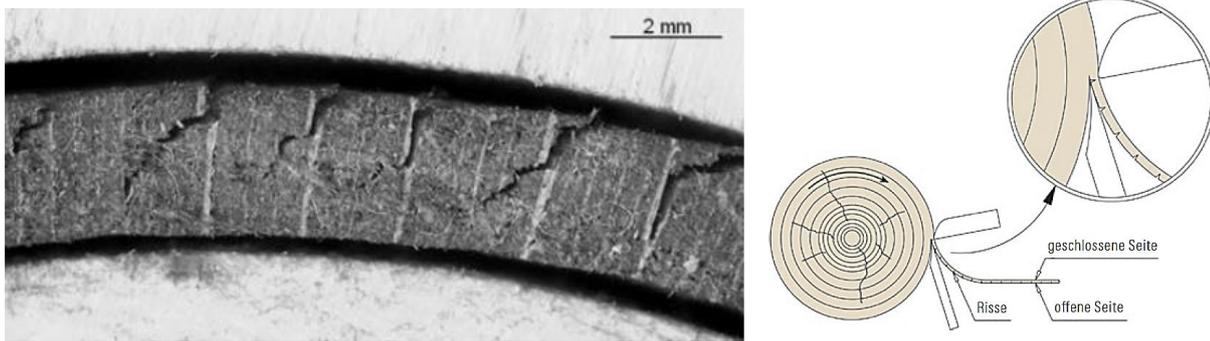


Abbildung 50: mikroskopische Aufnahme von gerissenem Buchenfurnier, Seitenansicht (Palubicki et al.; 2010) und schematische Darstellung des Rissentstehungsvorgangs (Becker, Zimmer; 2014)

Palubicki et al. (2010) untersuchten ein neues Verfahren, um die Rissgeometrie im Querschnitt zu betrachten. Mit Hilfe von digitaler Bildanalyse ist es möglich den Abstand zwischen den Rissen und die Risstiefe festzustellen. Das Furnier wird dabei gebogen und die Risse dadurch geöffnet. Das Furnier wird belichtet, um die Risse gut sichtbar zu machen. Ein Algorithmus bestimmt die Rissstellen und fertigt ein hochauflösendes Bild an, welches die Risstiefen genau erfasst. Dieses Verfahren, genannt SMOF (Systeme de Mesure d'Ouverture des Fissures), arbeitet vollautomatisch und schafft bis zu 7 m/min mit maximal 4 mm dicken Furnieren.

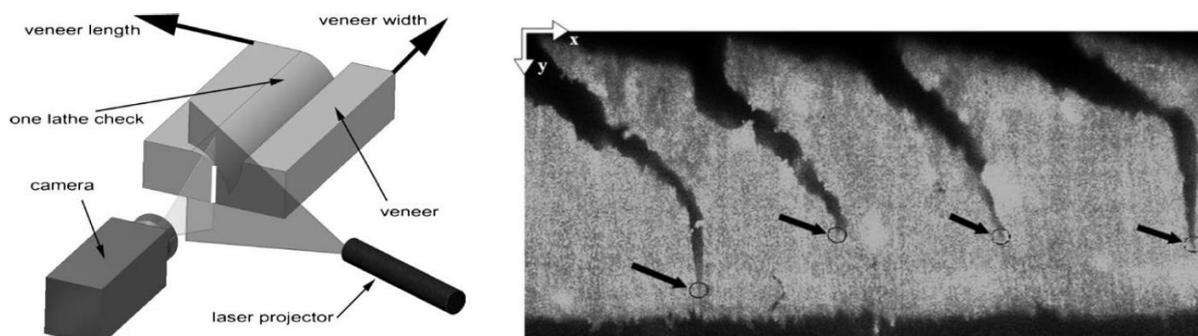


Abbildung 51: SMOF Belichtungsanordnung und ausgewertetes Bild eines gerissenen Furniers mit den ermittelten Risstiefen (Palubicki et al.; 2010)

Bei der Verwendung von Rundschäl furnieren zur Herstellung von Formpressprofilen mit ausschließlich konkav oder konvexen Umformbereichen ist auf Anordnung der Furniere im Hinblick auf die Seite mit Mikrorissen zu achten, wodurch sich nach Umformung eine Verringerung der Rissbreite (je nach Biegeradius sogar Schließung der Risse im Bereich der Umformung möglich) ergibt. (Vorreiter; 1958)

4-4 FORMPRESSSEN VON FURNIEREN

4-4.1 ALLGEMEIN

Das Formpressen ist eine Möglichkeit zur Herstellung von gekrümmten Holzbauteilen aus Furnieren mit Hilfe von Druck. Mit Furnieren, welche wesentlich geringere Stärken im Vergleich zu anderen Schnittwaren (Brett, Kantholz, Bohle) aufweisen, lassen sich vergleichsweise kleine Biegeradien leicht und bruchfrei realisieren. Allerdings formt sich das Furnier, durch sein elastisches Materialverhalten, nach dem Umformen wieder in seine Ursprungsform zurück. Dieser Rückstelleffekt kann durch

Einspannen oder Befestigung des umgeformten Materials auf einer sekundären Tragstruktur, welche die aus der Umformung resultierenden Spannungen bzw. Kräfte aufnehmen, unterbunden werden. Im Gegensatz dazu bedient man sich beim Formpressen der Verbundwirkung der Lagen untereinander durch das Abbinden des Klebstoffs. Es werden dazu mehrere Lagen von Furnieren verklebt, übereinandergelegt und gleichzeitig gebogen. Nach Aushärtung des Klebstoffs entsteht ein Verbundbauteil, das sich aufgrund des Umformens in einem Eigenspannungszustand befindet. Ein fertig gepresstes Bauteil kann in Abbildung 52 betrachtet werden. Am Beginn der Umformung ist der Klebstoff noch nicht abgebunden und gibt den einzelnen Lamellen daher die Möglichkeit zwischen den benachbarten Furnieren zu gleiten. Die Enden unterliegen daher keinem Zwang. Lediglich zwischen den äußersten Furnierschichten und der Form entsteht während dem Pressvorgang Reibung, die überwunden werden muss. Nach dem Abbinden des Klebstoffs sind keine Relativbewegungen unter den Schichten möglich und die Form bleibt so erhalten. Das Formpressen kann auf Schichten mit gleicher Orientierung (Schichtholz) und auf die Anordnung der Schichten mit unterschiedlicher Orientierung (Sperrholz, Sternholz) angewendet werden. (Kollmann; 1955)



Abbildung 52: formgepresstes Sperrholz aus 1,5 mm starken Buchenfurnieren mit 2 Querlagen

In Abbildung 53 ist der Formpressvorgang mittels einer Matrize und Patrizie schematisch dargestellt. Im Hintergrund der Abbildung befindet sich eine Maschine für den Klebstoffauftrag. Mittels Walzen wird der Klebstoff auf die vorbereiteten und zugeschnittenen Furniere aufgebracht. Anschließend werden die Furniere in die Pressen eingelegt, gepresst und nach dem Aushärtevorgang der Maschine wieder entnommen. In der Abbildung sind eine Standard- und eine 3-Seiten-Presse für die Möbelherstellung dargestellt. Dieser Ablauf stellt eine Art des Formpressens dar. Die verschiedenen Formpressverfahren werden in 4-4.3 Formpressverfahren erläutert.

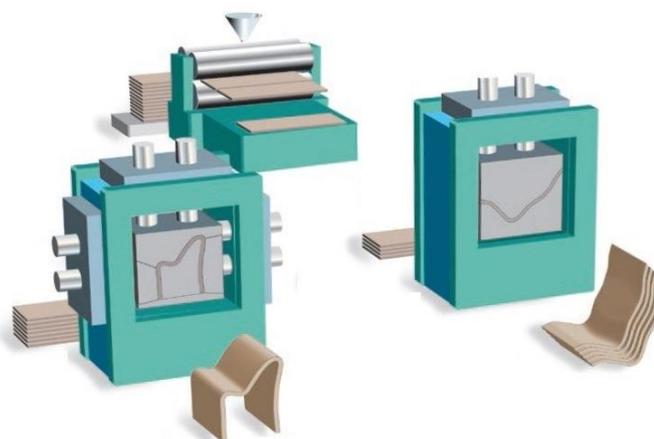


Abbildung 53: Formpressvorgang (Becker, Zimmer; 2014)

4-4.2 UMFORMPROZESS

Der Umformprozess beschreibt den Ablauf des Umformens während des Formpressvorgangs. Es werden im ersten Schritt Furniere mit Klebstoff versehen und übereinandergelegt. Durch das Übereinanderlegen von mehreren Furnierschichten erzielt man eine Verkleinerung des Widerstandsmoments, als das bei einem Vollquerschnitt der Fall wäre. Die durch die Verformung hervorgerufenen Schubkräfte werden durch den Schlupf bzw. die mögliche Verschiebung zwischen den einzelnen Schichten abgeleitet. In Abbildung 54 b) sind die Furniere einzeln auf Biegung beansprucht, solange der Schlupf anhält. Wird der Endzustand, sprich es findet keine zeitliche Relativbewegung zwischen Positiv- und Negativform mehr statt, so erfolgt die Vernetzung des Klebstoffsystems, welches nach Aushärtung den Verbund zwischen den einzelnen Schichten herstellt. Es beginnt statisch wie ein Verbundbauteil zu wirken, denn wie in Abbildung 55 b) dargestellt bilden sich Spannungsverhältnisse wie bei einem verformten Bauteil aus Vollholz aus. Eine Überlagerung der Biegespannungen in den einzelnen Schichten, wie in Abbildung 55 c), kommt zu Ende der Schließzeit durch die schon zu Beginn der Verformung eingetretene Biegung zustande. Ein Spannungsverlauf, der dem von gebogenem Vollholz entspricht (siehe Abbildung 55 d), entsteht durch den Spannungsausgleich der einzelnen Lagen während der Aushärtezeit. (Kossatz, Klieber; 1955)

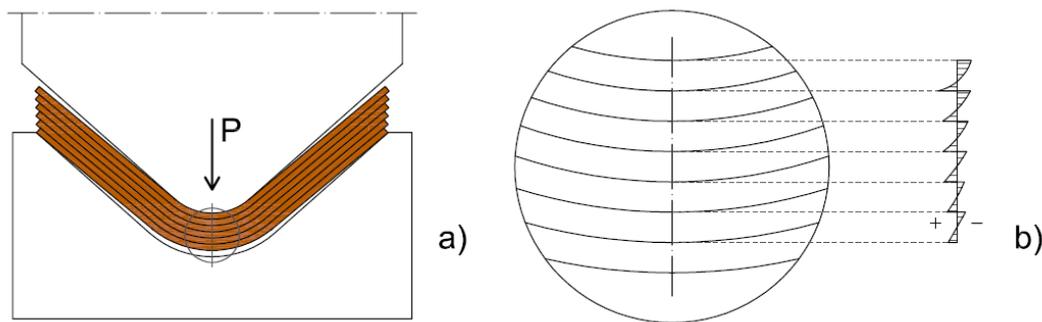


Abbildung 54: a) Formteil aus Lagenholz kurz vor Ende der Schließzeit b) Spannungszustand in den einzelnen Furnierlagen kurz vor Ende der Schließzeit nach Kossatz, Klieber (1955)

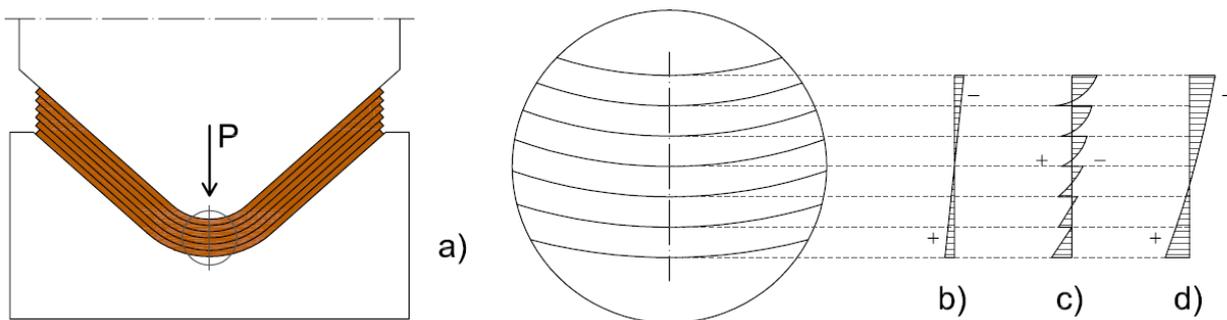


Abbildung 55: a) Formteil aus Lagenholz am Ende der Schließzeit und während der Aushärtezeit b) Spannungszustand im Gesamtquerschnitt nach Abbinden des Klebstoffs c) Spannungszustand am Ende der Schließzeit d) Spannungszustand nach dem Spannungsausgleich im Verlaufe der Aushärtezeit nach Kossatz, Klieber (1955)

Stevens, Turner (1948) führen folgende Vorteile des Formpressens an, welches nach dem Zweiten Weltkrieg an großer Bedeutung gewonnen hat:

- Durch die Verwendung von Holzlamellen können dicke Biegeteile mit kleinem Radius hergestellt werden.

- Es kann Holz schlechterer Qualität verarbeitet werden, welches sich als Vollholz nicht biegen ließe.
- Da Formbauteile aus Vollholz meist nur ihre Form durch Sägen erreichen können, bringt die Verwendung von Formpressen mit gemesserten oder geschälten Furnieren eine wesentliche Holzersparnis.
- Es können große Abmessungen der fertiggestellten Bauteile durch Schäften der Furnierenden erreicht werden, welche nicht sonderlich schlechtere Eigenschaften über den Querschnitt aufweisen als nicht geschäftete Querschnitte.
- Zudem ist eine bessere Anpassung an die Biegeform und höhere Formbeständigkeit gegenüber Vollholz gegeben.

Den Vorteilen stehen aber auch einige Nachteile gegenüber:

- Ein höheres technisches Verständnis, aber auch ein besseres und feineres Equipment ist zur Herstellung gegenüber dem Formen von Vollholz nötig.
- Die Verwendung von Klebstoff.
- Klebefugen könnten aus ästhetischen Gründen bemängelt werden.
- Die Produktion von Krümmungen in mehreren Ebenen ist bei der Verwendung von mehreren übereinanderliegenden Lamellen wesentlich problematischer als bei Vollholz.

Zudem kann durch den Einbau von querorientierten Schichten (Querlagen) das Schwind- und Quellverhalten positiv beeinflusst werden. Das sogenannte „Sperren“ sorgt dafür, dass das Schwind- und Quellverhalten auf ein geringes Maß reduziert wird. Ferner kann auch der Rückstelleffekt (siehe dazu 4-4.5 Rückstelleffekt) im Vergleich zu umgeformten Vollholzbauteilen nahezu unterbunden werden.

4-4.3 FORMPRESSVERFAHREN

Der Vorgang des Formpressens ist nahezu in jedem Verfahren derselbe. Die mit Klebstoff benetzten Furniere werden mittels Druck und eventuell Hitze in die gewünschte Form gepresst. Dennoch gibt es unterschiedliche Verfahren zum Herstellen von Formbauteilen. Je nach Art des herzustellenden Formbauteils kann man zwischen dem Pressen von Bauteilen mit starren Formen und dem Pressen mithilfe einer starren und einer elastischen Gegenform wählen. Für das Herstellen von Hohlkörpern hat sich auch das Wickelbiegeverfahren bewährt. Eine Sonderform stellt das Walzformverfahren dar.

4-4.3.1 Formpressen zwischen Matrize und Patrize

Das Formpressen zwischen Matrize und Patrize mit Druck ist ein einfaches Verfahren zur Herstellung gekrümmter Holzbauteile bestehend aus Furnieren. Die Matrize ist dabei der starre Formkörper mit hauptsächlich konkaver, die Patrize als Gegenstück mit konvexer Krümmungsfläche. Bei diesem Verfahren sind beide Presskörper starr. Die Formkörper können dabei aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Formen aus Holz sind leicht herzustellen, haben aber den Nachteil der relativ schnellen Abnutzung und einer schlechteren Genauigkeit der Formgebung bei hohen Pressdrücken. Gusseiserne Formen hingegen sind für die Massenproduktion sehr gut geeignet. Sie sind zwar teurer als Formen aus Holz, aber wesentlich dauerhafter und weisen eine größere Genauigkeit beim Formgeben auf als Holzformen. Zusätzlich kann eine gute Beheizung mit Dampf, Heißluft oder elektrischer Energie erfolgen, um den Aushärte- und Formgebungsprozess wesentlich zu beschleunigen. (Vorreiter; 1958)



Abbildung 56: Hochfrequenz-Schichtkiverleimanlage aus dem Jahr 1957 (Sandweg; 1957) und moderne Skipresse für Alpinski mit einer Gesamtpresskraft von 900 kN (Langzauner Composite Pressen)

Becker, Zimmer (2014) zeigen die heute meist in Verwendung stehenden Presstypen. Die Art der Presse richtet sich nach der Form des zu pressenden Bauteils. Die häufigsten Presstypen sind in Abbildung 57 dargestellt und pressen das Formteil mittels Matrize und Patrize. Bei der Einkolbenpresse wird der Pressdruck lediglich von einer Seite auf das Furnierpaket aufgebracht. Diese Presse wird vor allem für umzuformende Teile mit einfachen Geometrien, welche wenige und geringe Krümmungen beinhalten. Die Dreikolbenpresse kommt bei komplizierteren Formen zum Einsatz. Mit ihr kann ein nahezu gleichmäßiger Pressdruck aus mehreren Richtungen auf das Bauteil gewährleistet werden. Die Vierkolbenpresse ist für geschlossene Formteile geeignet. (Becker, Zimmer; 2014)

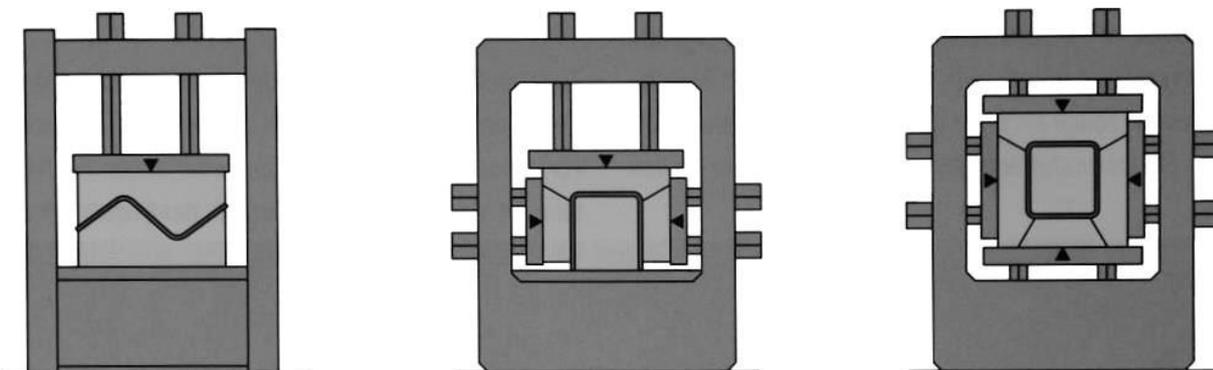


Abbildung 57: Einkolbenpresse, Dreikolbenpresse und Vierkolbenpresse (Becker, Zimmer; 2014)

Die Presswerkzeuge werden während dem Pressvorgang auf 100°C erhitzt, um den Abbindeprozess des Klebstoffs zu beschleunigen. Dies ermöglicht eine wirtschaftliche Nutzung der Pressen. Die Beheizung erfolgt dabei durch Heizplatten, zwischen den Furnieren und der Pressform, beheizten Pressformen oder über hochfrequente Erhitzung. Becker, Zimmer (2014) geben an, dass bei Produktionsmengen bis ca. 10.000 Stück und bei entsprechend einfachen Verformungen, Presswerkzeuge aus Holz mit Aluminiumheizplatten verwendet werden. Bei hohen Stückzahlen (100.000 Stück) kommen Vollaluminium- oder Stahlpresswerkzeuge zum Einsatz. Auch bei komplexen Geometrien werden die Metallpresswerkzeuge herangezogen.

Der große Nachteil der Anwendung der starren Formkörper liegt darin, dass bei einachsiger Druckbeaufschlagung unterschiedliche Pressdrücke über einen geformten Querschnitt auftreten. Mit den Mehrkolbenpressen kann dieser Nachteil ausreichend ausgeglichen werden. Jedoch muss das zu

pressende Formbauteil auf die Presse ausgerichtet sein und darf nicht zu viele verschiedene Krümmungen aufweisen, um einen möglichst gleichmäßigen Pressdruck zu gewährleisten. Abbildung 58 zeigt am Beispiel einer halbrunden Form, mit welcher Pressdruckeinbußen bei einachsiger Druckbeaufschlagung zu rechnen ist. Becker, Zimmer (2014) geben für die Herstellung von Formbauteilen Drücke von 2 bis 2,5 N/mm² an, welche mit Pressen mit einer Gesamtpresskraft von 3.500 kN aufgebracht werden.

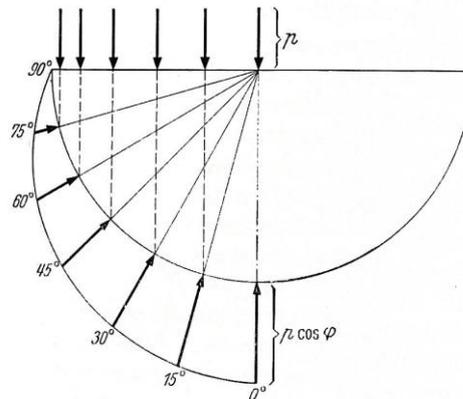


Abbildung 58: Diagramm bei Anwendung senkrechten Drucks auf eine halbrunde Form (Kollmann; 1955)

4-4.3.2 Formpressen mit starrer Form und elastischer Gegenform

Neben den zuvor erwähnten, hauptsächlich in Verwendung stehenden, Presstypen gibt es noch die Möglichkeit der Umformung zwischen einer starren Form und einer elastischen Gegenform. Die Druckbeaufschlagung trennt dieses Verfahren in die Umformung mittels Vakuumsack-Formung (Unterdruck) und Flüssig-Druck-Formung (Flüssigkeit oder Luft). Sie eignen sich hervorragend für die Umformung von Bauteilen mit vielen verschiedenen Krümmungen, da stets ein annähernd gleichmäßiger Druck auf das Furnierschichtpaket ausgeübt wird. (Kollmann; 1955)

Flüssig-Druck-Formung

Mit der Einführung von Schläuchen, die mit Wasser oder Luft gefüllt werden konnten, entwickelten sich neue Methoden zur Umformung von Furnieren. Ein mit Druckluft gefüllter Feuerwehrschauch (Abbildung 59) stützt sich dabei auf eine Matrize, in diesem Fall eine zu überfurnierende Tischplatte, und gegen ein Widerlager. Das Furnier wurde mit einem biegsamen Metallband, das sich während des Pressvorgangs erhitzte, zwischen Matrize und Schlauch gelegt. Danach folgte die Beaufschlagung des Schlauches mit Druckluft. (Kollmann; 1955)

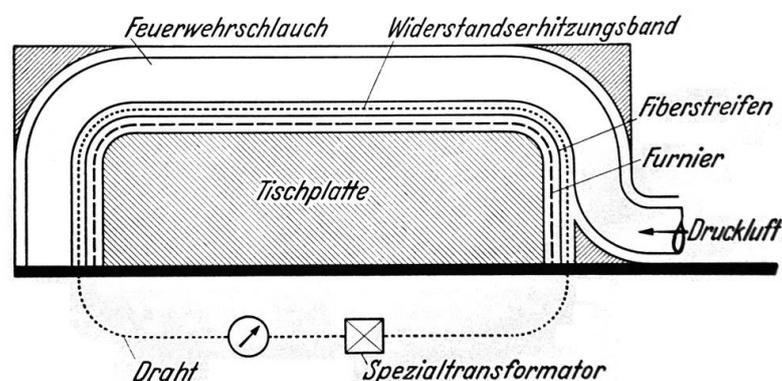


Abbildung 59: Schema einer Schlauchpressenanordnung zum Überfurnieren von Möbelteilen (Kollmann; 1955)

Die Weiterentwicklung des Pressens mit Schläuchen ist die Gummisackformung. Dabei wird eine elastische Membran unter hydraulischen oder pneumatischen Druck gesetzt. Dieses Verfahren ist auch sehr gut für flächige Bauteile anwendbar. Zudem liefert diese Anwendung eine gleichmäßige Druckspannungsverteilung über die Pressfläche, unabhängig von der Krümmung des Bauteils. Es gibt verschiedene Arten der Anordnung des Sackes. So kann sich die Membran außerhalb oder innerhalb der Form befinden oder sie dient als Hülle für das Formbauteil. Sehr vorteilhaft ist bei diesem Verfahren, dass nur eine Matrize benötigt wird und von dieser Matrize ausgehend, die Anzahl der Schichten beliebig variiert werden kann. (Kollmann; 1951)

Befindet sich die Membran außerhalb der Form (Abbildung 60), so drückt sie mit der einen Seite auf die zu verformenden Furniere und mit der anderen gegen eine Außenhaube oder Schale. Dieses Verfahren wird für besonders große Werkstücke verwendet. Für diesen Vorgang nennt Kollmann (1955) mögliche Pressdrücke um $0,2 \text{ N/mm}^2$.

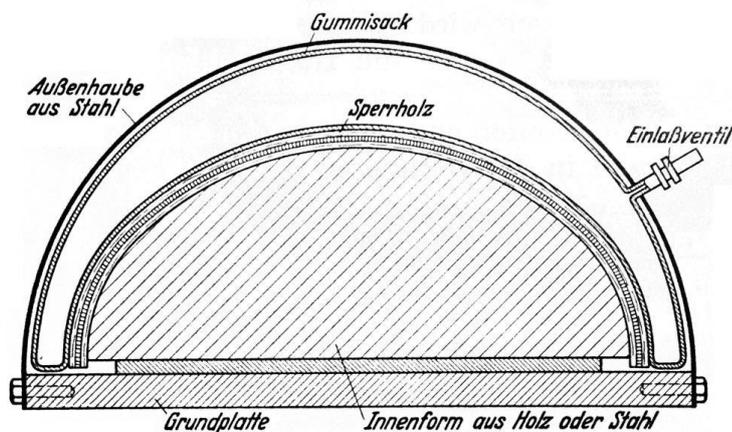


Abbildung 60: Gummisackformung außerhalb der Form (Kollmann; 1955)

Die Anwendung des Gummisacks als Hülle (Abbildung 61) wird als Vidal-Verfahren bezeichnet. Dabei umhüllt der Gummisack die Form und die zu pressenden Furniere. Das Innere des Sackes wird mit Unterdruck beaufschlagt, damit sich der Sack passgenau an die Form und Furniere anlegt und der durch den Autoklaven (Druckkessel) aufgebrachte Druck auf die Außenseite des Sackes gut wirken kann. Die Errichtungskosten sind höher als bei anderen Verfahren, aber es stellt sich ein sehr regelmäßiger Druck auf die Formbauteiloberfläche ein. Laut Kollmann (1955) sind Pressdrücke zwischen $0,2$ und $0,6 \text{ N/mm}^2$ möglich.

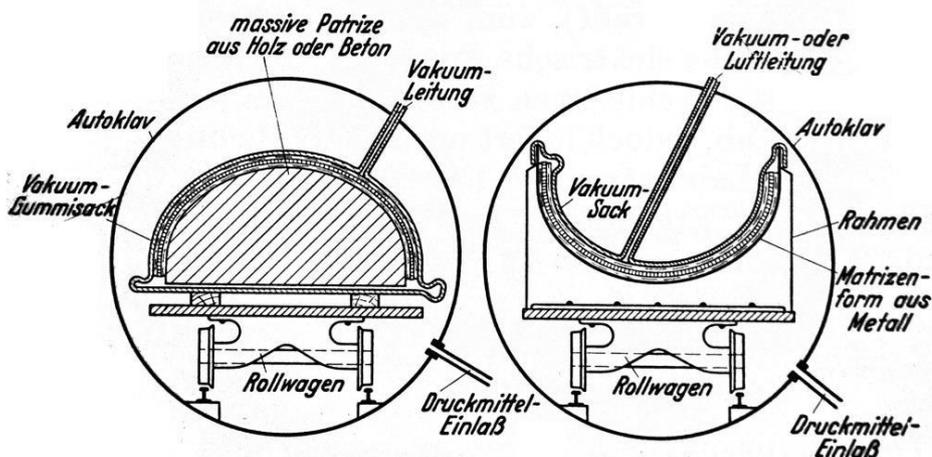


Abbildung 61: Gummisack als Hülle über einer Patrizie und über einer Matrize (Kollmann; 1955)

Für das Formpressen mittels Sack im Inneren der Form (Abbildung 62) werden die zu umformenden Furniere in die Matrize eingelegt und anschließend mit einem mit Druckluft halbgefüllten Sack abgedeckt. De Zanet (1997) verwendet in seinem Verfahren eine Patrize. Bei diesem Verfahren wird zuerst der Sack positioniert und dann werden die Furniere am Sack ausgerichtet. Die Beaufschlagung mit Druck erfolgt über ein Einlassventil. Kollmann (1955) gibt für dieses Verfahren mögliche Pressdrücke von $0,2 \text{ N/mm}^2$ an. Die Furniere werden solange mit Druck beaufschlagt und in der Form belassen, bis der Klebstoff abgebunden hat. (Kollmann; 1955)

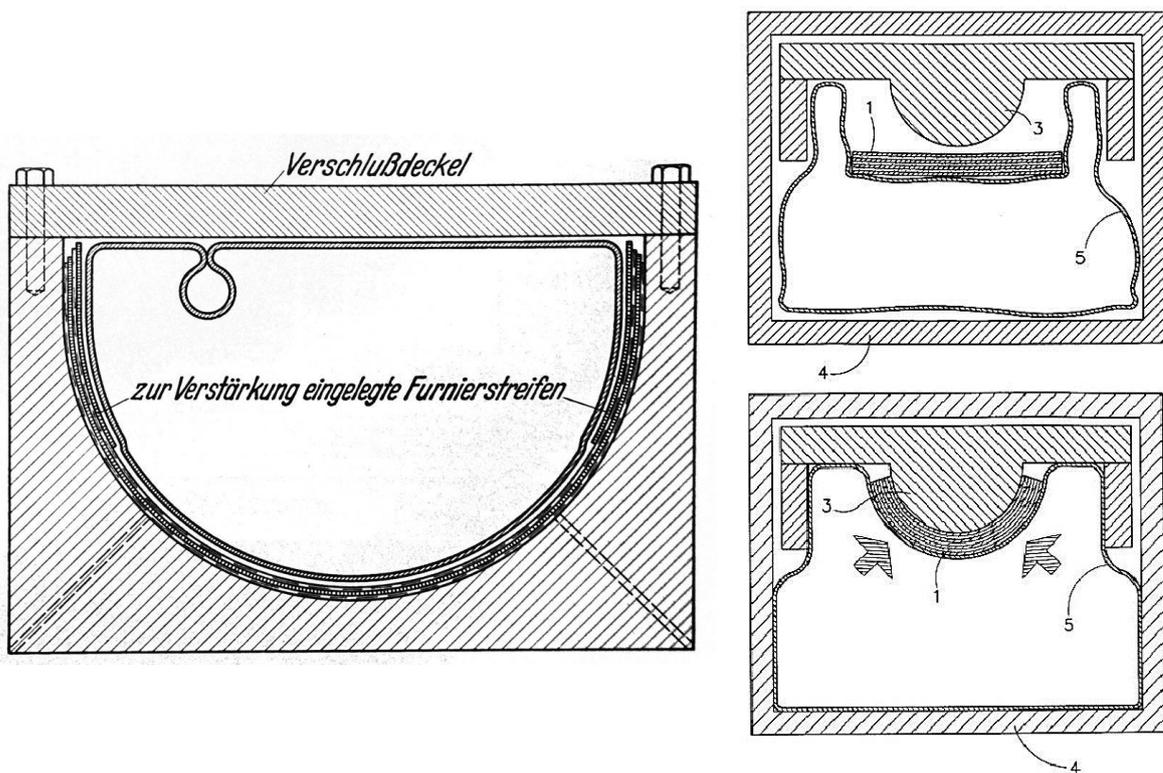


Abbildung 62: Formpressverfahren mittels innenliegendem Gummisack (Kollmann; 1955) und Ablauf des Verfahrens von De Zanet (1997)

Vakuumsack-Formung

Das Formpressen mittels einer Vakuummembran ist eines der Verfahren mit starrer Form und elastischer Gegenform. Das Werkstück befindet sich dabei zwischen der starren Form und der Membran in einem bis zu 98%igen Vakuum. Die Membran aus Kautschuk erzeugt dabei Pressdrücke von bis zu $0,1 \text{ N/mm}^2$, welche konstant über die gesamte Fläche wirken. Ein großer Vorteil dieser Presse ist, dass sich der Siedepunkt von Wasser im 98%igen Vakuum auf 24°C reduziert. Dadurch reduziert sich die Aushärtezeit von zum Beispiel Weißleim auf wenige Minuten. Dieses Verfahren wird zum Überfurnieren von Flächen, zum Formpressen von Furnieren, Biegesperrholz und Sperrholz sowie zum Planpressen verschiedener Platten aus Holzwerkstoffen verwendet. (Barth GmbH; 2014)

In Abbildung 63 ist schematisch ein Schnitt durch das Formpressverfahren dargestellt.

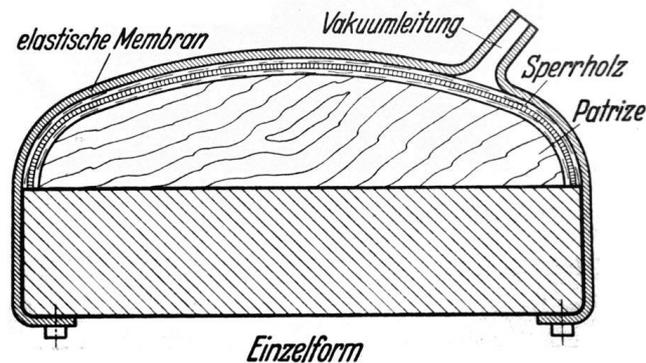


Abbildung 63: Formpressen mittels Vakuumsack über einer Einzelform nach Simonds et al.

Bei der geöffneten Vakuum-Membran-Pressen in Abbildung 64 ist die Membran in den Deckel integriert. Nach dem Einlegen der Form mit den Furnieren wird der Deckel geschlossen. Danach wird mit einer Vakuumpumpe ein bis zu 98%iges Vakuum über eine Vakuumleitung erzeugt. Die Konturen der zu pressenden Werkstücke sind in der Vakuum-Pressen in Abbildung 64 rechts sehr gut zu erkennen. Die Membran legt sich während des Pressvorgangs passgenau an die Form an. Das rechte Modell verfügt noch zusätzlich über eine schließbare Heizhaube. Die Heizhaube kann laut Herstellerangaben das Innere der Pressen bis auf eine Temperatur von 80°C aufheizen. Damit kann die Presszeit verkürzt werden.



Abbildung 64: geöffnete Membran-Vakuum-Pressen (ISTRA-A SIA; 2013) und Membran-Vakuum-Pressen mit eingespannter Form und Heizhaube (Vakuumpressen, Membranpressen und Vakuumsack von Columbus)

4-4.3.3 Wickelformung

Die Wickelformung ist ein Formpressverfahren zur Herstellung von geschlossenen Hohlkörpern. So werden damit Rohre, bauchige Hohlkörper, wie Fässer und auch Ringe hergestellt. Es werden dabei Furnierbänder um einen Kern gewickelt. Die Wicklung erfolgt dabei schräg oder senkrecht zur Kernachse. Beim Wickeln werden die Schichten miteinander verklebt, aufgewickelt und anschließend gepresst. (Vorreiter; 1958)

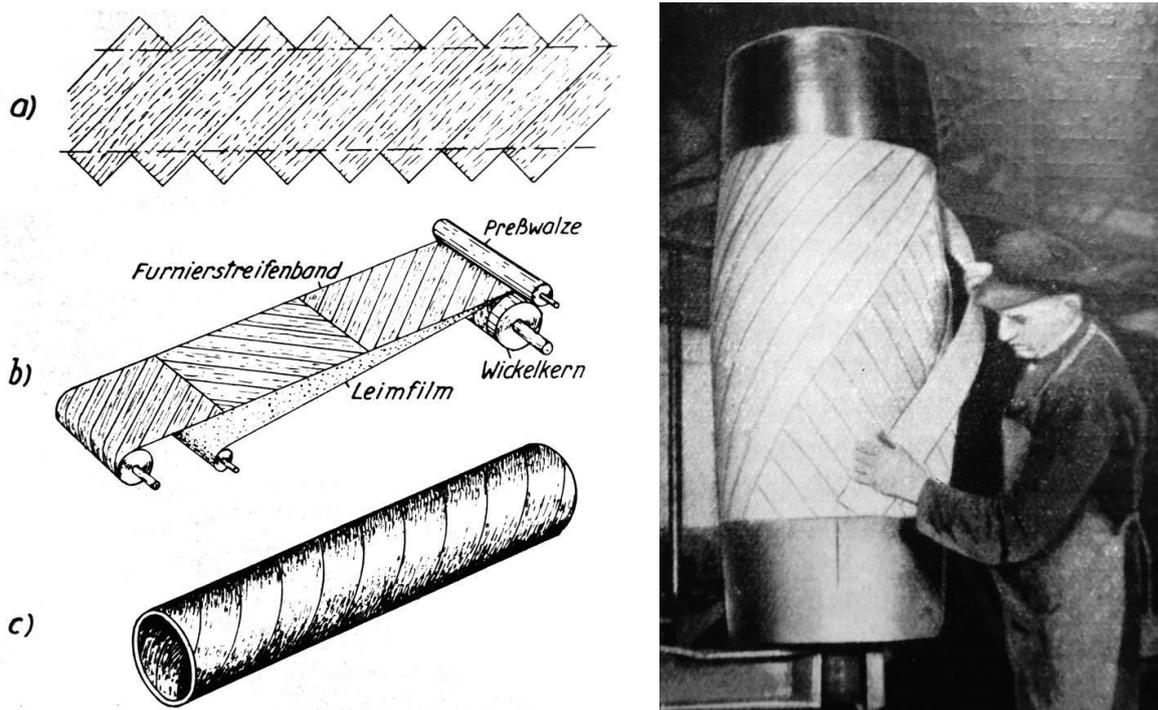


Abbildung 65: Wickelvorgang von Hohlkörpern aus schräggeführten Furnierbändern (Vorreiter; 1958) und Herstellung eines bauchigen Sperrholzfasses (Rüsch, Sander; 1941)

Abbildung 65 zeigt einen typischen Wickelprozess zur Herstellung von Sperrholzrohren. Die Furniere werden in a) schräg aneinander gefügt und zu einem langen Band verbunden. Vor dem Aufwickeln um den Kern wird in b) der Klebstoff aufgetragen und anschließend am Kern das Profil gepresst. C) zeigt den fertigen Hohlkörper. In Abbildung 65 rechts wird ein bauchiges Sperrholzfass hergestellt. Dazu werden Furnierlagen abwechselnd kreuzweise in eine obere und untere Kappe eingesteckt. Nachdem alle mit Klebstoff versehenen Furniere aufgesteckt sind, wird an der Außenseite eine Matrice angebracht und eine innen am Kern angebrachte Gummimanschette mittels Wasser unter Druck gesetzt. Sie drückt die Furniere gegen die Matrice und verpresst diese. Die Matrice ist dabei beheizt und beschleunigt so den Abbindevorgang des Klebstoffs. (Rüsch, Sander; 1941)

4-4.3.4 Walzformung

Mit einer anderen Art des Formpressens haben sich Srinivasan et al. (2008) befasst. Sie untersuchten die Möglichkeit der Umformung von mehreren Furnierschichten mit Walzen. Eine schematische Darstellung eines Walzprozesses findet sich in Abbildung 66. Dabei wird ein Streifen mit mehreren, hintereinander angeordneten, Walzen fortlaufend umgeformt. Der Formgebungsprozess erfolgt dabei kontinuierlich. Dieses Verfahren ist wirtschaftlich äußerst attraktiv, da die Verformung kontinuierlich und mit hoher Fertigungsgeschwindigkeit erfolgen kann. Die Rollen, die das Furnier dabei verformen, sind erhitzt. Dadurch lässt sich das Furnier leichter biegen. In Abbildung 66 ist als mögliches Endprodukt ein Wellblech aus Holz dargestellt.

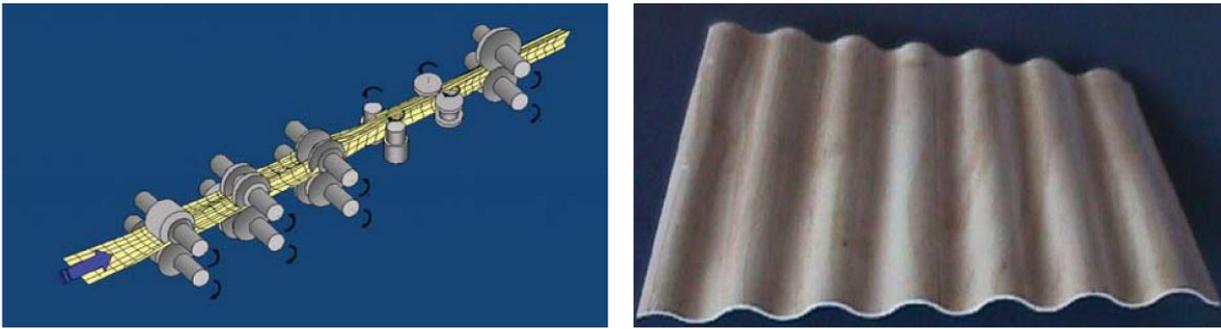


Abbildung 66: typischer Walzformprozess und Wellblechprofil (Srinivasan et al.; 2008)

Vor dem Umformen wurden die Furniere, zur besseren Verformbarkeit, 60 Sekunden lang in heißem Wasser (60 bis 80°C) gebadet. Am Beginn wurden mit den Furnieren einzelne Test durchgeführt um Aussagen über das Verformungsverhalten der Furniere zu erhalten. Es wurden mit einer Rolle (Abbildung 67) verschiedene Winkel und Flanschlängen getestet, um auf die Verformungslänge rückschließen zu können. Für die Probekörper wurde Furniersperrholz aus Monterey-Kiefer (*Pinus radiata* D. Don) Furnieren mit einer durchschnittlichen Dicke von 1,8 mm verwendet. Die Anordnung der Lagen war 0°/90°/0°. Die verformten Furnierlagenholzstreifen wurden nach der Verformung stets vermessen, um auf das Verformungsverhalten rückschließen zu können. Die Vermessung erfolgte mit einem Laser um im Besonderen auch auf den Rückstelleffekt schließen zu können (siehe dazu 4-4.5 Rückstelleffekt).

Es wurde festgestellt, dass die Verformung mit Walzen möglich ist und dass der Weg für eine praxistaugliche Produktion von Wellplatten geebnet ist. Gegenüber dem konventionellen Formpressverfahren würde der Walzprozess aufgrund der hohen Fertigungsgeschwindigkeit wirtschaftliche Vorteile bringen.

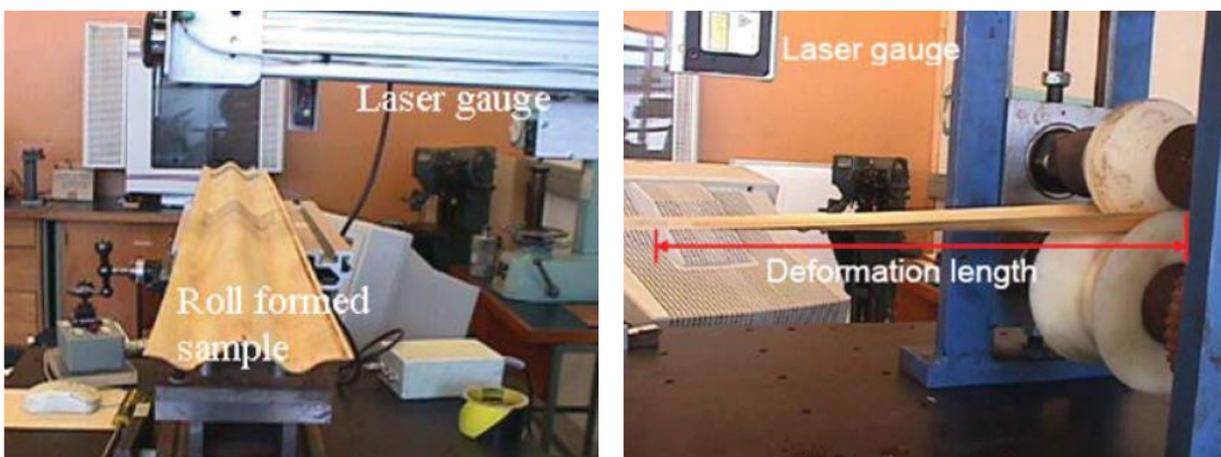


Abbildung 67: Maschine zur Bestimmung der Koordinaten des gefertigten Profils und Walztest mit dargestellter Verformungslänge (Srinivasan et al.; 2008)

4-4.4 FORMGEPRESSTE PROFILE

Eine neue und dieser Arbeit ähnliche Verwendungsweise von formgepressten Furnierpaketen ist die Arbeit von Gilbert et al. (2014). Sie setzten es sich zur Aufgabe, dünnwandige Stahl- und Aluminium Profile aus Holz herzustellen. Der große Vorteil dieser Profile ist die geringe Querschnittsfläche bei hoher Tragfähigkeit. Ein Grund für den Gedanken diese Profile aus Holz herzustellen, liegt in der großen Produktion von Treibhausgasen bei der Herstellung von Bauteilen aus Stahl und Aluminium.

Im Rahmen der Untersuchung von Gilbert et al. (2014) wurden 50 cm lange C-Profile aus verklebten und gepressten Neuguinea-Araukarie-Furnier (*Araucaria cunninghamii*) mit einer Furnierstärke von 1 mm verwendet. Zwei verschiedene C-Profile wurden hergestellt: eines mit Stegsteifen, um die lokale Beulfestigkeit zu erhöhen, und eines ohne. Das C-Profil ohne Steife (TYP A) in Abbildung 68 a) wird laut den Berechnungen seine Tragfähigkeit mit dem lokalen Beulen des Steges begrenzen. Das zweite Profil (Typ B) in Abbildung 68 b) mit der zusätzlichen Steife im Steg hat eine erhöhte Beulfestigkeit und diese sollte bei Belastung theoretisch höher sein als die Druckfestigkeit des Materials.

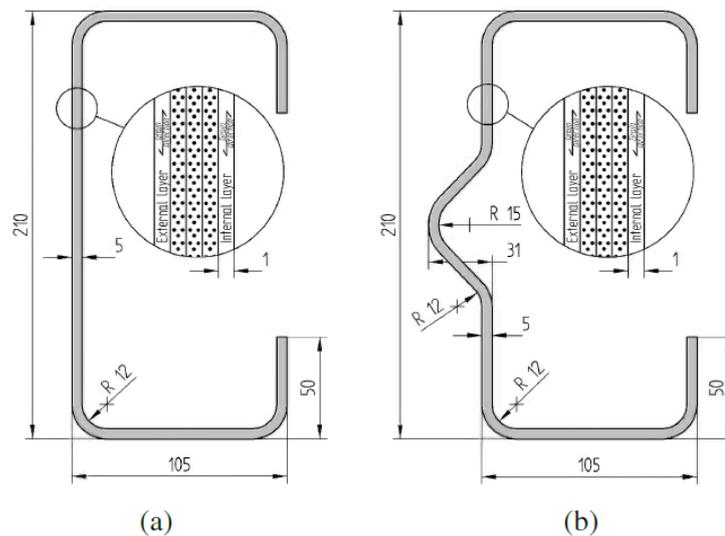


Abbildung 68: hergestellte C-Profile a) ohne Beulsteife b) mit Beulsteife (Gilbert et al.; 2014)

Das Profil besteht aus fünf Schichten 1 mm starken Schäl furnieren. Die drei inneren Schichten sind längsorientiert, während die zwei Deckschichten normal zur Bauteillängsachse angeordnet sind. Die drei inneren Schichten dienen dem Widerstand gegen Druckbelastung und Biegung des Profils in Längsrichtung. Die zwei äußeren Schichten haben die Aufgabe ein Verbiegen der Wände in Querrichtung zu verhindern und die lokale Beul Kapazität des Profils zu erhöhen. In Tabelle 5 sind die Querschnittswerte der beiden Profile ersichtlich.

Tabelle 5: Querschnittswerte der Profile (Gilbert et al.; 2014)

Type	Area (mm ²)	$I_{\text{major axis}}$ (mm ⁴)	$I_{\text{minor axis}}$ (mm ⁴)	Warping (mm ⁶)	J (mm ⁴)
A	2375	1.58×10^7	3.92×10^6	4.97×10^{10}	1.98×10^4
B	2466	1.58×10^7	4.64×10^6	5.03×10^{10}	2.06×10^4

Der Herstellungsprozess bestand aus mehreren Schritten. Zu Beginn wurden die Furniere zugeschnitten und 48 Stunden lang in Wasser gelagert. Das Biegen erfolgte mithilfe von heißem Dampf um eine Spannvorrichtung. Die Spannvorrichtung (Abbildung 69) lagerte nach dem Formen der Furniere für etwa 12 Stunden bei 40° Celsius in einem Ofen, bis die gebogenen Furniere getrocknet waren und ihre Form beibehielten. Sie wurden anschließend aus der Form genommen und für weitere 4 Stunden in einer Klimakammer gelagert, bis sie eine Ausgleichsfeuchte erreichten. Erst dann wurde der Klebprozess und das Fertigen des endgültigen Profils vorgenommen. Das Verkleben erfolgte mit Resorcin-Fomaldehyd-Klebstoff. Der Klebstoff wurde auf die Furniere aufgetragen und diese in die Form eingespannt. Die Pressdauer betrug 48 Stunden. Nach dem Pressen wurden die Profile aus der Form genommen und zugeschnitten. Die fertigen Profile sind in Abbildung 69 zu sehen. Gilbert et al. (2014) werden für

zukünftige Forschungen in diesem Bereich, beim Formgebungsprozess, auf eine Vakuum-Pressen zurückgreifen.

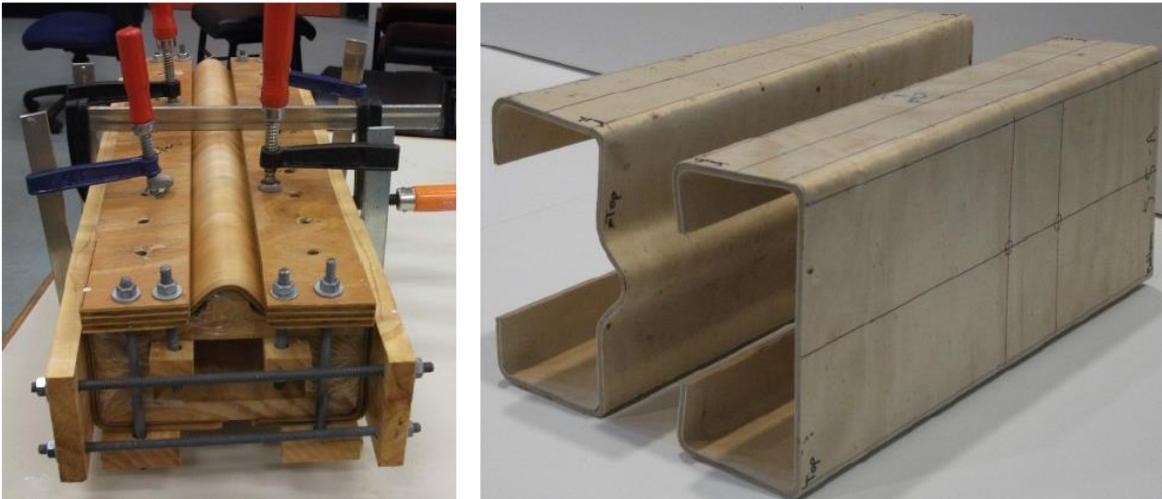


Abbildung 69: Fertigungsprozess und fertige C-Profile (Gilbert et al.; 2014)

Die Profile wurden nach dem Fertigungsprozess auf Druck in einer 500 kN MTS Prüfmaschine getestet. Die Durchführung der Tests erfolgte weggesteuert mit einer Verschiebungsgeschwindigkeit von 0,6 mm/min. Die Last wurde über den theoretischen Schwerpunkt des Querschnitts eingebracht. In Abbildung 70 ist die Prüfkongfiguration für den Typ A Querschnitt ohne Steife dargestellt. Mit LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) sind die linearvariablen Wegaufnehmer, um die horizontale Verschiebung des Profils zu messen, gekennzeichnet.

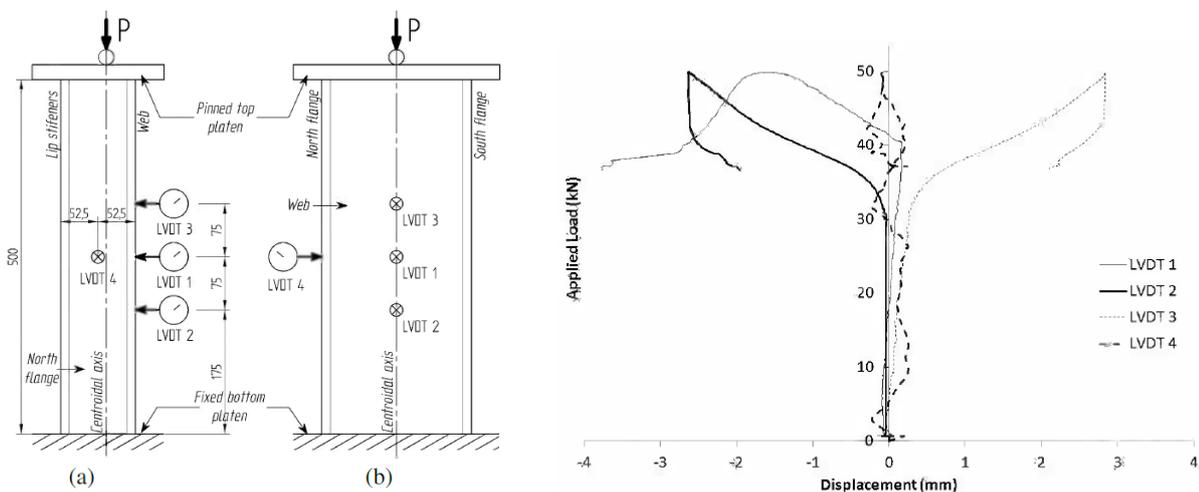


Abbildung 70: Prüfkongfiguration für den Typ A Querschnitt a) Ansicht Flansch b) Ansicht Steg und Testergebnisse für die horizontale Verschiebung am Typ A (Gilbert et al.; 2014)

In Abbildung 70 sind die Ergebnisse der horizontalen Verschiebung des Typ A Profils bei Druckbelastung zu sehen. Festgestellt wurde, dass sich ab einer Kraft von etwa 30 kN große horizontale Verformungen einstellen. Die maximal möglichen Kräfte, welche auf das Profil aufgebracht wurden, sind in Tabelle 6 ersichtlich. N_s steht für die aufgezeichnete maximal aufgebrachte Last. N_{squash} ist die auf den Querschnitt hochgerechnete Last, welche aufgrund von Versuchen an Lamellen mit den Abmessungen

von 100 mm x 46 mm und mit einer Stärke von 20 mm, ermittelt wurde. Dazu wurden vier flache Stücke des Querschnittaufbaus übereinander geklebt und auf Druck getestet.

Tabelle 6: Prüfergebnisse der Druckprüfungen (Gilbert et al.; 2014)

Set	Type A			Type B		
	N_s (kN)	N_{squash} (kN)	N_s/N_{squash}	N_s (kN)	N_{squash} (kN)	N_s/N_{squash}
1	41.3	69.1	0.60	54.7	71.8	0.76
2	47.5	86.2	0.55	63.5	89.5	0.71
3	49.8	82.7	0.60	61.3	85.8	0.71
<i>Average</i>	<i>46.2</i>	<i>79.3</i>	<i>0.58</i>	<i>59.8</i>	<i>82.4</i>	<i>0.73</i>

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass Typ A durchschnittlich 58 % und Typ B 73 % ihrer oberen, aufgrund der Versuche an den Lamellen ermittelten, Tragfähigkeit erreichten. Die zusätzliche Steife im Steg beim Typ B Querschnitt, welche lediglich eine Vergrößerung der Querschnittsfläche von 3,8 % nach sich zog, brachte eine Erhöhung der Tragkraft um 29 %.

Underhill et al. (2014) geht in seiner Arbeit im Speziellen auf die Fertigung von Profilen, wie in Abbildung 71 ersichtlich, aus Furnierlagenholz, ein.

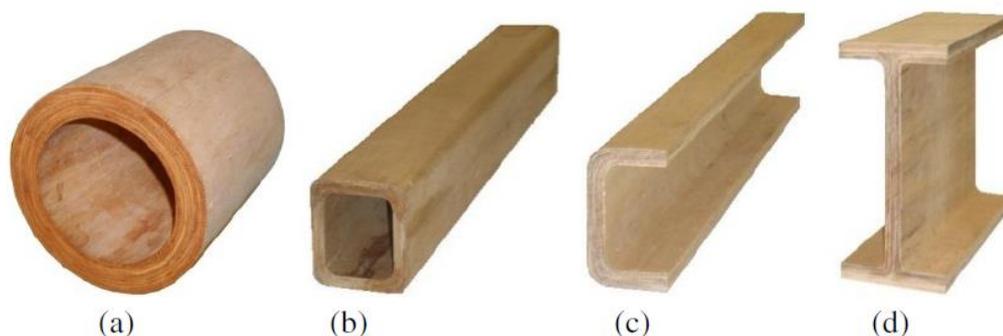


Abbildung 71: verschiedene an der Griffith University (Brisbane, Australien) hergestellte Profile a) rundes Hohlprofil b) rechteckiges Hohlprofil c) C-Profil d) I-Profil (Underhill et al.; 2014)

Die Herstellung der in Abbildung 71 gezeigten Profile erfolgt mit Hilfe eines Negativs in der Mitte, um das herum die Furniere gepresst und gleichzeitig verklebt werden. Die Pressung erfolgt durch das Entgegendrücken des Negativs mit den Furnieren gegen flexible Gurte. Zusätzlich werden Teflon-Folien zwischen Negativ und dem innenliegenden Furnier sowie zwischen dem außenliegenden Furnier und dem Gurt eingelegt, um die Reibung zu verringern. Es wird eine Hälfte des Profils hergestellt und anschließend mit einer zweiten zu einem Hohlprofil zusammengesetzt, wie in Abbildung 72 ersichtlich. Beim C-Profil, aus dem anschließend das I-Profil und das rechteckige Hohlprofil entsteht, muss noch zusätzlich Druck von außen aufgebracht werden, um den notwendigen Pressdruck auf die Furniere zu gewährleisten. Es werden 1,7 mm starke Schäl-furniere verwendet, die mit der offenen Seite nach innen verwendet werden. Die Schichten sind dabei immer in Längsrichtung orientiert. Als Holzart dient Eucalyptus cloeziana, eine in australischen Plantagen vorkommende Laubholzart. Eucalyptus cloeziana gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern.

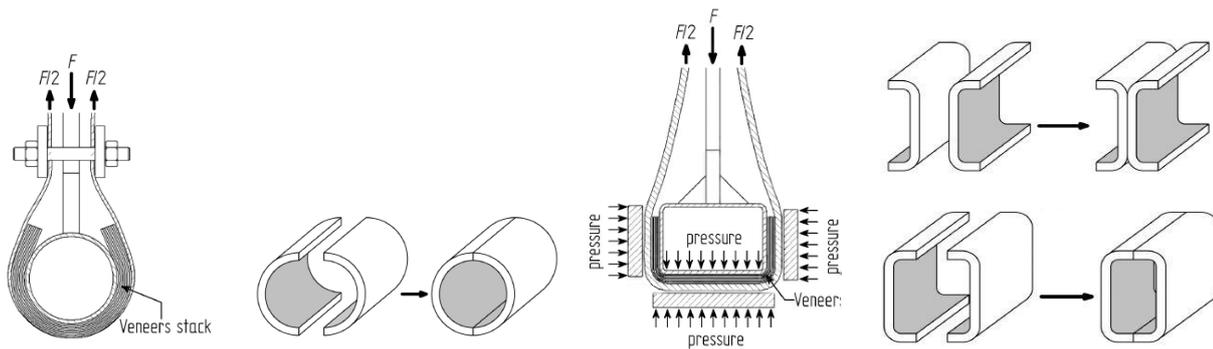


Abbildung 72: Herstellungsprozess von Profilen aus Furnierlagenholz (Underhill et al.; 2014)

Srinivasan et al. (2007) zeigen uns das Umformen der Furniere unter der Mithilfe von Temperatur. Verwendet wurden Monterey-Kiefer (*Pinus radiata* D. Don) Furniere mit einer Dicke von 0,6mm. In Abbildung 73 sind die hergestellten Profile erkennbar. Um das Furnier leichter Formen zu können wurden sie vor dem Pressvorgang für 60 Sekunden in 60 bis 80°C heißes Wasser eingetaucht. Für die Profile wurden drei Schichten der flachgemesserten Furniere mittels Phenol-Formaldehyd bzw. PU-Klebstoff verklebt und gepresst. Der Pressvorgang erfolgte mittels Stahlformen, welche während des Pressvorgangs auf eine Temperatur von 200°C erhitzt wurden.

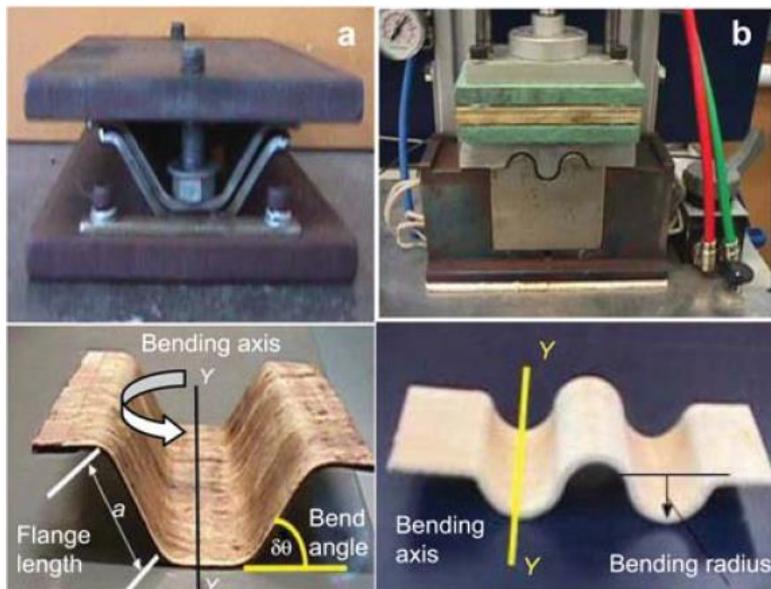


Abbildung 73: a) Trapezstahlpressform mit temperaturgepresstem Profil aus 3 Furnierschichten b) Wellblechform aus Stahl mit temperaturgepresstem Profil aus 3 Furnierschichten (Srinivasan et al.; 2007)

Diese Arbeit zeigt die Machbarkeit von Profilen aus Furnierlagenholz. Das Hauptaugenmerk lag aber in der Feststellung des Rückstelleffekts von Holzprofilen aus mehreren Schichten. Dieser wird im nächsten Absatz näher behandelt.

4-4.5 RÜCKSTELLEFFEKT

Holz kehrt nach dem Umformen, aufgrund seines elastischen Materialverhaltens, wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, muss das Bauteil entweder mit einer Sekundärstruktur verbunden werden, welche die Spannungen bzw. Kräfte aus dem Umformvorgang aufnimmt oder es wird mittels Verbundwirkung fixiert. Dabei sorgt die Verbundwirkung der Lagen untereinander durch das Abbinden des Klebstoffs dafür, dass das Bauteil seine Form behält.

Durch eine Verklebung von mindestens drei Furnierlagen kommt es zu einer schubfesten Verbindung, dem sogenannten Absperrn. Die Faserrichtungen sind dabei jeweils um 90° gegeneinander versetzt. Man spricht hier vom Sperrholz. Durch die Sperrwirkung wird das Schwinden und Quellen des Holzes eingeschränkt und die Formbeständigkeit bei geformten Furnierlagenholzbauteilen erhöht. Voraussetzung ist eine symmetrische Anordnung der Lagen zur Mittellage mit gleicher Holzart und Dicke. Je mehr Lagen das Bauteil beinhaltet, desto besser ist seine Absperrwirkung und Formbeständigkeit. (Becker, Zimmer; 2014)

Die gepressten Profile von Srinivasan et al. (2007) wurden hinsichtlich des Rückstelleffekts untersucht. Die Herstellung der Profile wurde bereits unter 4-4.4 Formgepresste Profile erläutert. Der Biegeradius betrug 10 mm. Gemessen wurde der Rückstelleffekt (frei übersetzt aus „Spring-back“) 48 Stunden nach dem Pressvorgang und ein negativer Rückstelleffekt (frei übersetzt aus „Spring-forward“) gleich nach der Entnahme des Bauteils aus der Presse. Das Versuchsschema ist in Abbildung 74 dargestellt.

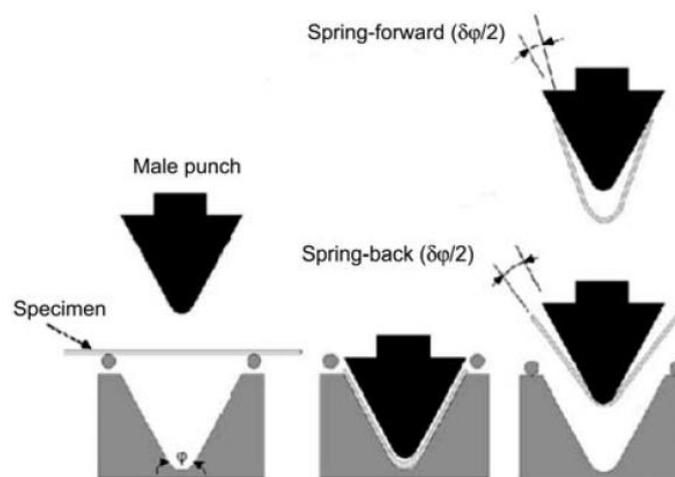


Abbildung 74: schematische Darstellung des Rückstelleffekts (Srinivasan et al.; 2007)

Der Rückstelleffekt bezeichnet das Bestreben des Holzes sich wieder in seine ursprüngliche Form rückformen zu wollen. Als negativer Rückstelleffekt wird hier eine größere Verformung verstanden, welche über die Geometrie der Pressform hinausgeht.

Der negative Rückstelleffekt der Furniere kann dadurch erklärt werden, dass sich durch die Vorbehandlung mit heißem Wasser, freies Wasser in den Zellen befindet. Durch den Kontakt mit den heißen Presswerkzeugen während der Umformung werden die gebundenen Wassermoleküle allmählich von den Zellwänden freigesetzt. Laut Srinivasan et al. (2007) kommt es durch die dadurch eintretende Schrumpfung und thermische Anisotropie zu einer größeren Verformung des Querschnitts als gewollt.

Auf der anderen Seite können die Furniere Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen, welche den Rückstelleffekt unterstützen. Die Auswertung in Abbildung 75 zeigt eine deutlich höhere Rückformung des Einzelfurniers aufgrund der fehlenden Sperrwirkung. Das Einzelfurnier weist dabei gegenüber dem zweischichtigen Aufbau einen bis zu fünf Mal und gegenüber dem dreischichtigen Aufbau einen bis zu zwei Mal so großen Rückstelleffekt auf. Beim Zweischichtigen Aufbau wurden starke negative Verformungen nach dem Pressen festgestellt. Dies ist auf die asymmetrische Anordnung der Lagen und den höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Lage, welche parallel zur Biegeachse gebogen wurde, zurückzuführen. Bei den dreilagigen Proben wurden am Beginn kleine negative Rückstelleffekte beobachtet. Nach 48 Stunden stellte sich der gemessene Rückstelleffekt ein.

Die zweilagigen Proben wurden mit Phenol-Formaldehyd-Klebstoff verklebt, während die dreilagigen mit PU-Klebstoff verklebt wurden. Aus den Auswertungen lässt sich daher schließen, dass die Proben mit dem PU-Klebstoff größere Rückstelleffekte aufwiesen, als jene mit Phenol-Formaldehyd-Klebstoff. Laut Srinivasan et al. (2007) blockiert der Phenol-Formaldehyd-Klebstoff die Sorptionsstellen des Holzes durch Vernetzung und reduziert dadurch die Feuchtigkeitsaufnahme und die dadurch folgende Schrumpfung bzw. Quellung.

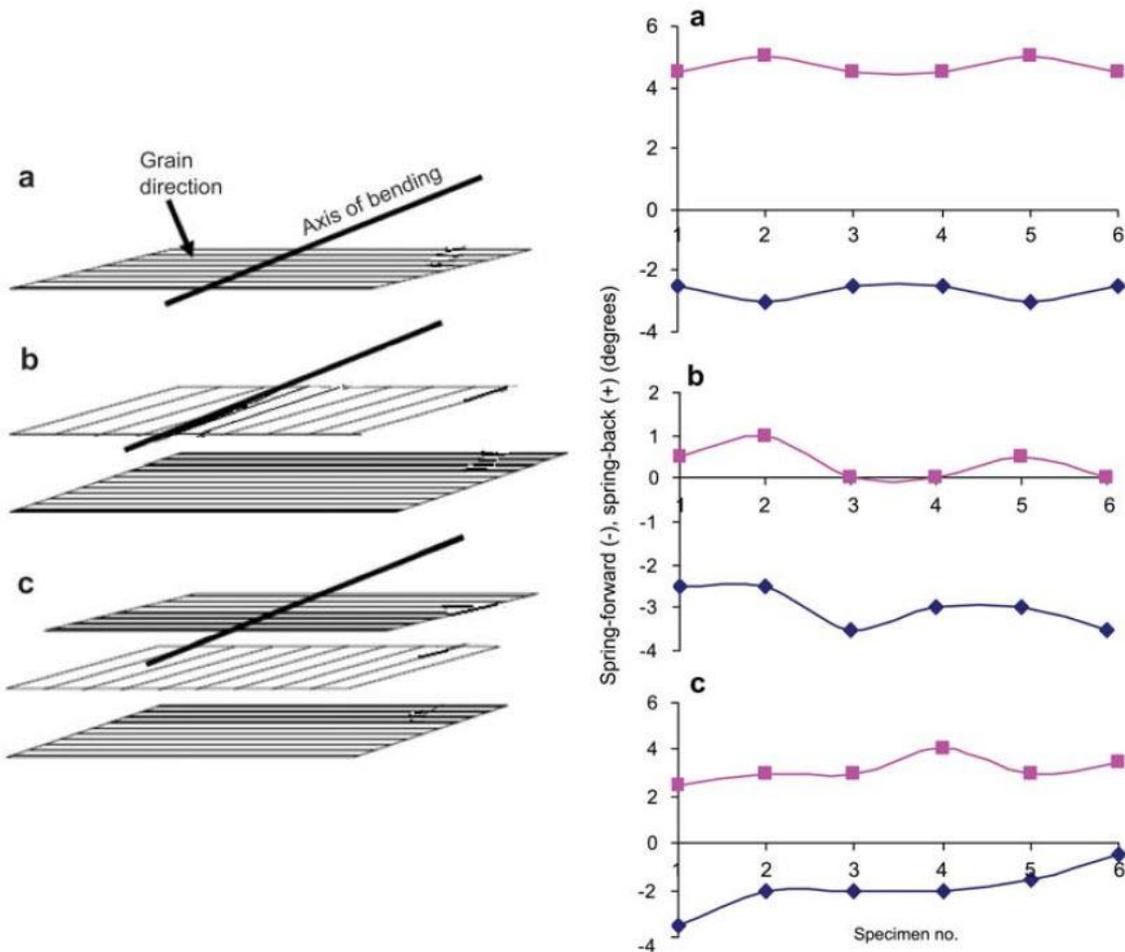


Abbildung 75: Anordnung der Schichten bei den Proben und Ergebnisse des Rückstelleffekts (Srinivasan et al.; 2007)

In einer anderen Studie untersuchten Srinivasan et al. (2008) die Machbarkeit der Herstellung von Profilen mittels Walzenumformung (siehe 4-4 Formpressen von Furnieren). Neben der Durchführbarkeit wurde auch der Rückstelleffekt untersucht. Abbildung 76 zeigt dabei den Unterschied zwischen dem umgeformten Profil und der Geometrie der Walzen. Die Geometrien stimmen gut überein, abgesehen von den freien Enden der Profile. Diese Rückformung kann auf den elastischen Zwang des Holzes sich in seine ursprüngliche Form rückformen zu wollen und auf eine Nichtübereinstimmung der Feuchtigkeitsgradienten der Probe zurückgeführt werden.

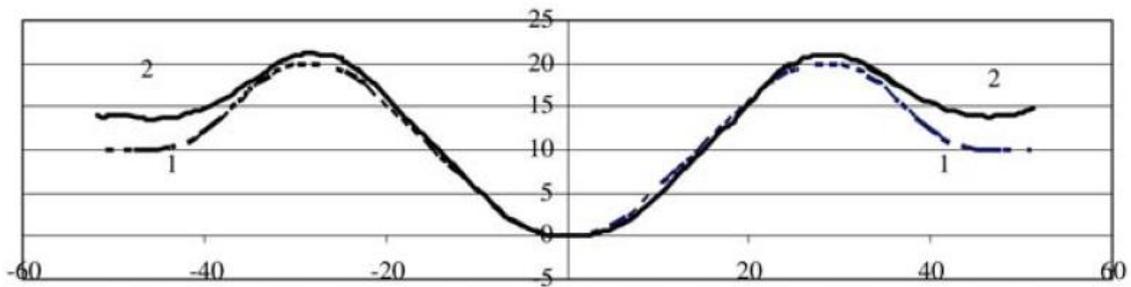


Abbildung 76: Überlagerung Walzenprofil (1) und geformter Probekörper (2) (Srinivasan et al.; 2008)

4-5 BEHANDLUNG DES HOLZES

Beim Biegen von Vollholz bzw. dem Umformen von Furnieren muss das Umformvermögen vom verwendeten Holz in manchen Fällen erhöht werden, da es sonst während des Umformvorgangs versagen würde. Das Holz ist nach einer Behandlung, durch zum Beispiel Dämpfen oder Kochen, in der Lage, kleinere Biegeradien zu realisieren ohne zu Bruch zu gehen als wenn es unbehandelt umgeformt werden würde. Um diese Erhöhung der Plastizität des Holzes zu erreichen gibt es Verfahren, wie das Dämpfen, Kochen, Stauchen und die chemische Behandlung, welche das Holz vor Beginn des Umformprozesses, formbarer machen. Während dem Umformprozess kann Temperatur und eine Erhitzung des Holzes mit Hochfrequenz das Holz formbarer machen.

Die Einflüsse der Behandlung des Holzes auf die mechanischen Kennwerte werden in Staudacher (2015) behandelt.

4-5.1 DÄMPFEN

Da beim Umformen meist ein erhöhtes Umformvermögen der Hölzer erforderlich ist, wird das Holz vor dem Biegen gedämpft. Nach Kollmann (1955) wird gewöhnlich das zu dämpfende Holz bei etwa 100° Celsius je 25 mm Dicke etwa eine Stunde lang mit Wasserdampf beaufschlagt. Nimmt man gespannten, unter Druck stehenden, Dampf zur Vorbehandlung, so wirkt dieser viel effizienter als strömender Dampf, allerdings sind 2 bar die obere zulässige Grenze, um Zersetzungen zu vermeiden. Es finden dabei im Holz chemische Reaktionen statt, die sich mit steigendem Dampfdruck und erhöhter Dämpfzeit vermehren. Die chemischen Reaktionen im Holz sind einerseits eine Verringerung des Ligningehalts und der Abbau von kurzkettiger Hemicellulose. Andererseits bleibt die Cellulose und Pentosane komplett erhalten. Die Verwendung von Heißdampf hat sich nicht bewährt, da er das Holz trocknet.

Der Elastizitätsmodul sinkt während des Dämpfens, die bleibende Druckfestigkeit verändert sich dabei aber nicht. Voraussetzung dafür ist aber, wie bereits zuvor erwähnt, ein Dämpfen unter 2 bar, damit keine Substanzverluste eintreten. Die eintretenden Substanzverluste sind Auslösungen von Holzbestandteilen und ein damit eingehender Gewichtsverlust. (Kollmann; 1955)

4-5.2 KOCHEN

Das Kochen der zu biegenderen Furniere bzw. des zu biegenderen Holzes ist für einige Holzarten geeignet. Birke eignet sich für das Kochen sehr gut. Die Holzfeuchtigkeit und das Quellmaß sind dabei höher als beim Dämpfen. Das zum Kochen verwendete Wasser soll in gewissen Zeitabständen ausgetauscht werden, da es aufgrund der chemischen Reaktion des Holzes während dem Kochen säurehaltig wird. (Kossatz, Klieber; 1955)

4-5.3 STAUCHEN

Gedämpftes oder gekochtes Holz wird in ein Pressfutter eingespannt und in Richtung der Faser gestaucht. Der Stauchdruck wird dabei auf die Länge des Holzes verteilt, indem wellenförmige Rippen quer zur Faser angreifen. Die Hirnflächen sollen dadurch nicht unter einem unzulässig starken Stauchdruck stehen. Durch das Stauchen des Holzes wird der Faserverband in Faserrichtung gelockert. Dies bewirkt einen geringen Widerstand gegen Schubkräfte wodurch sich die Biegespannung vermindert und das Holz biegsam wird. (Kossatz, Klieber; 1955)

4-5.4 CHEMISCHE BEHANDLUNG

Die chemische Behandlung des Holzes wird durch Kochen mit einer Harnstofflösung durchgeführt. Die Lösung hat einen Gehalt an festem Harnstoff von 25 %. Das nach der Behandlung getrocknete Holz lässt sich bei einer Temperatur von 100 bis 105°C leicht biegen. Nach dem Abkühlen behält es seine Form und ist biegesteif. (Kossatz, Klieber; 1955)

4-5.5 HOCHFREQUENTE BEHANDLUNG

Die hochfrequente Behandlung hat zwei Auswirkungen auf das Holzbauteil. Zum einen kann das Holz besser gebogen werden. Die Behandlung erfolgt durch eine gleichmäßige Erwärmung infolge molekularer Reibung im Dielektrikum in kurzer Zeit. Bei diesem Verfahren gibt es keinen nennenswerten Feuchtigkeitsverlust im Holz durch die kurze Erhitzungsdauer. Das freie Wasser im Holz wird bis zum Siedepunkt erwärmt, allerdings so schnell das nur wenig vom dabei entstehenden Wasserdampf durch das Holzgefüge ausdiffundiert. Das Ergebnis dieses Verfahrens sind gute Biegeeigenschaften des Holzes, besser als bei jeder anderen Behandlung des Holzes vor oder während des Pressvorgangs. (Kossatz, Klieber; 1955)

Der zweite Verwendungszweck dieses Verfahrens ist die Beschleunigung des Aushärteprozesses des Klebstoffs während dem Pressen. Ein Kondensatorfeld, welches an einen Hochfrequenzgenerator mit einer Frequenz vom 3 bis 45 MHz angeschlossen ist, erwärmt das Bauteil und verkürzt die Aushärtezeit erheblich. (Becker, Zimmer; 2014)

4-5.6 TEMPERATUR

Durch die Erwärmung der Furnierlagen wird das Furnier biegsamer. Die Verwendung von Hitze wird hauptsächlich über das Presswerkzeug aufgebracht und dient neben der Erhöhung der Umformbarkeit vor allem der schnelleren Abbindung des Klebstoffs. Die Presswerkzeuge werden entweder mit elektrischer Widerstandsheizung (Heizdrähte in Aluminium), mit Heißwasser oder mit Thermoöl erhitzt. Die Temperatur beträgt im Mittel 100°C. Für die Berechnung der Durchheizzeit gilt folgende Faustformel: Dicke in mm/2 + 5 Minuten. Die Presszeit für ein 20 mm starkes Formteil beträgt etwa 15 Minuten. (Becker, Zimmer; 2014)

KAPITEL 5: HERSTELLUNG PROTOTYPEN

Nach erfolgter Literaturrecherche wurde mit der Herstellung der Prototypen begonnen. Sie sollten die Machbarkeit des Formpressens von zweidimensionalen Profilen aus Furnierschichtholz aufzeigen. Wie bereits unter Kapitel 1: Einleitung erwähnt, stand zu Beginn dieser Arbeit ein erster Formvorschlag fest. Abbildung 77 zeigt das einwellige Trapezprofil mit den dazugehörigen Abmessungen. Für diese Profilform galt es zunächst, eine Form für das Formpressverfahren zu bauen, um mit ihr anschließend die Furniere in die gewünschte Form zu pressen.

5-1 GEOMETRIE

Vor Beginn der Arbeit stand die erste Form des Trapezprofils schon fest. Wie in Abbildung 77 ersichtlich, beträgt der minimale Biegeradius 50 mm und der Steigungswinkel des Steges 60°. Die Gesamthöhe des Profils beträgt 15 cm bei einer Profilbreite von rund 40 cm. Da das Profil in der späteren Verwendung als Verbundbauteil genutzt werden soll, sind die oberen waagrechten Flansche von großer Bedeutung. Die oberen Flanscbreiten sind beim einwelligen Profil mit jeweils 3 cm an beiden Seiten gegeben. Diese Fläche bildet, in der endgültigen Verwendung, die Klebefläche zwischen dem Leichtbauprofil und einer aufgeklebten Platte.

Der Grund für die Verwendung dieser Trapezform liegt vor allem im hohen Trägheitsmoment bei geringer Querschnittsfläche. Mit der Verwendung von Buche als Material für das Profil kann eine hohe Steifigkeit des Profils erreicht werden. Der Grund dafür liegt im höheren Elastizitätsmodul der Buche im Vergleich zu anderen im Bauwesen hauptsächlich in Verwendung stehenden Holzarten.

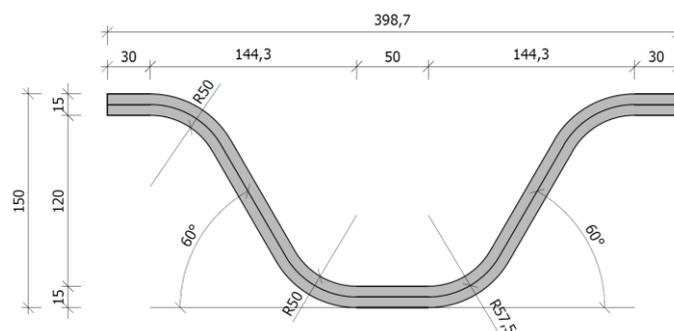


Abbildung 77: 1. Form Trapezprofil einwellig, Maße in mm

Die Weiterentwicklung des einwelligen Profils stellt das Aneinanderreihen von zwei oder mehreren Wellen nebeneinander dar. Damit können in einem Pressvorgang mehrere bereits verbundene Trapezprofile hergestellt werden. Das zweiwellige Profil aus Abbildung 78 besteht lediglich aus zwei aneinander gereihten einwelligen Profilen. Die Abmessungen des halben Profils sind ident mit jenen des einwelligen Profils.

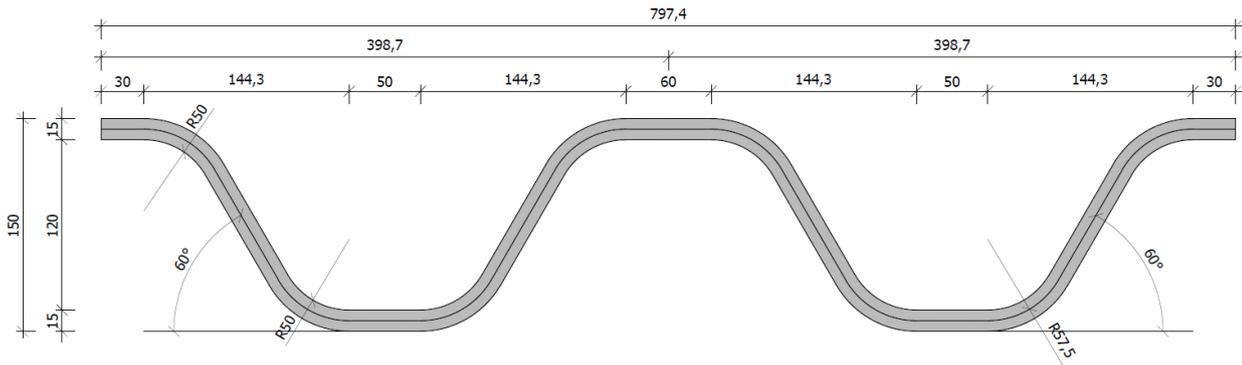


Abbildung 78: 1. Form Trapezprofil zweiwellig, Maße in mm

5-2 HERSTELLUNG DER FORM

Für die Herstellung der Profile sind 2 Pressformen angefertigt worden. Eine, basierend auf dem einwelligem Profil, und eine zweite für das zweiwellige.

Die einwellige Form besteht jeweils aus einer Matrize (vertiefte Form, Abbildung 79) und dem Gegenstück der Patrize.



Abbildung 79: Matrize einwellig

Die zweiwellige Pressform besteht aus zwei ausgefrästen 5 schichtigen Brettsperrholzplatten. Mit Hilfe eines Fräsroboters, wie in Abbildung 80 ersichtlich, wurde die zweiwellige Form eingefräst. Als Grundlage dienten die Abmessungen aus Abbildung 78.



Abbildung 80: Fräsvorgang für die zweiwellige Matrize und fertige Pressform

Durch das Aufkleben einer Teflonbeschichtung auf die zweiwellige Pressform, soll die zu erwartende Reibung beim Pressvorgang, zwischen der Form und den Furnieren, weitestgehend niedrig gehalten werden. Bei der einwelligen Form reichte aufgrund der weniger groß zu erwartenden Reibungskräfte eine PE-Folie aus. Durch die PE-Folie und die Teflonbeschichtung sind die Formen auch gegen ein Verschmutzen bzw. Verkleben durch etwaig austretenden Klebstoff geschützt.

5-3 HERSTELLUNG TRAPEZPROFIL

Die Herstellung aller Profile erfolgte durch Formpressen mittels Matrize und Patrize. Gepresst wurden die Profile in einer 3 mal 1,35 m großen Furnierpresse der Firma Langzauner GmbH. Nachfolgend sind die verwendeten Materialien und der Herstellprozess für die hergestellten Leichtbauprofilprototypen erläutert.

5-3.1 PROTOTYP 1 EINWELLIG

5-3.1.1 Material

- Holzart: Buche
- Furnierart: Schäl furnier
- Furnierdicke: 1,75 mm
- Anzahl Schichten: 8
- Anzahl Querlagen: 2
- Lage der Querlagen: 2. und 7. Schicht
- Form: einwellig
- Klebstoff: Polyvinylacetat (PV/H) Holzleim wasserfest (Henkel Central Eastern Europe GmbH)

5-3.1.2 Herstellungsprozess

Aufgrund der Literaturrecherche in 4-3.2 (Normal zur Faserrichtung) wurde festgestellt, dass der mögliche Biegeradius für 1,75 mm dicke Rotbuchenschäl furniere den minimalen Radius der Form von 50 mm überschreitet. Daraus folgt, dass die 1,75 mm dicken Furniere, für die querorientierten Schichten, den Biegeradius von 50 mm ohne entsprechende Vorbehandlung nicht aufnehmen können. Die längsorientierten Schichten werden in Querrichtung (parallel zur Faser) gebogen und weisen einen wesentlich kleineren Widerstand gegen die Verformung auf. Daher wurden die Querlagen vor dem Formgebungsprozess vorbehandelt.

Die Lagerung der Furniere vor dem Herstellprozess erfolgte in der Klimakammer bei 20° Celsius und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 %. Die Holzfeuchte der Furniere lag nach Lagerung in der Klimakammer erfahrungsgemäß bei etwa 8 %.

Für die zwei Querlagen wurden die Furniere mit Hilfe einer Sprühflasche und Wasser vorgehästet, um das Furnier leichter biegen zu können. Sie wiesen im feuchten Zustand ein wesentlich besseres Umformvermögen auf, als im trockenen Zustand. Die vorgehästeten Furnierlagen wurden in die einwellige Form mit Füllmaterial aus Biegesperrplatten eingelegt. Die verwendeten Biegesperrplatten bestehen aus Ceibaholz und sind ein leichter und biegsamer Holzwerkstoff. Die Platte besteht aus einer dünnen Mittellage und zwei dickeren Decklagen. Die Biegesperrplatten dienen dazu, den Freiraum zwischen dem Profil und der Form auszufüllen, da der Abstand von Matrize zu Patrize 15 mm beträgt und die zwei Schichten mit einer Stärke von 1,75 mm es aber nur auf 3,5 mm bringen. Zusätzlich wurden 2 PE-Folien

als Trennlage zwischen Füllmaterial und Form eingelegt, um die Reibung beim Pressvorgang zu minimieren und um die Form vor der Feuchtigkeit der Furniere zu schützen.

Die Form samt den Furnieren wurde mit Schraubzwingen zusammengespannt und für 16 Stunden so belassen. Am nächsten Tag konnte beobachtet werden, dass die Furniere nach Öffnen der Form die einwellige Prägung beibehielten. Allerdings waren Sie noch recht feucht und wiesen ein Quellmaß von etwa 10 % der ursprünglichen Länge auf. Um die Trocknung der Furniere zu beschleunigen, wurde die Form offen gelassen und die Furniere lokal beschwert, um dem Rückformprozess der Furniere entgegen zu wirken. Die Trocknung der vorgewässerten Furniere stellte sich als problematisch heraus, da sie in der Mitte wesentlich langsamer trockneten als am Rand. Dadurch entstanden große Schwindrisse, die vom Rand aus 20 cm Richtung Mitte reichten. Diese Risse sind in Abbildung 81 links am zweiten Furnier von oben ersichtlich.

Vor dem Pressvorgang wurde der wasserfeste PV/H Holzleim auf die Furnierschichten aufgetragen und die Schichten aufeinandergelegt. Es wurden acht Schichten verklebt, wobei die zweite und siebente Schicht als Querlagen ausgeführt wurden. Vor dem Einlegen der Furnierschichten in die Form wurde zwischen der Form und den Furnieren jeweils eine PE-Folie eingelegt, um die Reibung zwischen Profil und Form zu verringern. Danach begann der Pressvorgang in einer zehnzylindrigen Furnierpresse. Der Pressdruck betrug 1 N/mm^2 .

Nach dem Pressvorgang und dem Abschneiden der überstehenden Furnierstücke konnte festgestellt werden, dass das einwellige Profil in den außen liegenden Längsschichten keine großen Risse aufwies. Lediglich in den zwei Querlagen konnte man im angeschnittenen Bereich Risse quer zur Faserrichtung erkennen, die vom Schwinden des Materials stammen.

In Abbildung 81 rechts ist das fertig zugeschnittene Trapezprofil zu erkennen.



Abbildung 81: Prototyp 1 einwellig nach dem Pressvorgang und nach dem Zuschneiden

5-3.2 PROTOTYP 2 EINWELLIG

5-3.2.1 Material

- Holzart: Buche
- Furnierart: Schäl furnier
- Furnierdicke: 1,75 mm
- Anzahl Schichten: 8
- Anzahl Querlagen: 2
- Lage der Querlagen: 2. und 7. Schicht

- Form: einwellig
- Klebstoff: Polyvinylacetat (PV/H) Holzleim wasserfest (Henkel Central Eastern Europe GmbH)

5-3.2.2 Herstellungsprozess

Die Herstellung des zweiten Prototyps erfolgte analog zu der des ersten mit dem einzigen Unterschied, dass aufgrund der entstandenen Risse durch das Vornässen der Furniere, diesmal auf die Vorbehandlung mit Wasser verzichtet wurde. Es wurden wiederum acht Schichten mit zwei Querlagen in der zweiten und siebenten Schicht verwendet. Die Furniere lagerten vor dem Herstellprozess in der Klimakammer bei 20° Celsius und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der Holzfeuchtegehalt der Furniere lag erfahrungsgemäß nach der Lagerung bei 8 %.

Wie aus 4-3 Umformen von Furnier erkennbar war, war der Biegeradius für die Querlage zu gering. Dennoch wurde ein Profil mit den für die verwendeten Furniere zu geringen Biegeradius hergestellt. Nach dem Pressvorgang war erkennbar, dass die Querlage beim Pressen, nach optischer Begutachtung des zugeschnittenen Profils, mit dem Biegeradius von 50 mm problemlos umgeformt werden konnte.

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Ablauf des Herstellprozesses, vom Klebstoffauftrag über das Anordnen der Furniere, dem anschließendem Pressvorgang bis hin zum fertigen Profil, ersichtlich.



Abbildung 82: Klebstoffauftrag und Schichten der Furniere



Abbildung 83: Form kurz vor dem Pressvorgang und fertiges Profil

5-3.3 PROTOTYP 3 ZWEIWELLIG

5-3.3.1 Material

- Holzart: Birke
- Furnierdicke: 1,00 mm
- Furnierart: Messerfurnier
- Anzahl Schichten: 3
- Anzahl Querlagen: 1
- Lage der Querlage: 2. Schicht
- Form: zweiwellig
- Klebstoff: Polyvinylacetat (PV/H) Holzleim wasserfest (Henkel Central Eastern Europe GmbH)

5-3.3.2 Herstellungsprozess

Beim zweiwelligen Profil ergab sich erstmals die Problemstellung des Fügens der Furniere, da die Abmessungen nun doppelt so groß waren als beim einwelligen Profil. Die uns zur Verfügung stehenden Furniere hatten in Querrichtung eine Breite von 25 cm. Für das zweiwellige Profil war in dieser Richtung allerdings eine Länge von 106 cm von Nöten. Daher mussten die Längslagen aus mehreren zusammengefügt Furnieren hergestellt werden. Die Längslagen wurden dafür längs der Faser gestoßen. Eine schnelle und einfache Methode des Fügens ist das Verbinden der Furniere mittels Furnierpapier (Abbildung 84). Das Furnierpapier ist einseitig mit Klebstoff benetzt, der mit Wasser aktiviert wird und anschließend am Holz anklebt. Mit dem 20 mm breiten Klebeband werden die Furniere einfach stumpf gestoßen und beidseitig mittels Furnierpapier verklebt.

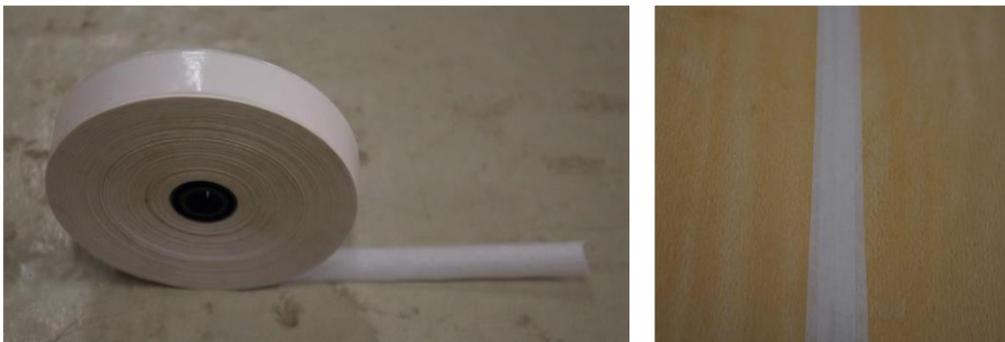


Abbildung 84: Furnierpapierrolle ungelocht und mittels Furnierpapier gefügte Furniere

Der erste Versuch, ein zweiwelliges Profil herzustellen, erfolgte mit Birkenfurnieren. Das Profil, in Abbildung 85 ersichtlich, besteht aus drei 1 mm starken Birkenfurnieren. Das Profil enthält eine Querlage, welche sich in der Mitte befindet.

Gepresst wurde das Profil mit Hilfe der mit Teflon beschichteten zweiwelligen Pressform.



Abbildung 85: Prototyp 3 zweiwellig

In Abbildung 85 kann man an der Deckschicht (Längslage) sehr gut erkennen, dass das Furnierpapier ausreichend war, um die Furnierstücke miteinander zu verbinden. Das gepresste Profil wies keine Risse auf, wie dies bei den anderen, zuvor hergestellten, Profilen der Fall war.

5-3.4 PROTOTYP 4 ZWEIWELLIG

5-3.4.1 Material

- Holzart: Buche
- Furnierart: Schäl furnier
- Furnierdicke: 1,75 mm
- Anzahl Schichten: 8
- Anzahl Querlagen: 2
- Lage der Querlagen: 2. und 7. Schicht
- Form: zweiwellig
- Klebstoff: Polyvinylacetat (PV/H) Holzleim wasserfest (Henkel Central Eastern Europe GmbH)

5-3.4.2 Herstellungsprozess

Nach der erfolgreichen Herstellung des zweiwelligen Profils aus Birkenfurnieren (5-3.3 Prototyp 3 zweiwellig) wurde im nächsten Schritt versucht ein zweiwelliges Profil aus acht Schichten 1,5 mm starken Buchenfurnieren herzustellen. Die Holzfeuchte lag erfahrungsgemäß bei 8 %.

Der Schichtaufbau erfolgte analog zu dem der einwelligen Profile; 8 Lagen, mit 2 Querlagen in der zweiten und siebenten Schicht. Gepresst wurde mit der zweiwelligen, mit Teflon beschichteten Form.

Die Furniere der Lagen mussten, um auf die entsprechende Größe zu kommen, gefügt werden. Das Verbinden der Furniere wurde mit Furnierpapier durchgeführt. Da bei diesem Profil aufgrund der erhöhten Schichtanzahl und der großen Abmessung durch die Zweiwelligkeit mit erhöhter Reibung zwischen den außenliegenden Furnieren und der Form zu rechnen war, wurden die Längsseiten mit Klebeband verstärkt um ein Aufreißen der Furniere zu verhindern.



Abbildung 86: gefügte und verstärkte Furniere

Das Kleben und Pressen erfolgte analog zu den vorherigen Profilen. In den folgenden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die äußeren Kanten der Furniere von außen nach innen gleiten mussten, um in die gewollte, von der Pressform vorgegebene, Form zu gelangen. Im ersten Bild ist der seitliche Überstand der Furniere deutlich zu sehen. Mit dem Schließen der Presse wird der Überstand stetig geringer.

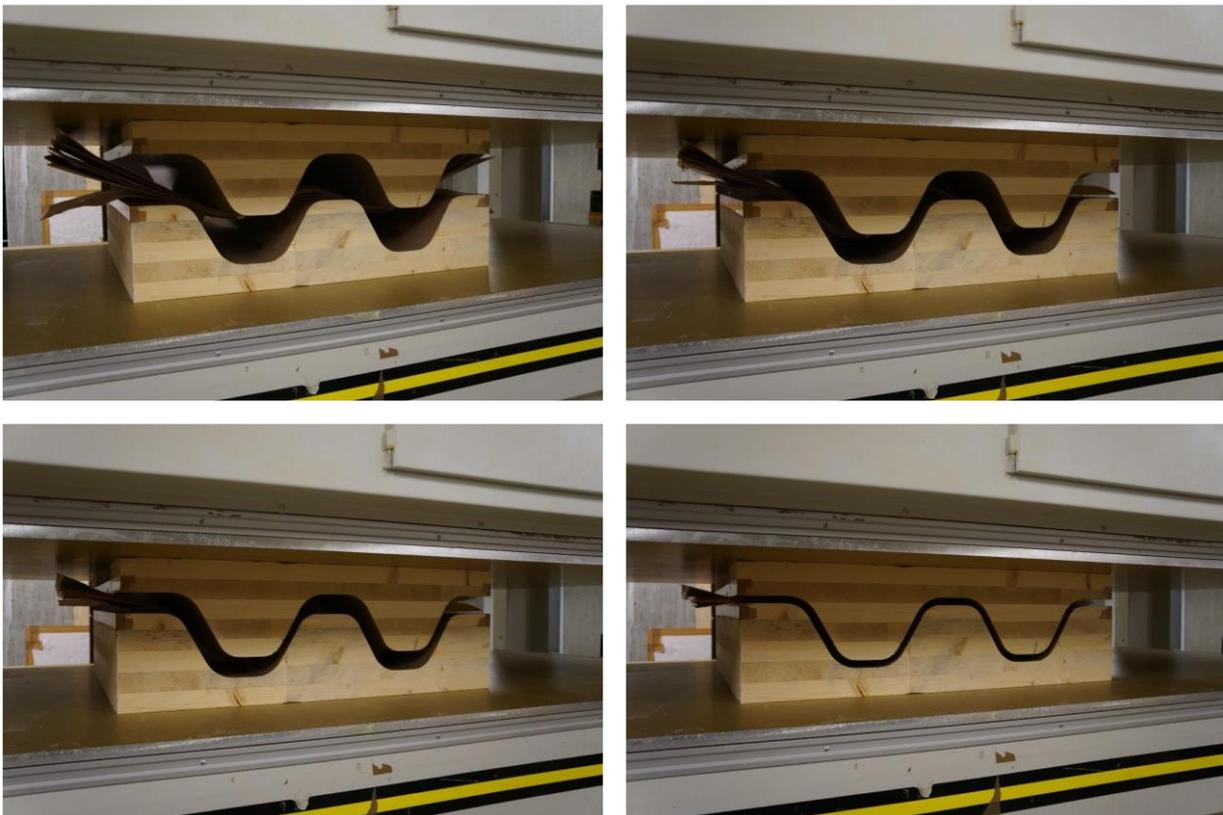


Abbildung 87: Pressvorgang zwiwelliges Profil

Durch den Weg beim Gleiten der Furnierschichten entstehen Reibungskräfte, welche das Furnier in diesem Fall teilweise nicht aufnehmen konnte. Auch die Verstärkung der Furniere mittels Klebeband brachte keinen Erfolg. In Abbildung 88 und Abbildung 89 ist ersichtlich, dass die zwei obersten Schichten in Profilmitte gerissen sind. Da die relative Verschiebung der äußersten Furniere relativ groß ist, treten hier große Reibungskräfte auf. Das längsorientierte Furnier der äußersten Schicht versagte dabei

auf Querszug. Ist das äußerste Furnier gerissen, so übertragen sich die Reibungskräfte auf die nächste, weiter innenliegende, Schicht. In diesem Fall waren auch für diese Schicht die Reibungskräfte zu groß. Da die zweite Schicht eine Querlage war, kann man aufgrund der höheren Zugfestigkeit längs der Faser davon ausgehen, dass diese Schicht nicht versagt. Die Querlage wurde aber genau an dieser Stelle mittels dem Furnierband gestoßen. Die auftretenden Reibungskräfte waren für diese Verbindung zu groß und somit versagte auch die zweite Schicht an dieser Stelle.

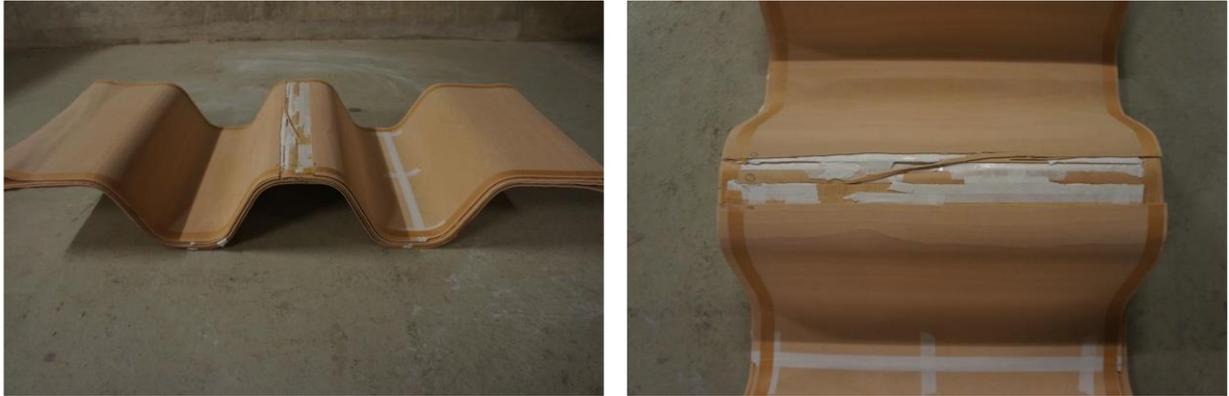


Abbildung 88: *zweiwelliges Profil nach dem Pressvorgang*



Abbildung 89: *Detailaufnahme des gerissenen Bereichs*

Die Lösung für das Problem der Reibungsübertragung und dem damit zusammenhängenden Aufreißen der Furniere liegt im Einlegen einer Zwischenschicht, welche den Großteil der Reibung aufnimmt. Zwischen der äußersten Schicht und der Form herrscht ein großer Verschiebeweg, welcher eine große Reibung erzeugt. Das Beschichten der Form mit Teflon, einer reibungsarmen Oberfläche, reichte in diesem Fall nicht aus. Daher wurde für die Erzeugung des 3 m langen Trägers eine Zwischenschicht aus Biegekunststoff eingelegt, welcher die Reibung, die durch den Verschiebeweg zwischen der Form und der äußersten Furnierschicht entsteht, aufnimmt. Der Biegekunststoff wird zwischen dem äußersten Furnier und der Form eingelegt. Zwischen den einzelnen Furnierlagen des Profils herrscht ein geringer Verschiebeweg, welcher eine geringe Reibung erzeugt. Die mit Klebstoff benetzten Furniere sind in der Lage diese Reibung aufzunehmen und daher gibt es in diesem Bereich kein Problem mit dem Aufreißen des Holzes.

5-3.5 PROTOTYP 5 EINWELLIG

5-3.5.1 Material

- Holzart: Buche
- Furnierart: Schäl furnier
- Furnierdicke: 1,50 mm
- Anzahl Schichten: 10
- Anzahl Querlagen: 2
- Lage der Querlagen: 2. und 9. Schicht
- Form: einwellig
- Klebstoff: Melaminharzkleber Prefere 4546 und Härter Prefere 5022 (Dynea AS; 2012)

5-3.5.2 Herstellungsprozess

Bei diesem Prototyp wurden die Verwendung von nur 1,50 mm dicken Furnieren und die Überlappung von Furnieren getestet. Die Überlappung diente hierbei als Vorversuch für ein längeres Profil, da es dort notwendig sein wird, die Furniere durch Füge-techniken zu verlängern. Die Überlappung ist eine relativ einfache Methode um Furniere miteinander zu verbinden. In Abbildung 90 ist die mit Weißleim bestrichene Fuge dargestellt. Die Überlappungslänge betrug 3 cm.

Die fertig gefügten Furnierlagen wurden anschließend mit Melaminharzkleber Prefere 4546 und Härter Prefere 5022 (Dynea AS; 2012) verklebt. Der Klebstoff wurde aus 100 Teilen Harz und 30 Teilen Härter hergestellt. Die Furniere wurden nach dem Klebstoffauftrag in der Furnierpresse zusammengepresst bis der Klebstoff ausgehärtet war.



Abbildung 90: mit Klebstoff versehener Stoß und fertige Verbindung nach dem Pressen

Nur die Längslagen wurden überlappt ausgeführt. Die Anordnung der Lagen des Profils erfolgte vor dem Pressen so, dass keine angrenzenden Überlappungen direkt aufeinander zu liegen kommen. Der Pressvorgang wurde mit der einwellig Form durchgeführt. Nach dem Zuschneiden des fertigen Profils konnte man feststellen, dass die Überlappung der Buchenfurniere für das Profil nicht geeignet ist. Die Schichten werden bei dem aufgebracht Pressdruck nicht vollständig zusammengedrückt. Die Furnierschicht ist im Bereich der Überlappung doppelt so dick. Das führt dazu, dass es nicht mehr möglich ist, einen entsprechenden Pressdruck über das ganze Profil zu gewährleisten. In Abbildung 91 sieht man, dass an einigen Stellen der Pressdruck zu niedrig ist und das Profil deutlich zu sehende Klüfte zwischen den Schichten aufweist. Die Stellen an denen das Profil Klüfte aufweist, befinden sich genau in jenen Bereichen, wo keine Überlappungen zu liegen kommen. Hier ist die Querschnittsdicke schlicht zu gering um einen entsprechenden Pressdruck zu gewährleisten. Eine mögliche Lösung dieses Problems

wäre es ein anderes Pressverfahren zu verwenden, welches sich an die unterschiedlichen Querschnittsdicken anpassen würde (siehe z. B. 4-4.3.2 Formpressen mit starrer Form und elastischer Gegenform).

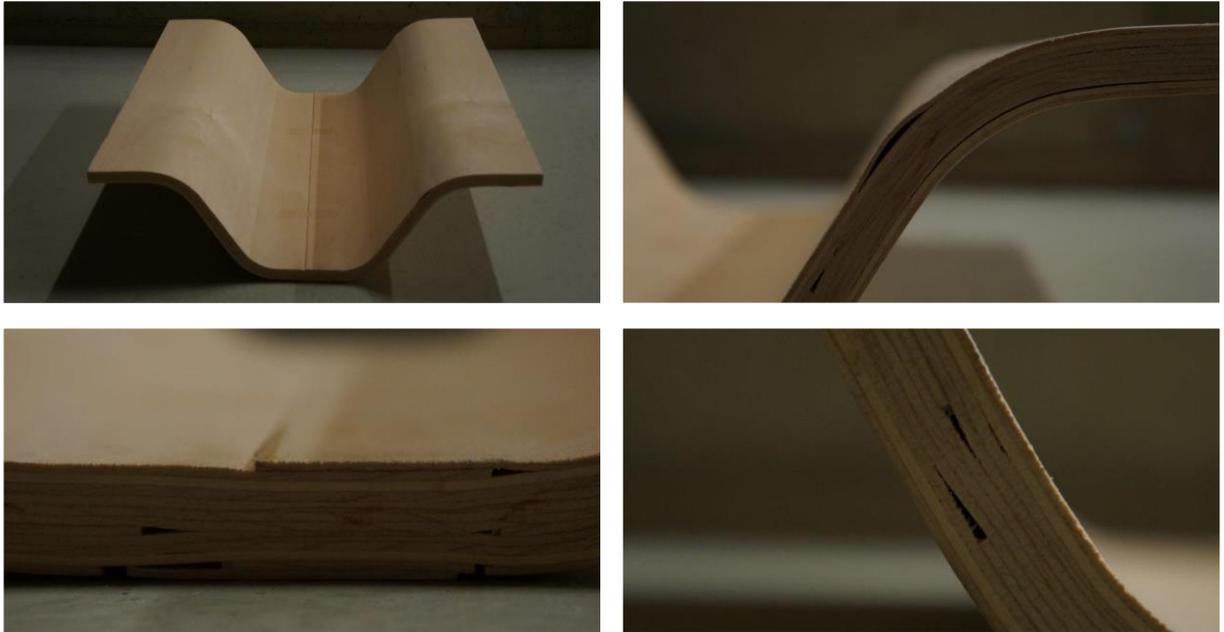


Abbildung 91: Bilder Prototyp 5

5-4 ANSCHAUUNGSSTÜCKE

Die als Prototypen hergestellten Profile wurden verwendet um Anschauungsstücke zu fertigen. Mit Hilfe dieser Anschauungsstücke soll die zukünftige Anwendung dargestellt werden. Auf die zugeschnittenen Profile wurden Deckplatten aus BauBuche und Kerto aufgeklebt. Ein möglicher Verwendungszweck dieser Bauteile ist der Einsatz als Deckenkonstruktion. In den folgenden Abbildungen ist eine Auswahl der gefertigten Profile zu sehen.



Abbildung 92: einwelliges Profil mit Deckplatte aus Kerto Q



Abbildung 93: einwelliges Profil mit Deckplatte aus Buchensperrholz



Abbildung 94: zweiwelliges Profil mit Deckplatte aus Buchensperrholz

KAPITEL 6: BERECHNUNGSMODELL

Für das Trapezprofil wurde ein Berechnungsmodell erstellt, auf das in diesem Kapitel näher eingegangen wird. Die hergestellten Prototypen zeigen die Machbarkeit eines Trapezprofils aus Furnierschichtholz auf. Daher wurde, ausgehend von der in 5-1 Geometrie beschriebenen Querschnittsform, ein Berechnungsmodell aufgestellt. Mithilfe dieses Modells sollte es möglich sein, das Profil in seiner Form und seinen Abmessungen zu optimieren. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, mit dieser optimierten Form einen drei Meter langen Träger herzustellen. Dieser soll anschließend geprüft werden und die Ergebnisse mit denen aus dem Berechnungsmodell verglichen werden. Mit dem Berechnungsmodell können die Querschnittswerte, sowie die Durchbiegung, Normalspannungen, Schubspannungen und Schwingungen für unterschiedliche statische Systeme berechnet werden.

Die Berechnungen wurden mithilfe des Programms Excel durchgeführt.

6-1 QUERSCHNITTSBERECHNUNG

Die Querschnittsberechnung bildet die Grundlage für alle nachfolgenden Berechnungen. Bei der Berechnung wurde darauf Wert gelegt, alle Parameter der Querschnittsabmessungen ändern zu können. Dies hat den großen Vorteil, dass die Auswirkungen von Änderungen der Querschnittsgeometrie auf die Tragfähigkeit sofort erkennbar sind. Dadurch können unterschiedliche Geometrien einfach und schnell miteinander verglichen werden und ermöglicht so eine effiziente Optimierung des Querschnitts.

Für die Ermittlung der Querschnittswerte wurden die Werte für das Profil und jene der Deckplatte im ersten Schritt getrennt ermittelt sowie in weiterer Folge zusammengesetzt. Bei der Deckplatte ist es möglich, rechteckige Querschnitte mit mehreren Schichten einzugeben. So können mehrere Schichten mit unterschiedlicher Orientierung eingegeben werden. Hier ist es zum Beispiel möglich, neben Brettsperrholzplatten auch Furnierschichtholzplatten oder aber auch Platten, welche nicht aus Holz sind, einzugeben. In Abbildung 95 ist ein Beispielprofil mit den variablen Abmessungen dargestellt.

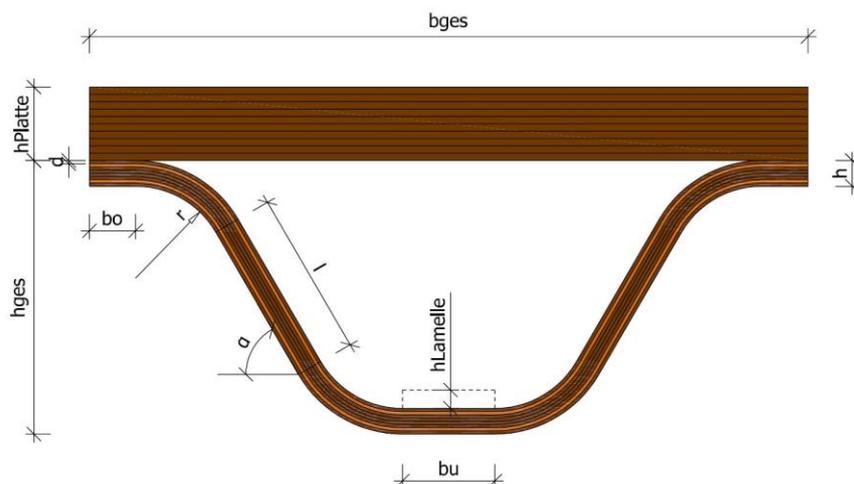


Abbildung 95: variable Querschnittsabmessungen für das Bauteil

Berechnet wurde der Querschnitt mithilfe des Gesamtquerschnittsverfahrens (n-Ziffern-Verfahren nach Fritz (1961) und Schelling (1968)). Dies ist nötig, da sich im Querschnitt unterschiedliche Materialien befinden. So kann die Platte beispielsweise aus einer Brettsperrholzplatte aus Fichte, das Profil aus Buche und eine unten aufgeklebte Lamelle aus einer höherwertigen Holzart bestehen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden alle Querschnittswerte auf einen äquivalent gewählten Querschnitt umgerechnet. In dieser Berechnung wird als Vergleichsmodul der E-Modul der Platte gewählt. Wird als Material für die Deckplatte Fichtenholz gewählt und das Profil besteht jedoch aus Buche, so wird das Profil auf einen fiktiven Fichtenquerschnitt umgerechnet. Vorausgesetzt wird dabei, dass keine gegenseitige Verschiebung zwischen der Deckplatte und dem Profil vorliegt. Zudem bleibt auch die Annahme vom Ebenbleiben des Querschnitts aufrecht.

Als n-Ziffer gilt das Verhältnis der E-Moduln, wie in folgender Formel dargestellt, als das Verhältnis des Vergleichsmoduls E_v zu den übrigen E-Moduln, hier mit E_i bezeichnet. Für die Berechnung könnte alternativ, wie dies in Schelling (1968) der Fall ist, mit dem Kehrwert des Verhältnisses gerechnet werden.

$$n = \frac{E_v}{E_i} \tag{6.1}$$

- n n-Ziffer [-]
- E_v Vergleichselastizitätsmodul [N/mm²]
- E_i Elastizitätsmodul des abweichenden Material vom Vergleichsmodul [N/mm²]

Da das Profil, wie auch die Deckplatte, aus Furnierschichtholz besteht und die Orientierung der Lagen variieren kann, wird auch darauf mit dem n-Ziffern-Verfahren Rücksicht genommen. Die Materialeigenschaften sind somit nicht nur zwischen Profil und Deckplatte unterschiedlich, sondern können auch in Profil oder Deckplatte selbst variieren. Bei dem Einbau einer Querlage (Faserrichtung der Schicht 90° zur Bauteillängsachse) verringert sich der E-Modul in Bauteillängsrichtung und reduziert damit die Biege-Steifigkeit des Bauteils.

Aus der Ermittlung der Querschnittswerte erhält man die zugehörige Biege- und Schubsteifigkeit des Querschnitts, sowie die Schwerpunkte des Gesamtquerschnitts und der Einzelquerschnitte. Zudem erhält man über die Multiplikation der Einzelflächen mit den zugehörigen Rohdichten, die Masse des modellierten Profils.

6-2 DURCHBIEGUNG

Im zweiten Schritt wurde für das Verbundbauteil die zu erwartende Durchbiegung berechnet.

Es wurden mehrere statische Systeme berechnet, um zu sehen, wie sich die Verformung des Profils in den unterschiedlichen Systemen verhält. In Abbildung 96 sind die betrachteten Tragsysteme ersichtlich.

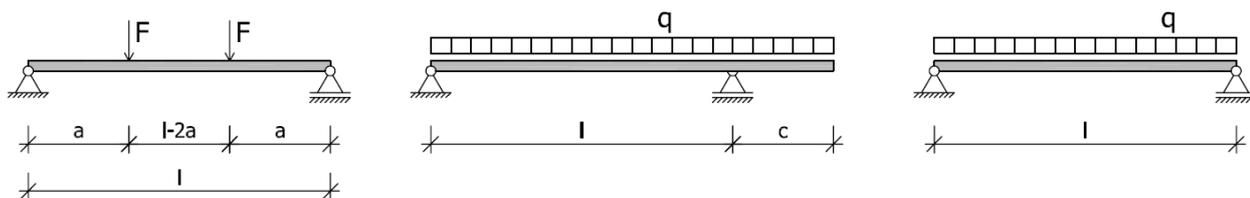


Abbildung 96: betrachtete Tragsysteme

Der Einfeldträger mit zwei Einzelkräften dient der Abschätzung für den 4-Punkt-Biegeversuch. Dieses Tragsystem wurde im Weiteren für die Wahl der Parameter herangezogen. Der Träger mit Auskrantung und der Einfeldträger mit Gleichlast dienen der Anschauung für spätere reale Bedingungen in der Praxis.

Die Formeln für die Durchbiegungen wurden mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kraftgrößen bestimmt. Berücksichtigt wurden dabei die Durchbiegungsanteile aus Moment und Querkraft. Für die Verformung aus dem Schubanteil (Querkraft) wurde näherungsweise der Steg des Trapezprofils berücksichtigt. A_{ef} ist dabei die effektive Stegfläche und G_{ef} ist der über die Flächen der Längs- und Querlagen gemittelte Schubmodul. Im Folgenden sind die Formeln zur Bestimmung der Verformung aufgelistet.

Durchbiegungen beim Einfeldträger mit zwei Kräften:

$$w_{Moment} = \frac{1}{24E_v I_{ef}} \cdot [3Fal^2 - 4Fa^3] \quad (6.2)$$

$$w_{Querkraft} = \frac{Fa}{G_{ef} A_{ef}} \quad (6.3)$$

Durchbiegungen beim Träger mit Auskrantung:

$$w_{Moment, Feld} = \frac{ql^2}{384E_v I_{ef}} \cdot [5Fl^2 - 12c^2] \quad (6.4)$$

$$w_{Querkraft, Feld} = \frac{ql^2}{8G_{ef} A_{ef}} \quad (6.5)$$

$$w_{Moment, Kragarmende} = \frac{qc}{24E_v I_{ef}} \cdot [c^2 \cdot (4l - 3c) - l^3] \quad (6.6)$$

$$w_{Querkraft, Kragarmende} = \frac{5qc^2}{8G_{ef} A_{ef}} \quad (6.7)$$

Durchbiegungen beim Einfeldträger mit Gleichlast:

$$w_{Moment} = \frac{5ql^4}{384E_v I_{ef}} \quad (6.8)$$

$$w_{Querkraft} = \frac{ql^2}{2G_{ef} A_{ef}} \quad (6.9)$$

w_i	einwirkungsbezogene Durchbiegung [mm]
E_v	Vergleichselastizitätsmodul [N/mm ²]
I_{ef}	auf Vergleichselastizitätsmodul bezogenes äquivalentes Trägheitsmoment [mm ⁴]
F	einwirkende Einzelkraft [N]
l, a, c	systembezogene Abmessungen [mm]
G_{ef}	Schubmodul des Steges [N/mm ²]
A_{ef}	Stegfläche [mm ²]

q Gleichlast [N/mm]

Für die Durchbiegungsbegrenzung wurde 1/250 gewählt. Wie man bei den späteren Parametervariationen sehen wird, kann dieser Wert jedoch kaum eingehalten werden, wenn es darum geht, die Festigkeiten des Trägers auszunützen.

6-3 NORMALSPANNUNGEN

Zu den verschiedenen Tragsystemen wurden die zugehörigen Normalspannungen errechnet. Die Normalspannung in Dickenrichtung errechnet sich wie folgt:

$$\sigma = \frac{M}{I_{ef}} \cdot z \cdot n \quad (6.10)$$

σ Biegenormalspannung [N/mm²]
 M Biegemoment [Nmm]
 I_{ef} auf Vergleichselastizitätsmodul bezogenes äquivalentes Trägheitsmoment [mm⁴]
 z Dickenkoordinate bezogen auf den Gesamtschwerpunkt des Querschnitts [mm]
 n n-Ziffer [-]

Der Nachweis für die Normalspannungen erfolgt über die maximale Randspannung. Für den unter Zug stehendem Rand bei einer Biegebelastung wurde der Nachweis der Randspannung mit der Zugfestigkeit des dort vorhandenen Materials geführt. Für den unter Druck stehenden Rand wurde die Druckfestigkeit des dort vorhandenen Materials für die Nachweisführung herangezogen. Der Berechnung und der Nachweise wurden, im Hinblick auf die später durchgeführte Biegeprüfung, die Mittelwerte der Festigkeiten zugrunde gelegt. Die verwendeten Mittelwerte finden sich unter 6-6 Variation der Eingangsparameter.

$$\frac{\sigma_{m,Rand,Zug}}{f_{t,mean}} \leq 1,0 \quad (6.11)$$

$\sigma_{m,Rand,Zug}$ Randnormalspannung in der Zugzone [N/mm²]
 $f_{m,mean}$ Mittelwert der Zugfestigkeit [N/mm²]

$$\frac{\sigma_{m,Rand,Druck}}{f_{c,mean}} \leq 1,0 \quad (6.12)$$

$\sigma_{m,Rand}$ Randnormalspannung in der Druckzone [N/mm²]
 $f_{c,mean}$ Mittelwert der Druckfestigkeit [N/mm²]

Berechnet wurden alle Punkte zwischen den vorhandenen Schichten der Platte, sowie die Spannungen für das obere und untere Ende des Profils. Dazwischen wurde ein linearer Normalspannungsverlauf angenommen. In Abbildung 97 ist beispielhaft ein berechneter Normalspannungsverlauf für ein Profil mit einer Deckplatte aus dreischichtigem Brettspertholz ersichtlich. Links in der Abbildung befindet sich der in Excel grafisch modellierte Querschnitt, der zur Anschauung und Kontrolle plausibler Abmessungen und Geometrien dient.

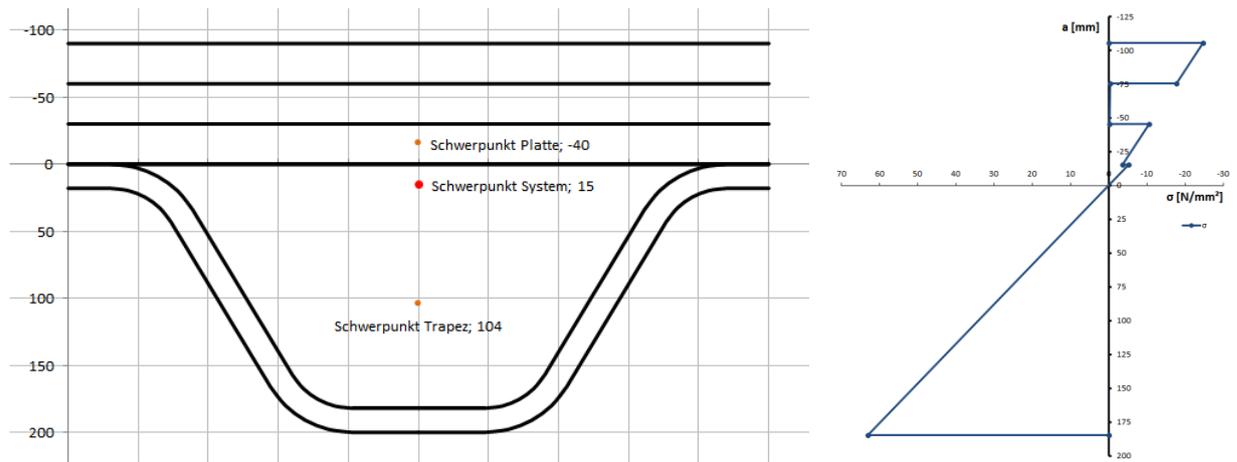


Abbildung 97: Querschnittsdarstellung aus Excel und zugehöriger Normalspannungsverlauf

6-4 SCHUBSPANNUNGEN

Durch die Belastung am Träger werden Biegemomente hervorgerufen. Sind diese nicht konstant über die Länge des Bauteils, so treten Querkräfte auf. Diese entsprechen den Schubspannungen im Querschnitt.

Vor Beginn der Schubspannungsberechnung galt es, den Schubfluss im Querschnitt zu bestimmen. Dieser ist für das geschlossene Profil in Abbildung 98 ersichtlich. Mit Hilfe der für einen ebenen Querschnitt geltenden Formel für die Schubspannungsverteilung wurden die Spannungen in den in Abbildung 98 vermerkten Punkten am Querschnitt ermittelt. Aufgrund des symmetrischen Querschnitts wird die angreifende Querkraft für eine betrachtete Hälfte halbiert.

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_z \cdot S_y \cdot n}{I_{ef} \cdot b} \quad (6.13)$$

- τ Schubspannung im Querschnitt [N/mm²]
- V_z Querkraft [N]
- S_y statisches Moment [mm³]
- n n-Ziffer
- I_{ef} auf Vergleichselastizitätsmodul bezogenes äquivalentes Trägheitsmoment [mm⁴]
- b Profilbreite in Richtung des Schubflusses [mm]

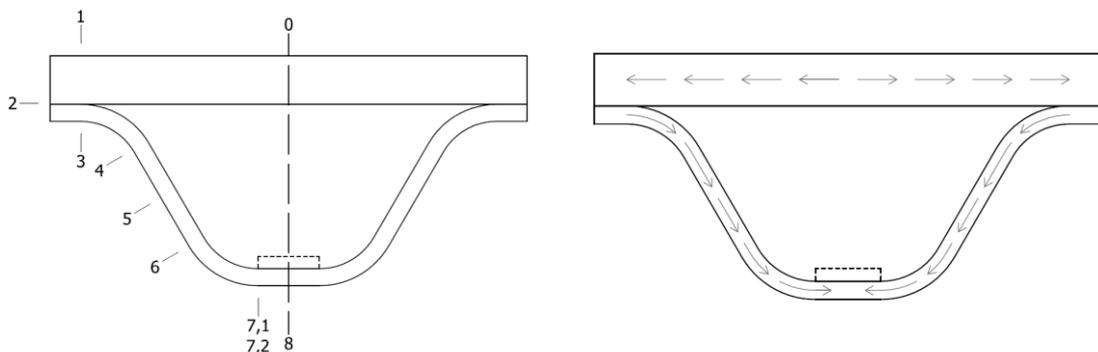


Abbildung 98: Punkte in denen die Schubspannung ermittelt wurde und Schubfluss

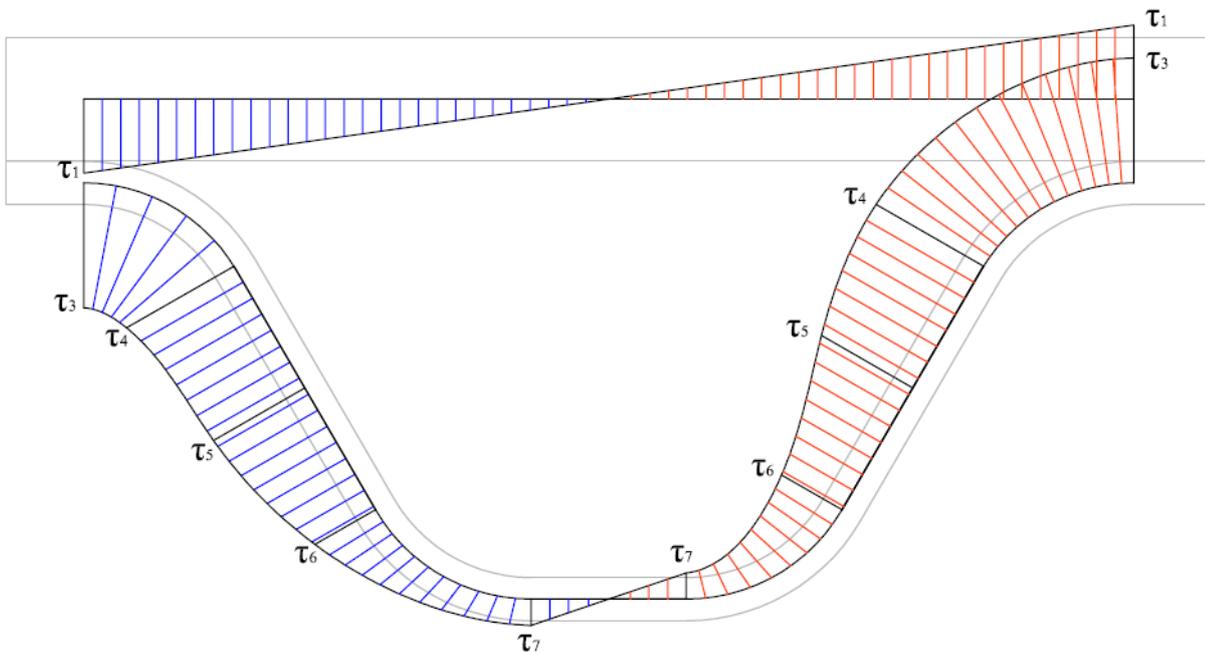


Abbildung 99: qualitativer Schubspannungsverlauf

Für den Nachweis der Schubspannungen wurden die Mittelwerte der Schubspannungsfestigkeiten verwendet. Die verwendeten Mittelwerte finden sich unter 6-6 Variation der Eingangsparameter.

In der Klebefuge zwischen Profil und Platte treten Schubspannungen auf, welche die Klebefuge in der Lage sein muss zu übertragen. In Abbildung 98 links ist Punkt 2 ersichtlich, der den Kontakt zwischen Platte und Profil darstellt. Der Schubspannungsnachweis wurde hier, um die Kraftübertragung zu gewährleisten, mit den Schubkennwerten der Platte und jenen des Profils geführt. Sollte dieser Nachweis nicht erfüllt sein, so ist die Kontaktfläche zwischen Platte und Profil zu vergrößern oder es sind Holzarten mit höheren Schubfestigkeiten zu verwenden.

6-5 SCHWINGUNGEN

Die Schwingungsberechnung wurde nach Hamm, Richter (2009) durchgeführt. Die Eigenfrequenz der Decke soll so hoch sein, dass Resonanz, welche aus dem Gehen resultiert, unter ständigen Einwirkungen vermieden wird. Die Grenzwerte sind in Abbildung 103 abhängig von der Einbaulage ersichtlich.

6-5.1 FREQUENZKRITERIUM

Folgendes Frequenzkriterium sollte für die Decke erfüllt sein:

$$f_e \geq f_{\text{grenz}} \quad (6.14)$$

f_e Eigenfrequenz [Hz]

f_{grenz} Grenzwert des Frequenzkriteriums [Hz]

Das Frequenzkriterium liegt dabei laut Abbildung 103 für Bewertung 1,0 bis 1,5 (z. B. Flure mit kurzen Spannweiten oder Decken in Büros) bei 8 Hz und für Bewertung 1,5 bis 2,5 (z. B. Decken in Einfamilienhäusern) bei 6 Hz.

Für Einfeldträger (Abbildung 100) kann die Eigenfrequenz wie folgt ermittelt werden:

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = f_{\text{Balken}} \quad (6.15)$$

$f_{e,1}$	Eigenfrequenz [Hz]
l	Spannweite des Einfeldträgers [m]
E	Elastizitätsmodul [N/m ²]
I	Trägheitsmoment [m ⁴]
m	Masse des Systems [kg/m ²]
f_{Balken}	Eigenfrequenz des Balkens [Hz]

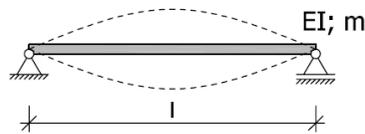


Abbildung 100: Schwingungen in der ersten Eigenform am Einfeldträger (Hamm, Richter; 2009)

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist eine genauere Untersuchung nach (Hamm, Richter; 2009) durchzuführen. Wenn ja, kann mit der Überprüfung des Steifigkeitskriteriums fortgefahren werden.

6-5.2 GENAUERE UNTERSUCHUNG

Bei Decken mit großen Spannweiten kann es durchaus vorkommen, dass das Frequenzkriterium nicht eingehalten wird. Ist dies der Fall, so müssen Mindestfrequenzen eingehalten werden und zusätzlich muss die Schwingungsbeschleunigung begrenzt werden. Die Mindestfrequenz f_{\min} beträgt 4,5 Hz.

$$f_{\min} \leq f_e < f_{\text{grenz}} \quad (6.16)$$

f_e	Mindestfrequenz [Hz]
f_e	Eigenfrequenz [Hz]
f_{grenz}	Grenzwert des Frequenzkriteriums [Hz]

Ist diese Bedingung erfüllt, ist eine Überprüfung der Schwingungsbeschleunigung notwendig, wobei dieser Nachweis in der Regel nur bei sehr schweren Decken zum Erfolg führt.

$$a \leq a_{\text{grenz}} \quad (6.17)$$

a	Schwingungsbeschleunigung infolge einer gehenden Person [m/s ²]
a_{grenz}	Grenzwert der Schwingungsbeschleunigung [m/s ²]

Die Grenzwerte der Schwingungsbeschleunigung a_{grenz} sind in Abbildung 103 vermerkt und betragen für die Bewertung von 1,0 bis 1,5, 0,05 m/s² und für die Bewertung 1,5 bis 2,5, 0,10 m/s². Der mit diesen Werten zu überprüfende Wert der Schwingungsbeschleunigung stellt die Beschleunigung infolge einer gehenden Person dar, wobei die anzusetzende dynamische Kraft von der Eigenfrequenz der Decke abhängt (siehe Abbildung 101).

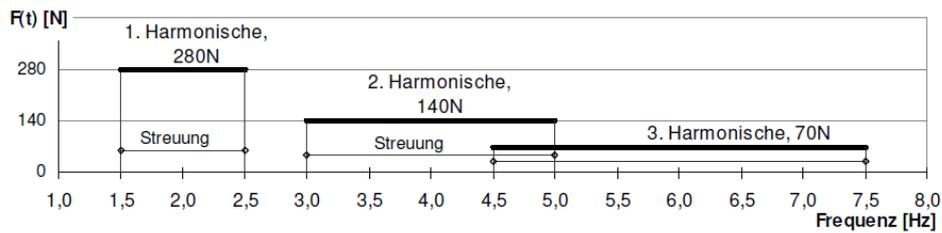


Abbildung 101: Zusammenhang Frequenz und abgegebene Kraft beim Gehen (Hamm, Richter; 2009)

Die Formel zur Berechnung von a lautet wie folgt:

$$a = \frac{F_{dyn}}{M^* \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t)}{m \cdot 0,5l \cdot 0,5b \cdot 2D} \quad (6.18)$$

- a Schwingungsbeschleunigung infolge einer gehenden Person [m/s^2]
- F_{dyn} einwirkende zeit- und ortsveränderliche Kraft [N]
- M^* mitschwingende Masse [kg]
- D Dämpfung, Lehr'sches Dämpfungsmaß [-]
- $F(t)$ abgegebene Kraft beim Gehen [N]
- m Masse des Systems [kg/m^2]
- l Spannweite des Einfeldträgers [m]
- b mitschwingende Breite des Deckenfeldes [m]

Die Kraft F_{dyn} berechnet sich aus 40 % der Kraft $F(t)$, wobei mit dem Faktor 0,4 die wechselnde Einwirkungsstelle und begrenzte Einwirkungsdauer berücksichtigt wird.

Ist die Grenzbedingung erfüllt, so kann mit der Überprüfung des Steifigkeitskriteriums fortgefahren werden.

6-5.3 STEIFIGKEITSKRITERIUM

Wenn der Grenzwert des Frequenzkriteriums eingehalten wurde bzw. bei nicht Einhaltung die genauere Untersuchung positiv verlaufen ist, so geht es an die Überprüfung des Steifigkeitskriteriums. Es ist ebenso wichtig einzustufen wie das Frequenzkriterium. Hierbei sollte die Steifigkeit so hoch sein, dass bei einer Kraft von 2 kN in Feldmitte des Einfeldträgers, die Durchbiegung den folgenden Grenzwert nicht übersteigt. Dieser Grenzwert hängt wiederum von der gewählten Bewertung aus den Lagebedingungen ab. Für einen erfolgreichen Nachweis muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$w_{(2kN)} \leq w_{grenz} \quad (6.19)$$

- $w_{(2kN)}$ Durchbiegung unter einer Kraft von 2 kN in Feldmitte [mm]
- w_{grenz} Grenzwert des Steifigkeitskriteriums [mm]

Die Grenzwerte aus Abbildung 103 betragen für die Bewertung von 1,0 bis 1,5, 0,5 mm Durchbiegung und für die Bewertung 1,5 bis 2,5 ist 1 mm Durchbiegung bei einer Kraft von 2 kN erlaubt.

Bei Erfüllung des Frequenz- und Steifigkeitskriteriums sind zusätzlich die konstruktiven Anforderungen des weiteren Ausbaus der Decke zu untersuchen, ehe der Nachweis endgültig erfüllt ist.

Der Ablauf für die Durchführung des Schwingungsnachweises nach Hamm, Richter (2009) ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 102 nochmals zusammenfassend dargestellt.

Alle zuvor angeführten Nachweise wurden für den im Nachfolgenden unter 6-6 Variation der Eingangsparameter optimierten Querschnitt geführt und sind unter 6-6.3 Ergebnis dargestellt.

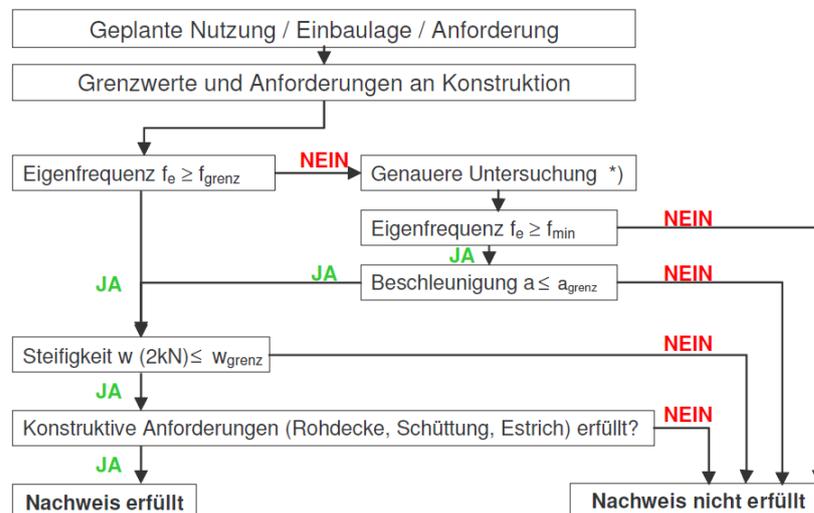


Abbildung 102: Ablaufdiagramm zur Nachweisführung für Schwingungen (Hamm, Richter; 2009)

Einbaulage	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit	Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten
Bewertung	(Bewertung 1,0 bis 1,5)	(Bewertung 1,5 bis 2,5)	(Bewertung 2,5 bis 4,0)
Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Raumnutzung	z.B. Flure mit kurzen Spannweiten z.B. für Nutzungen als Wohnungstrenndecken in Mehrfamilienhäusern, Decken in Büros mit PC-Nutzung oder Besprechungsräumen	z.B. Decken in üblichen Einfamilienhäusern, Decken im Bestand, oder mit Zustimmung des Bauherrn	z.B. Decken unter nicht genutzten Räumen oder nicht ausgebauten Dachräumen
Beschreibung der des Schwingungsverhaltens	Schwingungen werden gar nicht oder nur gering spürbar, wenn man sich darauf konzentriert und nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar, jedoch nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar bis deutlich spürbar, unangenehm und auch teilweise störend empfunden.
Frequenzkriterium	$f_e \geq f_{grenz}$ $f_{grenz} = 8 \text{ Hz}$	$f_e \geq f_{grenz}$ $f_{grenz} = 6 \text{ Hz}$	-
Steifigkeitskriterium	$w(2kN) \leq w_{grenz}$ $w_{grenz} = 0,5 \text{ mm}$	$w(2kN) \leq w_{grenz}$ $w_{grenz} = 1,0 \text{ mm}$	-
Genauere Untersuchung nur, wenn	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,10 \text{ m/s}^2$	-
Konstruktive Anforderungen	Anordnung von schwimmendem Nass- oder Trockenestrich auf Schüttung nach Tabelle 4 und Abschnitt 2.2.2	-	-

Abbildung 103: Grenzwerte abhängig von subjektiven Bewertungen und Nutzung bzw. Einbaulage (Hamm, Richter; 2009)

6-6 VARIATION DER EINGANGSPARAMETER

Für das drei Meter lange Profil wurden mithilfe der Excel Berechnung die optimalen Abmessungen gesucht. Im Vorhinein legte man sich auf das Tragsystem 4-Punkt-Biegeversuch fest. Mit diesem wurden die Kräfte und Spannungen ausgerechnet und anschließend die Nachweise geführt.

6-6.1 MATERIAL

6-6.1.1 Deckplatte

Für die Deckplatte wurde eine 4 cm starke Platte aus BauBuche (siehe Abbildung 104) laut der Leistungserklärung der Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH (2014a) herangezogen. Gewählt wurde eine Platte aus Buchen-Furnierschichtholz längslagig. Die 4 cm starke Platte besteht aus 12 längsorientierten Schichten Buchenfurnier. Alternativ gäbe es noch eine Variante mit Querlagen.



Abbildung 104: Platte BauBuche (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH; 2014b)

In Tabelle 7 sind die Festigkeitskennwerte der Platte ersichtlich. Die Steifigkeitskennwerte wurden direkt aus dieser Tabelle übernommen. Der Vergleichsmodul der Berechnung bezieht sich immer auf den E-Modul der Deckplatte. In diesem Fall ist der E-Modul 16800 N/mm².

Tabelle 7: Festigkeitskennwerte der Platte aus BauBuche in N/mm² und Rohdichten in kg/m³ (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH; 2014b)

Art der Beanspruchung	BauBuche S Furnierschichtholz Buchen-FSH längslagig	BauBuche Q Furnierschichtholz Buchen-FSH querlagig
Nennstärke in mm	20 ≤ B ≤ 80	20 ≤ B ≤ 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 ^{al} $f_{m,0,k}$	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

Für die Führung der Nachweise wurden die charakteristischen Festigkeitskennwerte der BauBuche auf Mittelwerte hochgerechnet. Die Berechnung erfolgte nach ÖNORM EN 14358 (2007) „Holzbauwerke – Berechnung der 5 %-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben“.

Der charakteristische Wert ist wie folgt definiert:

$$m_k = e^{(\bar{Y} - k_s \cdot s_y)} \quad (6.20)$$

- m_k charakteristischer Wert
- \bar{Y} Mittelwert
- k_s Faktor zur Berücksichtigung der Prüfkörperanzahl
- s_y Standardabweichung

Für den Faktor k_s wurde in der Berechnung eine unendliche Prüfkörperanzahl angenommen. Nach Tabelle 8 folgt k_s daher mit 1,65.

Tabelle 8: Faktor k_s zur Berücksichtigung der Prüfkörperanzahl (ÖNORM EN 14358; 2007)

Anzahl der Prüfkörper n	Faktor k_s
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,76
500	1,71
∞	1,65

Die Standardabweichung ist durch folgende Formel bestimmt:

$$s_y = \text{VarK} \cdot \bar{Y} \quad (6.21)$$

- s_y Standardabweichung
- VarK Variationskoeffizient
- \bar{Y} Mittelwert

Durch Einsetzen der Standardabweichung in die Formel für den charakteristischen Wert, kann der Mittelwert berechnet werden. Über die Mittelwertformel erhält man dann den gewünschten Prüfwert:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (6.22)$$

- \bar{Y} Mittelwert
- n Anzahl der Prüfergebnisse
- m_i Prüfergebnis

Für die Ermittlung der Werte wurde ein Variationskoeffizient von 7 % angesetzt. In den nachfolgenden Tabellen sind die ermittelten Werte ersichtlich.

Tabelle 9: ermittelte Mittelwerte für die BauBuche S (nur längsorientierte Schichten) in N/mm²

BauBuche S	$f_{t,0}$	$f_{c,0}$	$f_{m,0,flat}$	$f_{m,0,edge}$	$f_{v,0,flat}$	$f_{v,0,edge}$
charakteristisch	60,0	41,6	65,0	70,0	8,0	8,0
mean	102,4	67,7	112,1	121,9	10,5	10,5

Tabelle 10: ermittelte mean Werte für die BauBuche Q (mit querorientierten Schichten) in N/mm²

BauBuche Q	$f_{t,0}$	$f_{c,0}$	$f_{m,0,flat}$	$f_{m,0,edge}$	$f_{v,0,flat}$	$f_{v,0,edge}$
charakteristisch	40,0	24,2	45,0	60,0	3,3	9,0
mean	64,8	36,7	74,0	102,4	3,9	12,0

6-6.1.2 Profil

Für die Berechnung des Profils wurde die Holzart Buche verwendet. Als Furniere für den Querschnitt wurden 1,5 mm starke Schäl furniere aus Buche gewählt.

Die Werte für die Steifigkeitskennwerte wurden aus Kollmann (1955) entnommen. Für die Buche beträgt der E-Modul in Längsrichtung 16000 N/mm² und in Querrichtung 1500 N/mm². Der Schubmodul wurde für die längs liegenden Schichten mit 1360 N/mm² und für die Querlagen mit 344 N/mm² angesetzt.

Als Festigkeitswerte wurden die ermittelten Mittelwerte der BauBuche Q (mit Querlagen) aus Tabelle 10 herangezogen. Damit war es möglich, den Einfluss der Querlagen auf den geschichteten Querschnitt besser zu erfassen.

Als Variation können in der Querschnittsberechnung noch andere Holzarten gewählt werden. Voraussetzungen sind die Kenntnis der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Holzart.

6-6.2 GEOMETRIE

Für die Wahl der Geometrie wurden die variablen Eingangsparameter (siehe Abbildung 105) variiert, um zu sehen, wie sich die Querschnittseigenschaften des Profils dabei verändern.

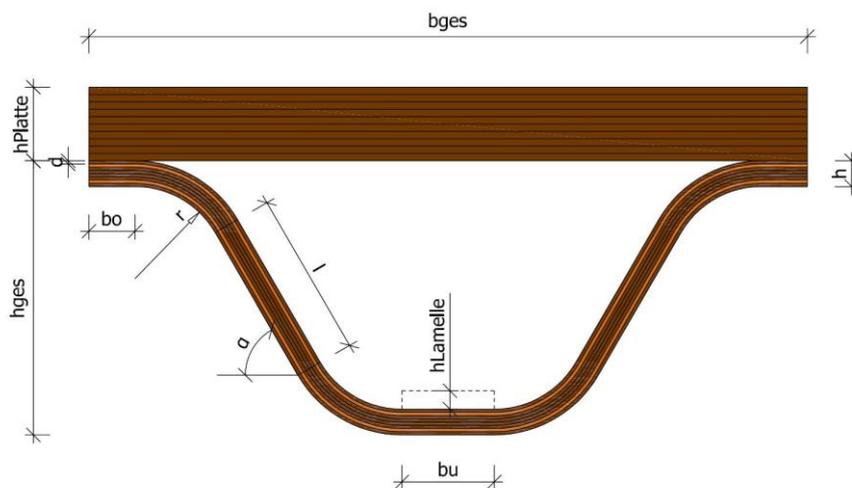


Abbildung 105: variable Querschnittsabmessungen für das Bauteil

6-6.2.1 Profilaufbau

Für den Aufbau des Profils wurden, wie bereits zuvor erwähnt, 1,5 mm dicke Buchenschäl furniere verwendet. Die Dicke des Furnierschichtholzes, aus dem das Profil besteht, beträgt 16,5 mm. Dieser Wert ergibt sich aus der Anzahl der Lagen multipliziert mit den Einzelfurnierdicken. Gewählt wurden 11 Lagen. Durch die ungerade Anzahl an Schichten ist es stets möglich die Schichten, in Dickenrichtung, symmetrisch anzuordnen. Des Weiteren werden nicht mehr Lagen angenommen, da ansonsten, aufgrund der sich ergebenden großen Klebeflächen, Probleme beim Klebstoffauftrag zu erwarten sind. Dies ist dem händischen Auftragen des Klebstoffs geschuldet. Bei zu großen Flächen kann es geschehen, dass durch das händische Auftragen die Verarbeitungszeit des Klebstoffes überschritten wird.

Um dem Rückstelleffekt entgegenzuwirken und um das Holz zu „sperren“, werden Querlagen angeordnet. Für dieses Profil werden die Querlagen in den Schichten zwei und zehn platziert. Durch die symmetrische Anordnung der Querlagen in randnahen Schichten wird mit einem größtmöglichen Widerstand gegen das Rückstellen des Profils gerechnet (Untersuchungen dazu siehe Kapitel 9: Rückstelleffekt).

6-6.2.2 Abmessungen

Man konnte sofort erkennen, dass ein breiteres und höheres Profil die Biegesteifigkeit des Querschnitts wesentlich erhöht. Daher wurde eine Breite von 50 cm gewählt, um dann die anderen Parameter variieren zu können. Für die Breite der Klebefuge, also der Länge der Verbindung im Querschnitt (b_0 in Abbildung 105) zwischen Deckplatte und Profil, wurden 40 mm gewählt. Durch diese Festlegung ist, wenn Biegeradius und Winkel gleich bleiben, nur mehr die Höhe des Profils und daraus folgend die Länge des unteren Steges variabel. Beim Variieren der Höhe konnte erkannt werden, dass der Steifigkeitsnachweis beim Schwingungsnachweis bei einer Höhe des Profils von unter 200 mm, mit einer Deckplatte aus BauBuche mit 4 cm Höhe, nicht mehr erfüllt wurde. Daher ist dies die kleinste Höhe, welche durchführbar wäre. Aus diesem Grund, aber auch um eine gute Tragfähigkeit zu erreichen wurden für die Höhe 200 mm gewählt. Dadurch ergab sich eine Gesamthöhe inklusive Deckplatte von 24 cm.

6-6.2.3 Biegeradius

Der Biegeradius wurde nach der ersten Querschnittsbemessung mit 50 mm festgelegt. Dies ging aus den bereits unter 4-3.2 untersuchten Biegeradien hervor. Laut Kossatz, Klieber (1955) können 1,6 mm dicke Rotbuchsäl furniere bei einer Holzfeuchte zwischen 7 % und 12 % mit einem Biegeradius von 55 mm umgeformt werden. Auch ging aus der Herstellung der Prototypen hervor, dass die 1,5 mm dicken Furniere mit einem Radius von 50 mm problemlos gebogen werden können.

Je kleiner der Radius gewählt wird, desto höher ist die Biegesteifigkeit des Querschnitts, da durch einen kleineren Radius der Anteil des unteren Steges (bei gleichbleibender Profilbreite und gleichbleibender Kontaktfläche zur Deckplatte) vergrößert wird. Werden für alle Schichten (Quer- und Längslagen) gleich starke Furniere der gleichen Holzart verwendet, so ist der Biegeradius der Querlagen, die normal zur Faser gebogen werden, maßgebend (siehe 4-3.1 Definition der Biegerichtung).

6-6.2.4 Winkel

Beim Steigungswinkel (α in Abbildung 105) gilt: je steiler desto besser, da sich, bei gleichbleibender Breite des Gesamtquerschnitts und bei gleichbleibender Breite der Kontaktflächen zur Deckplatte, der Anteil des unteren Flansches vergrößert und sich daher auch die Biegesteifigkeit des Querschnitts erhöht.

Allerdings ist der limitierende Punkt beim Winkel der Pressdruck. Da das Profil mit Hilfe von Matrize und Patrize gepresst wird, nimmt der Pressdruck bei geneigten Flächen gegenüber der Horizontalen ab.

In Abbildung 106 sind unterschiedliche Pressdrücke am Beispiel einer halbrunden Form, welche unterschiedliche Winkel abbildet, dargestellt. Beträgt der Winkel des zu pressenden Profils 60° , so herrscht an dieser Stelle nur mehr der halbe Pressdruck ($\cos(60) = 0,5$).

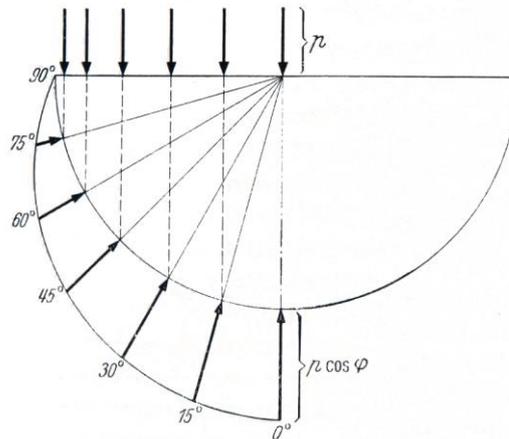


Abbildung 106: Diagramm bei Anwendung senkrechten Drucks auf eine halbrunde Form (Kollmann; 1955)

Aus diesem Grund wurde der Steigungswinkel α mit 60° fixiert, um den benötigten Pressdruck gewährleisten zu können. Bei Verwendung von Melaminharzkleber als Klebstoff wird laut technischem Merkblatt von Dynea AS (2012) ein erforderlicher Pressdruck für Weichholz zwischen $0,7$ und $1,0$ N/mm² und für Hartholz zwischen $0,8$ und $1,2$ N/mm² angegeben.

6-6.3 ERGEBNIS

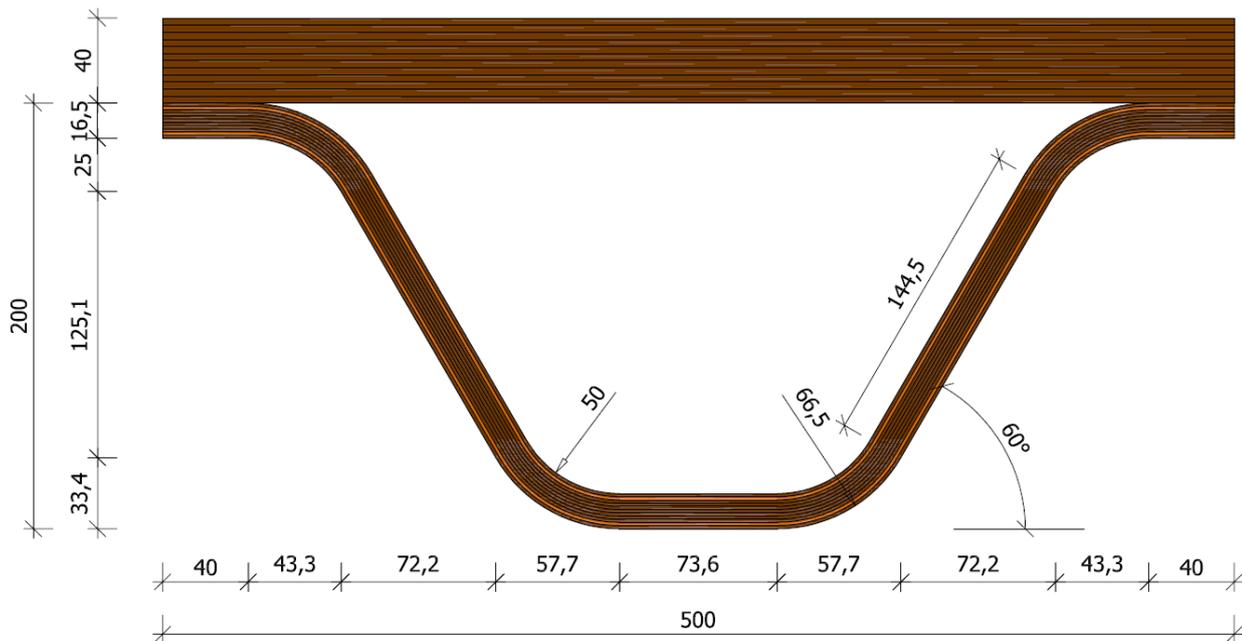


Abbildung 107: gewählte Querschnittsform nach erster Parametervariation

In Abbildung 107 ist das optimierte Profil dargestellt. Es besteht aus 11 Schichten Buchenschäl furnieren mit einer Dicke von 1,5 mm. Die zweite und zehnte Lage wird als Querlage ausgeführt. Durch die

Berechnung des Profils ergeben sich folgende Werte und Nachweise aufgrund des 4-Punkt-Biegeversuchs. Die Spannweiten des 4-Punkt-Biegeversuchs sind in Abbildung 108 abgebildet.

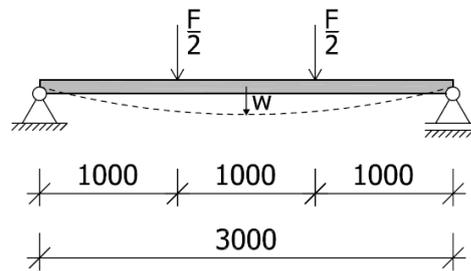


Abbildung 108: Betrachtetes statisches System mit zugehörigen Abmessungen

In Tabelle 11 sind die verwendeten Festigkeitskennwerte, welche in 6-6.1 Material ermittelt wurden, dargestellt.

Tabelle 11: gewählte Festigkeiten für die Nachweisführung

Festigkeiten	
Biegenachweis	
$f_{c,0,mean}$	67,7 [N/mm ²]
$f_{t,0,mean}$	64,8 [N/mm ²]
Schubnachweis	
$f_{v,0,mean,Trapez}$	12,0 [N/mm ²]
Schubnachweis in Klebefuge	
$f_{v,mean,Platte}$	10,5 [N/mm ²]
$f_{v,mean,Profil}$	3,9 [N/mm ²]
Ermittlung der Festigkeitswerte siehe Tabelle 9 und Tabelle 10	

Durch die Berechnung des Querschnitts und Einsetzen der Festigkeitskennwerte wurden die Tabelle 12 dargestellten Querschnittswerte ermittelt und Nachweise geführt:

Tabelle 12: Zusammenfassung der berechneten Querschnittswerte und Nachweise des gewählten Profils

Querschnittswerte		
E_v	16.800 [N/mm]	
I_{ef}	$1,35 \cdot 10^8$ [mm ⁴]	
EI	$2,26 \cdot 10^{12}$ [N/mm ²]	
m	22,96 [kg/m]	
Nachweise		
Gesamtlast	100,15 [kN]	
Durchbiegung	30,14 [mm]	
Biegung	1,00 [-]	ERFÜLLT
Schub	0,35 [-]	ERFÜLLT
Schub in Klebefuge	0,44 [-]	ERFÜLLT
Schwingung		
Frequenzkriterium	54,79 [Hz]	> 8 Hz ERFÜLLT
Steifigkeitskriterium	0,50 [mm]	< 0,50 mm ERFÜLLT

In Abbildung 109 ist das optimierte Profil mit dem bereits vorhandenem gegenübergestellt. Das grauschraffierte Profil ist dabei jenes, welches für die Herstellung der Prototypen herangezogen wurde. Hierbei können die größeren Abmessungen des optimierten Querschnitts erkannt werden.

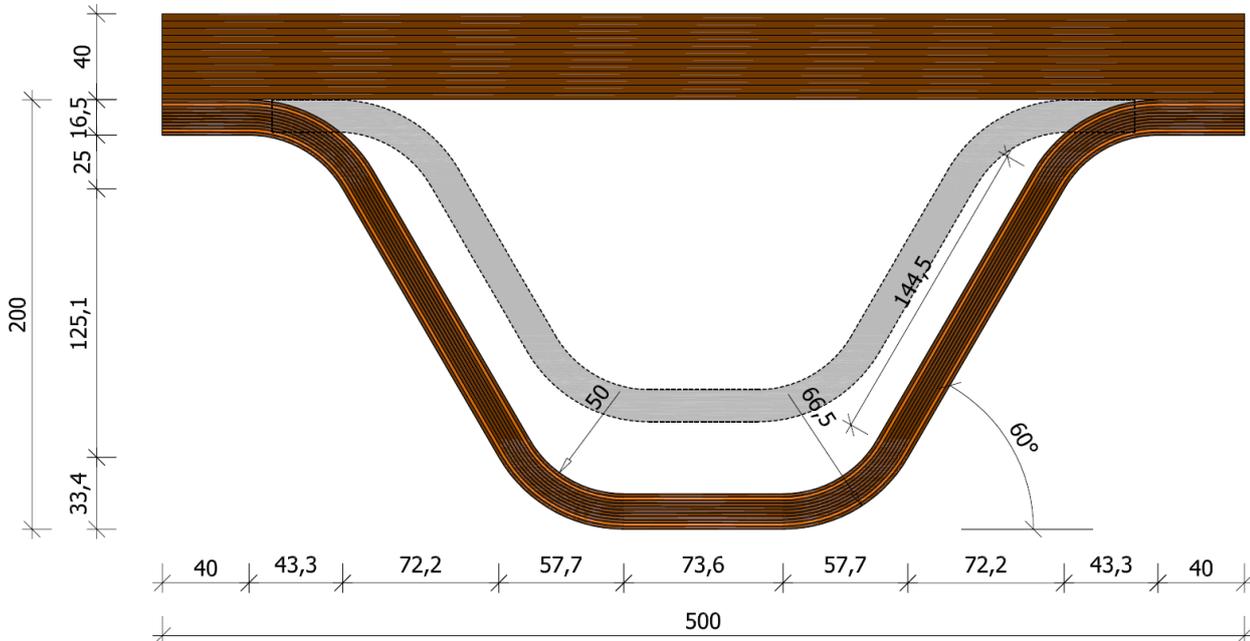


Abbildung 109: Gegenüberstellung des optimiertem mit dem bereits vorhandenem Profil

6-7 VERGLEICH DER EINGABEVARIATIONEN

Abbildung 110 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Querschnittsabmessungen. Mithilfe des Berechnungsmodells wurden die Geometrieparameter variiert um verschiedene Profile miteinander vergleichen zu können. Alle Profile mit Deckplatte bestehen aus dem jeweiligen Profil sowie einer 4 cm starken längslagigen Platte aus BauBuche S. Die Abmessungen der Profile sind mit einer Breite von 50 cm und einer Höhe von 20 cm bei allen Profilen gleich.

Im blau eingerahmten Bereich finden sich zwei U-Profile, welche aufgrund ihrer höheren unteren Flanschfläche eine, im Vergleich zu den anderen Profiltypen, höhere Biegesteifigkeit aufweisen. Um die U-Profile zu modellieren wurde im Berechnungsmodell der Stegwinkel auf 90° gesetzt. Variiert wurde bei den U-Profilen zusätzlich der Radius.

Bei den mittig dargestellten Trapezprofilen wurden der Biegeradius, Stegwinkel und der Einsatz einer Lamelle variiert. Das für den Biegeprüfkörper gewählte Profil (in Abbildung 110 mit 60° $r = 50$ gekennzeichnet) könnte mit einer zusätzlichen Lamelle eine höhere Biegesteifigkeit erreichen. Wird jedoch das Profil ohne Deckplatte simuliert (60° $r = 50$ ohne Platte) so sieht man einen starken Abfall der Biegesteifigkeit.

Im roten eingerahmten Bereich sind zum Vergleich zwei Brettsperrholzplatten dargestellt. Die Biegesteifigkeit der fünfschichtigen BSP-Platte kann mit dem Profil annähernd erreicht werden. Dennoch sieht man im Diagramm die größere Querschnittsfläche, welche einen erhöhten Holzbedarf darstellt, bei den BSP-Elementen im Vergleich zu den UHP-Leichtbauprofilen in Kombination mit einer Deckplatte aus einer 4 cm starken BauBuchenplatte.

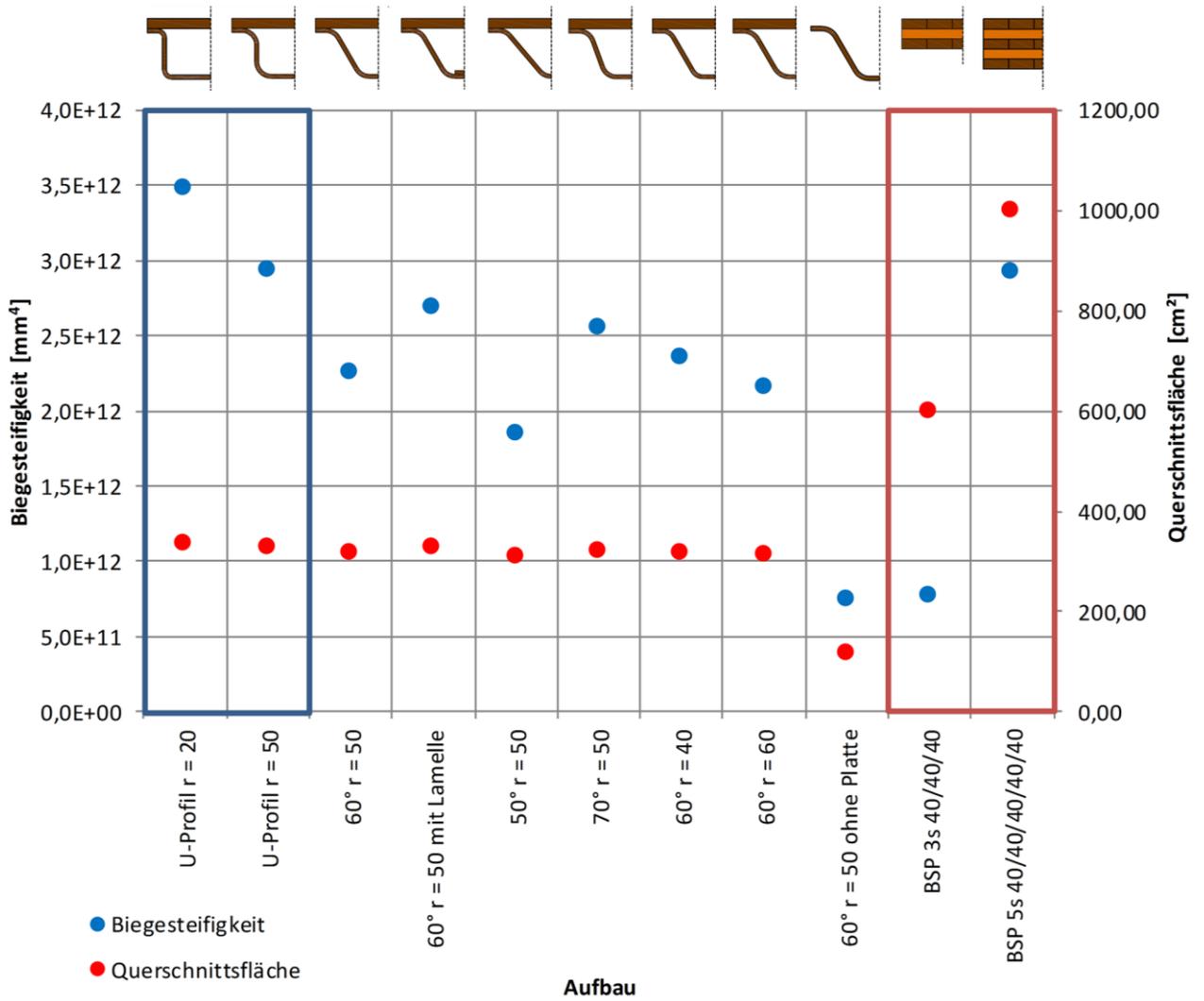


Abbildung 110: Vergleich der Eingabevariationen

KAPITEL 7: HERSTELLUNG BIEGEPRÜFKÖRPER

Die Herstellung des Biegeprüfkörpers erfolgte mit der in 6-6.3 optimierten Geometrie des Profils. Bevor das Leichtbauprofil gepresst werden konnte, musste eine Pressform, bestehend aus Matrize und Patrize, hergestellt werden. Nach dem Fertigen dieser Form konnte mit dem Formpressen des Profils in einer Furnierpresse begonnen werden.

7-1 HERSTELLUNG FORM

Für das Formpressen entschied man sich, das Profil mittels zweier Formen in einer Furnierpresse zu fertigen. Dafür wurden für die Form eine Matrize und Patrize benötigt. Diese wurden aus mehreren Bauteilen zusammengesetzt (siehe Abbildung 111). Als Grundgerüst dienten 27 mm starke, in Form gefräste Schichtholzplatten aus Fichte (Dreischichtplatten). Auf dieses Grundgerüst wurde ein Belag aus 25 mm dicken Eschenbrettern bzw. Leisten aufgeschraubt. Dieser Belag wurde noch abgeschliffen, um eine ebene Fläche, sowie gleichmäßige Rundungen zu erhalten. Den Abschluss bildete eine 5 mm dicke Biegesperrholzplatte, die an die Eschenbretter angeglichen und aufgeschraubt wurde.

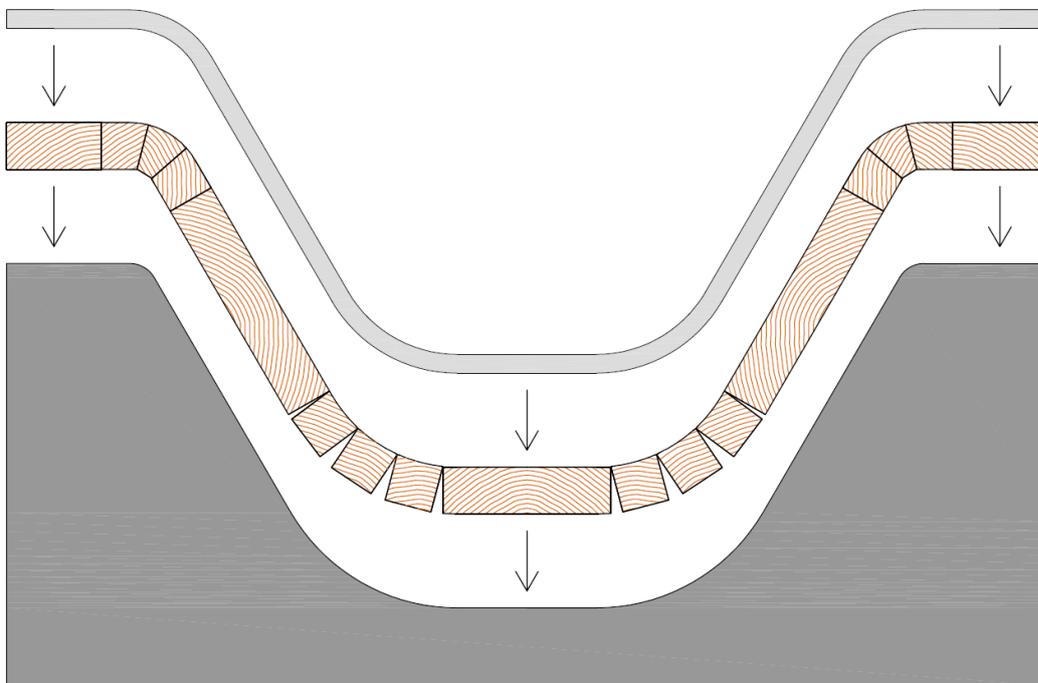


Abbildung 111: Bauablauf Matrize im Querschnitt

Die Bemessung der Form erfolgte vereinfacht und konservativ an einem Einfeldträger. Mit der Berechnung sollte der notwendige Abstand des Grundgerüsts ermittelt werden. Zudem sollte die Tragfähigkeit der Eschenleisten überprüft werden.

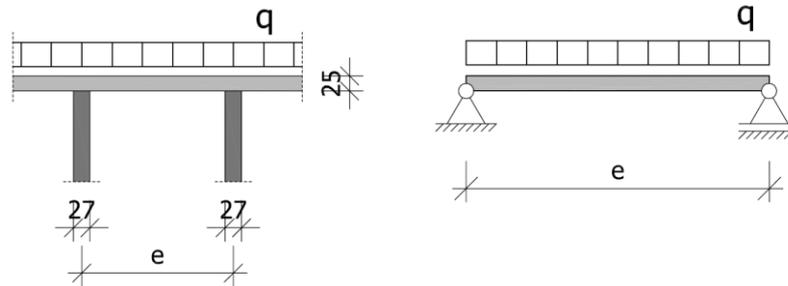


Abbildung 112: Ermittlung des Plattenabstands

Für die Ermittlung des Abstands der gefrästen 27 mm starken Fichtenplatten, wurde vereinfacht ein Einfeldträger angenommen (Abbildung 112). Maßgebend für den Achsabstand e ist dabei eine 25 x 25 mm starke Eschenleiste, die an den Fichtenplatten angebracht wurde. Für die Esche wurden die Werte aus Wagenführ, Scheiber (1985) übernommen. Der E-Modul für die Esche beträgt 13400 N/mm² und die Biegefestigkeit 120 N/mm². Berechnet wurde der Abstand über die Durchbiegung der Eschenleiste am Einfeldträger. Die Durchbiegung wurde mit 1 mm begrenzt. Diese Begrenzung wurde gewählt, damit das Profil beim Pressen die richtige Form erhält und nicht durch etwaige Verformungen der Eschenleisten eine unebene Oberfläche annimmt. Als Belastung q wurde der Pressdruck auf die Form herangezogen. Dieser wurde mit 1,0 N/mm² angenommen. Über die Breite der Eschenleiste mit 25 mm errechnet sich die Last zu 25 N/mm. Die Berechnung des Achsabstandes e erfolgte mit der Durchbiegungsformel für einen Einfeldträger mit Gleichlast:

$$w = \frac{5qe^4}{384EI} \quad (7.1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (7.2)$$

w	Durchbiegung in Feldmitte [mm]
q	Gleichlast [N/mm]
e	Trägerlänge/Achsabstand [mm]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
I	Trägheitsmoment [mm ⁴]
b	Querschnittsbreite [mm]
h	Querschnittshöhe [mm]

Eingesetzt mit Werten errechnet sich der Abstand zu:

$$I = \frac{25 \cdot 25^3}{12} = 32.552,1 \text{ mm}^4 \quad (7.3)$$

$$e = \sqrt[4]{\frac{384wEI}{5q}} = \sqrt[4]{\frac{384 \cdot 1 \cdot 13400 \cdot 32552,1}{5 \cdot 25}} = 191,3 \text{ mm} \quad (7.4)$$

Durch den Umstand, dass das Grundgerüst ein Durchlaufträger ist und die errechneten Werte über den Einfeldträger auf der konservativen Seite liegen, wird für den Abstand 200 mm gewählt. Für die drei Meter lange Form ergibt sich ein Bedarf an Fichtenplatten von 16 Stück pro Seite.

Zur statischen Überprüfung wurde hier zusätzlich der Biegenachweis der Eschenleiste mit dem gewählten Achsabstand von 200 mm geführt:

$$\sigma_{m,y} = \frac{M_y}{W_y} \leq f_{m,mean} \quad (7.5)$$

$$M_y = \frac{qe^2}{8} \quad (7.6)$$

$$W_y = \frac{bh^2}{6} \quad (7.7)$$

$\sigma_{m,y}$	Biegespannung [N/mm ²]
M_y	einwirkendes Biegemoment [Nmm]
W_y	Widerstandsmoment des betrachteten Querschnitts [mm ³]
$f_{m,mean}$	Mittelwert der Biegefestigkeit [N/mm ²]
q	Gleichlast [N/mm]
e	Trägerlänge/Achsabstand [mm]
b	Querschnittsbreite [mm]
h	Querschnittshöhe [mm]

Eingesetzt ergibt dies folgenden Nachweis:

$$W_y = \frac{25 \cdot 25^2}{6} = 2604,2 \text{ mm}^3 \quad (7.8)$$

$$M_y = \frac{25 \cdot 200^2}{8} = 125.000 \text{ Nmm} \quad (7.9)$$

$$\sigma_{m,y} = \frac{125000}{2604,2} = 47,99 \text{ N / mm}^2 < 120 \text{ N / mm}^2 \quad (7.10)$$

Dieser Nachweis zeigt deutlich, dass die Eschenleiste im Stande ist, den aufgetragenen Druck aufzunehmen. Wichtiger ist dabei allerdings die zuvor durchgeführte Durchbiegungsbegrenzung, denn dadurch erhält das Profil beim Pressen die richtige Form, da sich die Eschenleisten nur minimal durchbiegen.

Diese Berechnung war die Grundlage für den nun folgenden Herstellprozess der Form. Für die Form der 32 benötigten Fichtenplatten wurde eine Schablone angefertigt. Die Anfertigung erfolgte mittels einer CNC-Fräse. Mithilfe dieser Schablone war es möglich, die Form auf die Fichtenplatten zu übertragen. In Abbildung 113 ist die CNC-gefräste Schablone der Matrize ersichtlich. Die Form wird auf die Fichtenplatte übertragen und anschließend wird diese grob zugeschnitten. Um die exakte Form zu erhalten, wird, wie in Abbildung 114 ersichtlich, die Schablone auf der Fichtenplatte befestigt und von einer Tischfräse mit einem Anlaufring auf die Platte übertragen. Der Anlaufring „kopiert“ dabei die Schablone auf die Dreischichtplatte. Die Fichtenplatte erhält zum Schluss die exakte Form der Schablone.



Abbildung 113: Übertragen der Schablonenform auf die Fichtenplatten und grobes Zuschneiden mit der Bandsäge



Abbildung 114: Fräsvorgang mittels Kopiervorrichtung und fertig gefrästes Grundelement der Form

Nach dem Fertigen der Platten für das Grundgerüst konnte dieses zusammengefügt werden. Dazu wurden, an den im Abstand von 20 cm ausgerichteten, gefrästen Platten, Bretter montiert (Abbildung 115) und die, auf die Stärke von 25 mm gehobelten, Eschenbretter bzw. -leisten aufgeschraubt.



Abbildung 115: Grundgerüst und bereits zum Teil aufgeschraubte Eschenbretter bzw. -leisten

Nach dem Aufschrauben der Leisten wurde die Form abgeschliffen, um Unebenheiten zu beseitigen. Zudem musste im Ausrundungsbereich die gewünschte Rundung durch Schleifen hergestellt werden.

Der abschließende Schritt beim Herstellen der Form war das Montieren der Biegesperrholzplatten auf die Eschenleisten. Die Biegesperrholzplatte war nötig, um zum einen eine ebenere Oberfläche zu erhalten

und zum anderen kann diese Platte entfernt werden um durch eine andere, dünnere oder dickere, ersetzt zu werden. Somit kann die Querschnittsstärke des zu pressenden Profils ohne großen Aufwand geändert werden. Verwendet wurden zwei 5 mm dicke Biegesperrholzplatten, wobei nur eine dieser beiden angeschraubt wurde. Die zweite wurde beim Pressvorgang lose aufgelegt und mit den Furnieren in die Form gepresst. Das Aufbringen der Platte gestaltete sich in den ersten Versuchen recht schwierig, da die Platte den Radius der Form teilweise nicht annehmen konnte und oft einriss. Abhilfe schaffte das Erhitzen des zu biegenden Teils der Platte mit einem Heißluftföhn. Wie in Abbildung 116 ersichtlich wurde der zu verformende Teil der Biegesperrholzplatte erhitzt und anschließend mit Schrauben an den Eschenleisten befestigt.



Abbildung 116: Erhitzen der Platte mittels Heißluftföhn und anschrauben derselben

Abbildung 117 zeigt die bereits zum Teil fertiggestellte Patrize mit einer bereits aufgeschraubten Biegesperrholzplatte im Hintergrund. Die fertiggestellte Matrize im rechten Bild wurde vor dem ersten Pressvorgang noch mit Zwingen versehen, um der nach außen wirkenden Kraftkomponente beim Pressen entgegenzuwirken.



Abbildung 117: teilweise fertiggestellte Patrize und fertige Matrize

7-2 HERSTELLUNG PROFIL

Für die Herstellung des Profils wurden 1,5 mm dicke Rotbuchenschäl furniere verwendet. Diese wurden vor Beginn der Verarbeitung in einer Klimakammer bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 20° Celsius gelagert. Die Furniere wiesen bei der Verarbeitung eine Holzfeuchtigkeit von 7,8 % und eine zugehörige Rohdichte von 619,5 kg/m³ im Mittel auf.

Zu allererst wurden die großformatigen Furniere auf die gewünschte Größe zugeschnitten. Die Furniere mussten dabei größer als die abgewinkelte Länge des Profils in Querrichtung und länger als 3 m in der Längsrichtung des Profils sein. Die Längslagen wurden auf 75 x 305 cm formatiert. Für die Querlagen standen keine Furniere in der gewünschten Größe bereit. Daher wurden die Querlagen jeweils aus fünf bzw. sechs Einzelstücken zusammengesetzt. Die Verbindung der Einzelstücke untereinander erfolgte mit Hilfe eines gelochten Furnierklebebands (Abbildung 118). Dieses Klebeband ist gelocht, damit während des Verklebens der Furnierschichten, der Klebstoff in diesem Bereich nicht nur am Klebeband, sondern auch an Teilen des Furniers haftet.



Abbildung 118: Zuschnitt der Furniere mit der Kreissäge und gefügte Querlage

Nach dem Zuschneiden sind die Furniere bereit zum Verkleben. Verwendet wurde dazu ein Melaminharzkleber Prefere 4546 und Härter Prefere 5022 (Dynea AS; 2012) mit einem Mischungsverhältnis von 100 Teilen Harz und 30 Teilen Härter. Das Harz und der Härter wurden vor dem Verkleben vermischt und anschließend mit Leimwalzen, wie in Abbildung 119 erkennbar, auf die Furnierlagen aufgetragen. Nach dem Vermischen von Harz und Härter beginnt die Reaktion mit welcher der Klebstoff aushärtet. Die Gebrauchsdauer des Klebstoffes ist von der Temperatur und vom Mischungsverhältnis abhängig. Für das Mischungsverhältnis Harz zu Härter von 100 zu 30 hat der Klebstoff bei 20°C Raumtemperatur und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit eine Gebrauchsdauer von 25 Minuten. Der Hersteller gibt zudem eine Auftragsmenge von 320 bis 500 g/m² an, wobei auch ein etwas geringerer Klebstoffbedarf ausreichend sein kann. Die Klebstoffmengen der hergestellten Profile sind in Tabelle 13 aufgelistet. Die Zeit bis der Klebstoff vollständig abgebunden ist, beträgt beim Mischungsverhältnis von 100 zu 30, 24 Stunden bei Raumtemperatur.



Abbildung 119: Klebstoffauftrag und auf der Matrize aufgelegte, mit Kleber versehene Furnierlagen

Noch vor dem Verkleben wurde die Matrize außerhalb der Presse positioniert und eine 0,8 mm dicke Biegekunststoffplatte (MAX HPL postforming Platte, Fa. Fundermax) sowie eine 5 mm dicke Biegesperrholzplatte aufgelegt. Die Biegekunststoffplatte hat einseitig eine glatte Oberfläche, mit der sie auf die Form aufgelegt wurde. Durch die große Zugfestigkeit und guten Biegeeigenschaften soll die Platte den Großteil der beim Pressen entstehenden Reibung aus der großen Relativverschiebung und dem Zusammenpressen zwischen den Furnieren und der Form aufnehmen. Dadurch soll erreicht werden, dass die Furniere nur mehr die geringe Reibung, welche aus der geringen Verschiebung der Furnierlagen untereinander resultiert, übertragen müssen und somit während des Schließvorgangs der Presse nicht quer zur Faser aufreißen, wie dies bei einigen Prototypen der Fall war. Die zuvor erwähnte Biegesperrholzplatte dient als Füllmaterial um die Abmessungen des Profils in Dickenrichtung zu erhalten. Zudem wurden zwischen den Platten und dem zu pressenden Furnierschichtpaket PE-Folien eingelegt, um die eingelegten Platten vor etwaig austretendem Klebstoff zu schützen.

Nach dem Auflegen der mit Klebstoff versehenen Furnierschichten auf die Form und dem Auflegen der Biegesperrholz- und Biegekunststoffplatte auf die Oberseite, wurde die Matrize eingehoben und die Form in die Furnierpresse geschoben. Die Presse wurde geschlossen und ein vertikaler Pressdruck von 0,67 N/mm² aufgebracht. Es wurden zwei gleiche Profile gepresst. Die Presszeiten betragen 18 bzw. 22 Stunden bei gleichem Pressdruck.



Abbildung 120: offene und geschlossene Presse mit Form

In Tabelle 13 sind die Kennwerte der Herstellung aufgelistet.

Tabelle 13: Kennwerte der hergestellten Profile

	Herstelldatum	Klebstoffmenge [g/m ²]	Pressdruck [N/mm ²]	Presszeit [h]
Profil 3m_01	29.04.2015	322	0,67	18
Profil 3m_02	30.04.2015	299	0,67	22

7-2.1 HERSTELLUNG DECKPLATTE

Für den ersten Biegeversuch wurde nicht die in der Berechnung verwendete BauBuchenplatte verwendet, sondern aus, den am Institut für Holzbau und Holztechnologie, vorhandenen Furnieren eine 5 cm starke Platte hergestellt. Diese wurde aus 3,1 mm dicken Buchenschäl furnieren gefertigt. Es wurden 16 Schichten miteinander verklebt. Die Platte wurde mit einer Breite von 55 cm und einer Länge von 315 cm gefertigt, um nach dem Zuschneiden, eine 50 cm x 300 cm große Platte für das Profil zu erhalten. Die

Faserrichtungen der einzelnen Furnier-Lagen wurden alle in Längsrichtung der Platte ausgerichtet. Die Furniere hatten bei der Verarbeitung eine Holzfeuchte von im Mittel 9,9 % und eine mittlere Rohdichte von 607 kg/m^3 . Verklebt wurden die Furniere mit Melaminharzkleber Prefere 4546 und Härter Prefere 5022 (Dynea AS; 2012) im Verhältnis Harz zu Härter von 100 zu 30. Der Klebstoffbedarf betrug 319 g/m^2 . Gepresst wurde die Platte für 24 Stunden bei $0,8 \text{ N/mm}^2$ in einer zehnzylindrigen Furnierpresse. In Abbildung 121 ist die gesamte Deckplatte dargestellt, sowie eine Ansicht der Stirnseite.

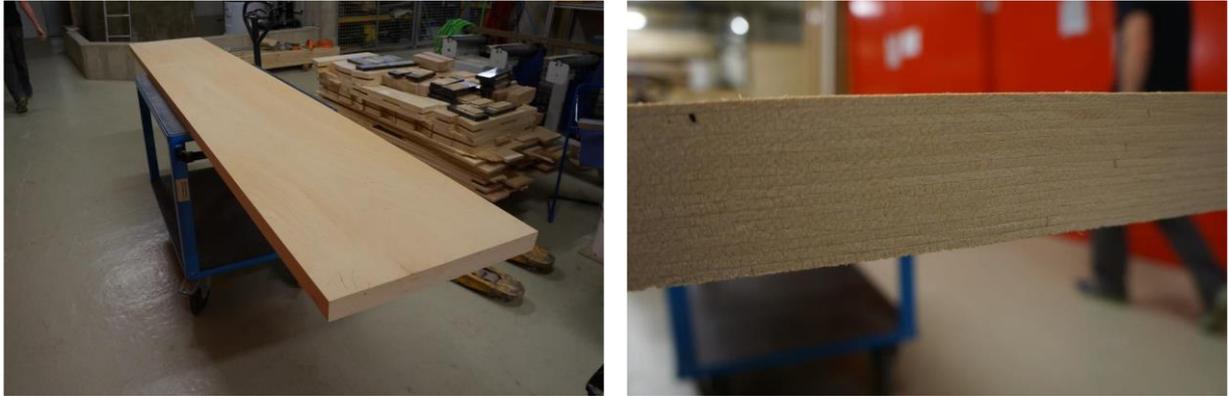


Abbildung 121: gepresste Deckplatte und Stirnfläche der Platte

7-2.2 AUFLAGERVERSTÄRKUNG

An den beiden Enden des Biegeprüfkörpers wurden zur besseren Lasteinleitung Auflagerverstärkungen angebracht. Diese Verstärkung bestand aus einem „Querschot“, welches den Hohlraum zwischen Profil und Deckplatte ausfüllte, und einer außen auf das Profil aufgeklebten Verstärkung, welche zusätzlich zur besseren Lasteinleitung auch die ebene Lagerung des Biegeprüfkörpers sicherstellte. Die Verstärkungen wurden aus Fichten-Dreischichtplatten hergestellt. Dazu wurde den Platten mit Hilfe der Tischfräse und Schablonen, welche der Profilform entsprachen, gefräst und anschließend zu einem Paket, bestehend aus drei Platten, verklebt. Die Auflagerverstärkung wies eine Breite von 8,1 cm auf. Die gefrästen Platten wurden mit Polyvinylacetat (PV/H) Holzleim wasserfest (Henkel Central Eastern Europe GmbH) verklebt und in einer Furnierpresse gepresst. Die Verbindung mit dem Profil und der Platte (siehe Abbildung 122) erfolgte mit einem Ein-Komponenten Polyurethanklebstoff (HB S309) (Purbond; 2011) in einer Furnierpresse.



Abbildung 122: "Querschot" und außen aufgeklebte Auflagerverstärkung

7-2.3 VERBINDUNG DECKPLATTE – TRAPEZPROFIL

Die Verbindung der Deckplatte mit dem Trapezprofil erfolgte durch Verkleben mit dem, bereits bei der Profil- und Plattenherstellung verwendeten, Melaminharzkleber. Das Mischungsverhältnis Harz zu Härter betrug 100 zu 30. Der Klebstoff wurde mit einer Leimwalze auf die beiden Flansche des Profils aufgetragen (siehe Abbildung 123). Das Profil wurde dazu in der Pressform platziert, um nach dem Auflegen der Deckplatte ein Pressen in der Furnierpresse zu ermöglichen. Die Verbindung der beiden Bauteile erfolgte in der Presse bei einem Pressdruck von $0,8 \text{ N/mm}^2$. Die Pressdauer betrug 24 Stunden.

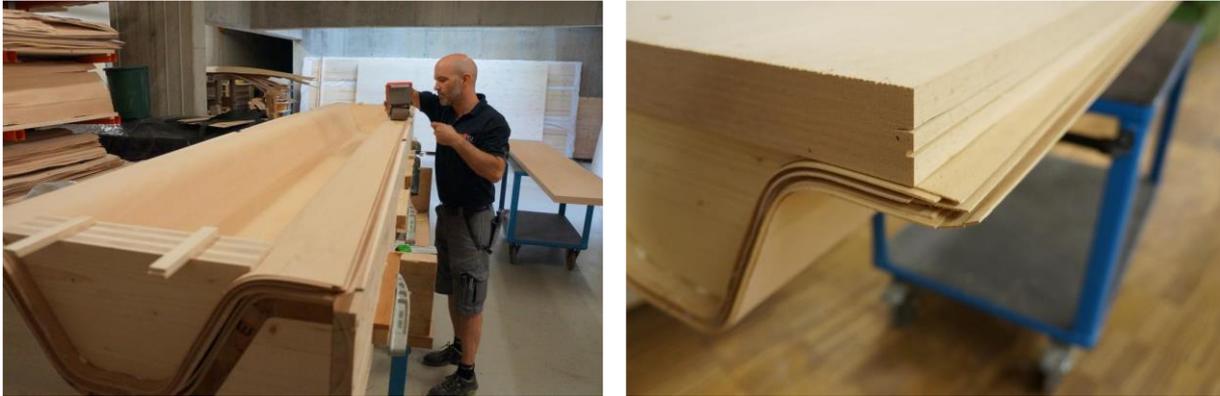


Abbildung 123: Klebstoffauftrag und Profil mit aufgeklebter Deckplatte vor dem Zuschneiden

7-3 FERTIGER PRÜFKÖRPER

In den nachfolgenden Abbildungen ist der fertiggestellte und zugeschnittene Prüfkörper für den 4-Punkt-Biegeversuch dargestellt.



Abbildung 124: fertiggestellter Prüfkörper

KAPITEL 8: BIEGEPRÜFUNG

Die Prüfung des hergestellten Profils erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 14374 (2005) „Holzbauwerke – Furnierschichtholz für tragende Zwecke – Anforderungen“. Für das Prüfverfahren der Biegefestigkeit wird in der Norm auf die ÖNORM EN 408 (2012) „Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“ verwiesen. Anhand dieser Norm wurde die Prüfkonfiguration zusammengestellt, sowie die Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte errechnet. Geprüft wurde ein Profil. Die Herstellung wurde bereits unter Kapitel 7: Herstellung Biegeprüfkörper erläutert. Die durch die Bauteilprüfung erhaltenen Werte werden mit den Ergebnissen des Berechnungsmodells gegenübergestellt.

8-1 PRÜFKONFIGURATION

Geprüft wird das Profil mittels eines 4-Punkt-Biegeversuchs (siehe Abbildung 128). Dazu ist der 3 m lange Träger als Balken auf zwei Stützen zu lagern. Der Träger wird in den Drittelpunkten der Spannweite belastet. Dies erfolgt mithilfe einer Zwick Universal 250 Prüfmaschine. Die Belastung ist dabei laut ÖNORM EN 408 (2012) mit konstanter Geschwindigkeit aufzubringen. Eine Darstellung der Prüfkonfiguration ist in Abbildung 125 und Abbildung 126 gegeben.

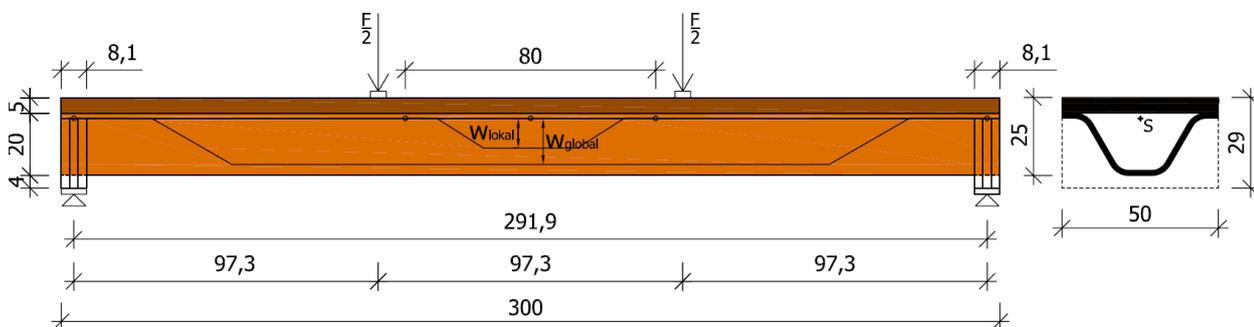


Abbildung 125: Ansicht der Biegeprüfkonfiguration

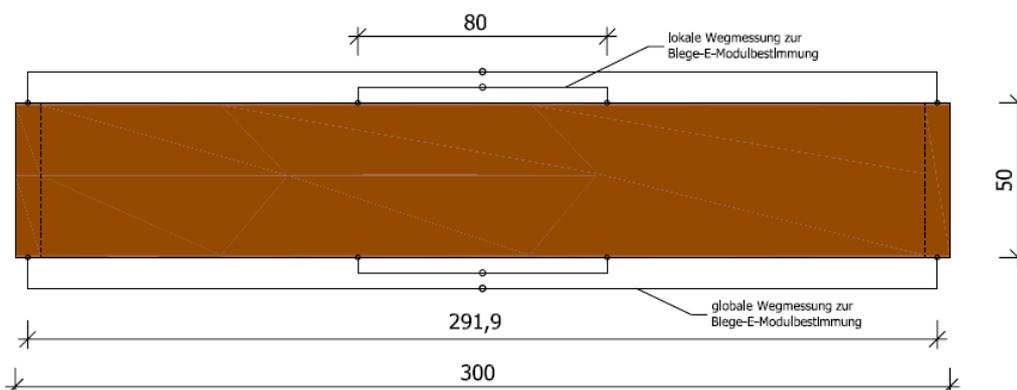


Abbildung 126: Draufsicht der Biegeprüfkonfiguration

Die Belastung ist so aufzubringen, dass die Höchstlast innerhalb von 300 ± 120 Sekunden erreicht wird. Die Wegmessung für die Bestimmung des lokalen Biege-E-Moduls erfolgt in der Mitte des Profils auf einer Länge von 80 cm. Gemessen wird die Verformung des Trägers im Schwerpunkt des Querschnitts mithilfe von WA10 Wegaufnehmern. In Abbildung 127 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

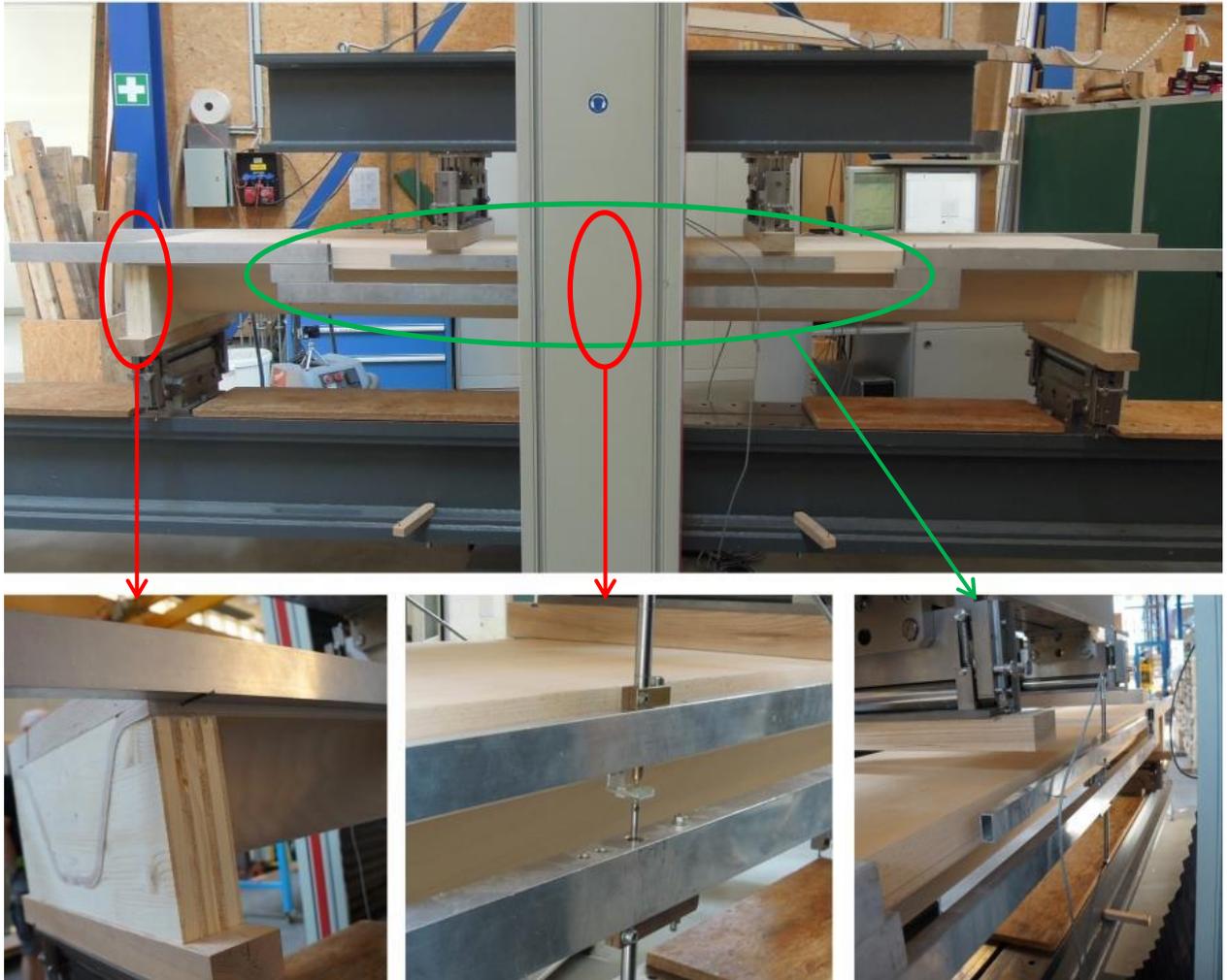


Abbildung 127: Prüfkörper mit angebrachten Messeinrichtungen

Der globale Biege-E-Modul wird auch in Trägermitte, allerdings auf einer Messlänge von 291,9 cm, bis zu den Auflagern gemessen. Die Messung erfolgt ebenso im Schwerpunkt des Querschnitts mit WA50 Wegaufnehmern. In Abbildung 128 ist das statische System der Prüfkonfiguration mit den zugehörigen Schnittkraftverläufen für Querkraft und Moment dargestellt. Die Stützweite l des Systems liegt, wie bereits erwähnt, bei 291,9 cm. Durch den Umstand, dass die Kräfteinleitungspunkte genau in den Drittelpunkten des Trägers liegen ergeben sich die Abstände a und $l-2a$ zu jeweils 97,3 cm.

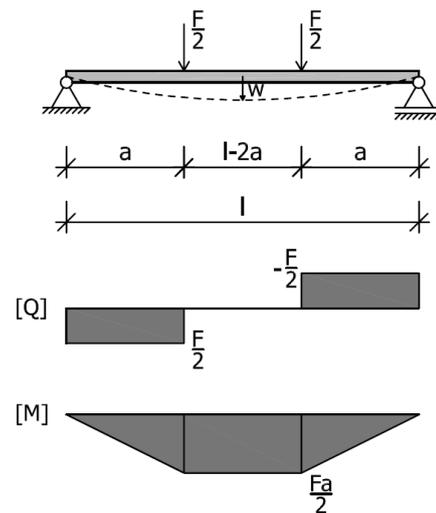


Abbildung 128: 4-Punkt-Biegeversuch mit zugehörigen Schnittkraftverläufen

8-2 PRÜFABLAUF

Vor dem Einheben des Prüfkörpers in die Zwick Universal 250 Prüfmaschine wurden alle notwendigen Punkte am Prüfkörper angezeichnet. Die Messung des lokalen und globalen E-Moduls erfolgte im Schwerpunkt des Systems. Dazu wurden in den in Abbildung 125 und Abbildung 126 gekennzeichneten Punkten Nägel eingeschlagen (Abbildung 129), auf welchen das Messgestänge aufgehängt wurde. Die Wegaufnehmer wurden in der Mitte der Gestänge montiert und die Wegmessung erfolgte über einen, in der Mitte des Profils angebrachten, L-Winkel (siehe Abbildung 127). Der Prüfkörper wurde vor der Prüfung in die Prüfmaschine eingehoben und auf den Auflagern zentriert.



Abbildung 129: Nagel zur Aufhängung des Messgestänges und Darstellung des gesamten Prüfaufbaus

Die Belastung erfolgte weggesteuert mit Hysterese. Eine typische Hystereseschleife ist in Abbildung 130 dargestellt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 5 mm/min, die Entlastungsgeschwindigkeit 10 mm/min. Die Entlastung erfolgte, bei der Durchführung der Hysterese, bei einer Kraft von 40 kN. Der Träger wurde bis zu einer Kraft von 10 kN entlastet, ehe mit der weiteren Belastung, mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 5 mm/min, fortgefahren wurde.

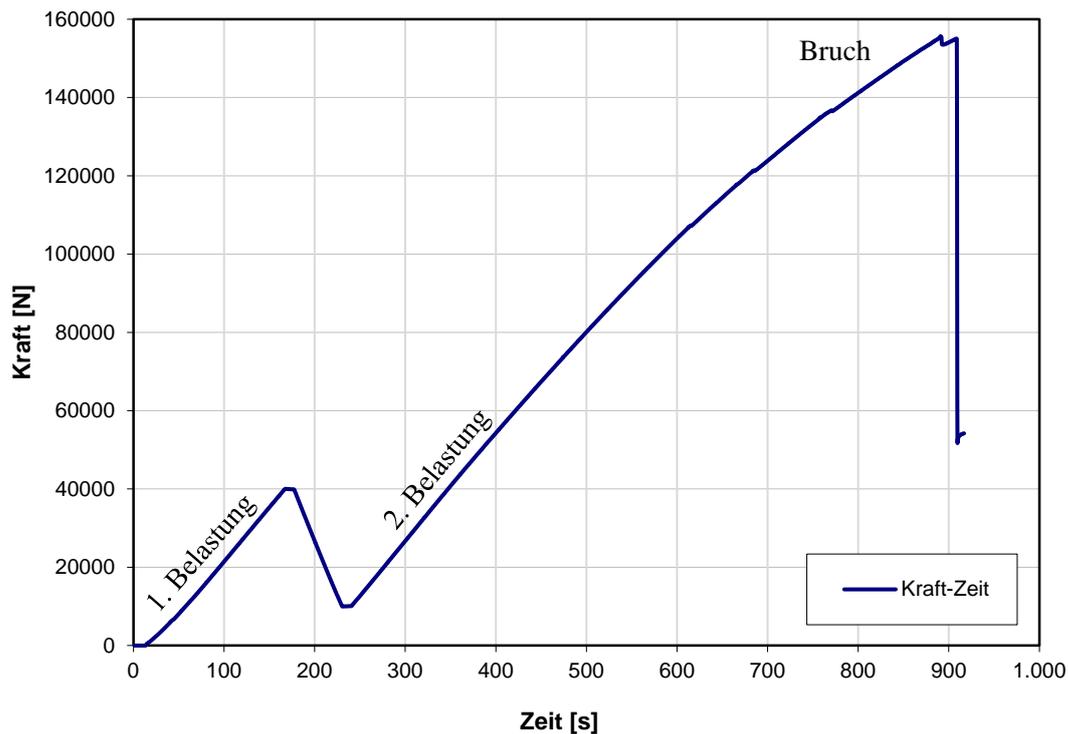


Abbildung 130: Beispiel einer typischen Hystereseschleife

8-3 ERMITTLUNG DES LOKALEN BIEGE-E-MODULS

Die Ermittlung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls erfolgt analog zur ÖNORM EN 408 (2012). Dabei ist die Last-Verformungskurve mit den aus der Prüfung erhaltenen Daten aufzutragen. Der Abschnitt zwischen $0,1 \cdot F_{\max}$ und $0,4 \cdot F_{\max}$ ist mit einer Regressionsgerade zu beschreiben. F_{\max} ist dabei die aufgebrauchte Höchstlast in Newton [N]. Der Korrelationskoeffizient muss dabei einen Wert von mindestens 0,99 ergeben. Dieser Abschnitt muss aber mindestens den Bereich von $0,2 \cdot F_{\max}$ bis $0,3 \cdot F_{\max}$ beinhalten. Der E-Modul ist mit einer Unsicherheit von 1 % zu berechnen.

Die Wegmessung erfolgt beidseitig des zu prüfenden Trägers. Die erhaltenen Werte werden für das Erstellen der Lastverformungskurve gemittelt.

Der lokale Biege-Elastizitätsmodul ist mit folgender Formel zu ermitteln:

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (8.1)$$

$E_{m,l}$	lokaler Elastizitätsmodul [N/mm ²]
a	Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager [mm]
l_1	Messlänge [mm]
I	Trägheitsmoment des Querschnitts [mm ⁴]
$F_2 - F_1$	Laststeigerung im Bereich der Ausgleichsgeraden bei einem Korrelationskoeffizient von mindestens 0,99 [N]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme bei $F_2 - F_1$ [mm]

In Abbildung 131 ist beispielhaft eine Lastverformungskurve mit zugehörigen Lasten und Verformungen für die Berechnung des E-Moduls dargestellt.

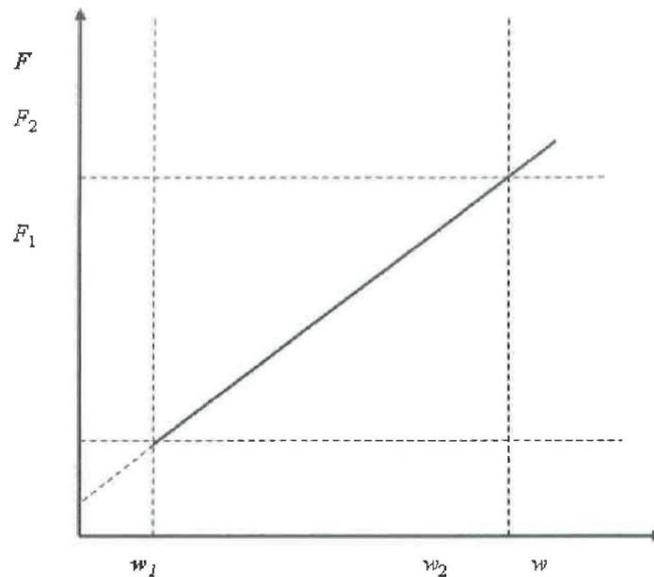


Abbildung 131: Lastverformungskurve innerhalb eines Bereichs der elastischen Verformung (ÖNORM EN 408; 2012)

8-4 ERMITTLUNG DES GLOBALEN BIEGE-E-MODULS

Für die Ermittlung des globalen Biege-Elastizitätsmodul nach ÖNORM EN 408 (2012) ist, wie bei der lokalen Ermittlung, eine Regressionsgerade an die Lastverformungskurve im Bereich zwischen $0,1 \cdot F_{\max}$ und $0,4 \cdot F_{\max}$ zu legen. Es ist der längste Abschnitt der Kurve, welcher einen Korrelationskoeffizienten von mindestens 0,99 ergibt, zu ermitteln. Dieser Abschnitt muss mindestens den Bereich $0,2 \cdot F_{\max}$ bis $0,3 \cdot F_{\max}$ umfassen.

Der globale Biege-Elastizitätsmodul ist mit folgender Formel zu ermitteln:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{24I \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{a}{G_{ef} A_{ef}} \right)} \quad (8.2)$$

- $E_{m,g}$ globaler Elastizitätsmodul [N/mm²]
- a Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager [mm]
- l Spannweite [mm]
- I Trägheitsmoment des Querschnitts [mm⁴]
- $F_2 - F_1$ Laststeigerung im Bereich der Ausgleichsgeraden bei einem Korrelationskoeffizient von mindestens 0,99 [N]
- $w_2 - w_1$ Verformungszunahme bei $F_2 - F_1$ [mm]
- G_{ef} Schubmodul im Steg [N/mm²]
- A_{ef} Querschnittsfläche des Steges [mm²]

8-5 ERMITTLUNG DER BIEGEFESTIGKEIT

Die Biegefestigkeit des belasteten Trägers berechnet sich wie folgt:

$$f_m = \frac{Faz}{2I} \quad (8.3)$$

f_m	Biegefestigkeit [N/mm ²]
F	aufgebrachte Last [N]
a	Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager [mm]
z	Dickenkoordinate bezogen auf den Gesamtschwerpunkt des Querschnitts [mm]
I	Trägheitsmoment des Querschnitts [mm ⁴]

8-6 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Der 4-Punkt-Biegeversuch wurde, wie unter 8-1 Prüfkongfiguration erläutert, durchgeführt. Der Träger erreichte eine Maximallast von 155,63 kN. Abbildung 132 zeigt das belastete Bauteil kurz vor Erreichen der Bruchlast.



Abbildung 132: Träger kurz vor Erreichen der Maximallast

Der drei Meter lange Träger versagte bei der Maximallast im Bereich der Verbindung zwischen Deckplatte und Profil. In diesem Bereich kam es aufgrund eines seitlichen Ausweichens des Profils zu einer Kombination aus Schub- und Querkzugversagen in der oberen Querlage des Profils.



Abbildung 133: Versagen des Trägers an der "Nordseite"



Abbildung 134: Versagen des Trägers an der "Südseite"

8-6.1 LOKALER BIEGE-E-MODUL

Der lokale Biege-E-Modul wurde für den Träger am Wiederbelastungsast zwischen 10,3 % und 31,8 % der Maximallast von 155,63 kN ermittelt. Laut ÖNORM EN 408 (2012) ist eine Regressionsgerade durch die Lastverformungskurve im Bereich zwischen $0,1 \cdot F_{\max}$ und $0,4 \cdot F_{\max}$ zu legen. Der obere Grenzwert wurde mit $0,32 \cdot F_{\max}$ gewählt, da in diesem Bereich die Wegaufnehmer abgenommen wurden und der Messbereich nicht bis $0,4 \cdot F_{\max}$ reicht. Die Messwerkzeuge wurden zu früh abgenommen, da vor der Versuchsdurchführung mit einer geringeren erreichbaren Maximallast gerechnet wurde. Die Regressionsgerade für diesen Bereich weist einen Korrelationskoeffizienten von $-0,999908841$ auf. Die Laststeigerung durch Verformungszunahme in diesem Bereich hat einen Wert von 59390,74. In Abbildung 135 ist der Kraftverlauf für den gesamten Biegeversuch dargestellt. Die strichlierten Linien stellen die untere bzw. obere Grenze des Bereichs für die Ermittlung der Regressionsgeraden dar.

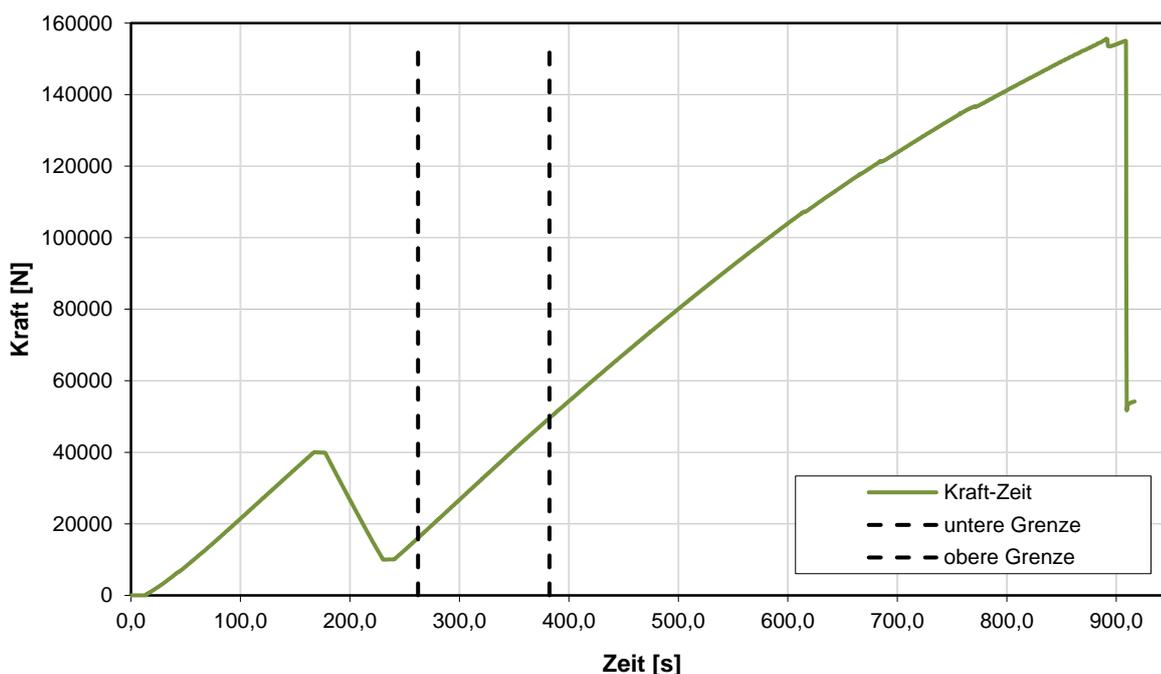


Abbildung 135: Kraft-Zeit Diagramm des 4-Punkt-Biegeversuchs

In Abbildung 136 ist ersichtlich, dass der Auswertebereich im Messbereich der Wegaufnehmer liegt. Bei 50 kN ($0,32 \cdot F_{\max}$) wurden die Messeinrichtungen vom Prüfkörper abgenommen. Abbildung 137 dient der Überprüfung, ob der Messbereich im linear-elastischen Bereich liegt.

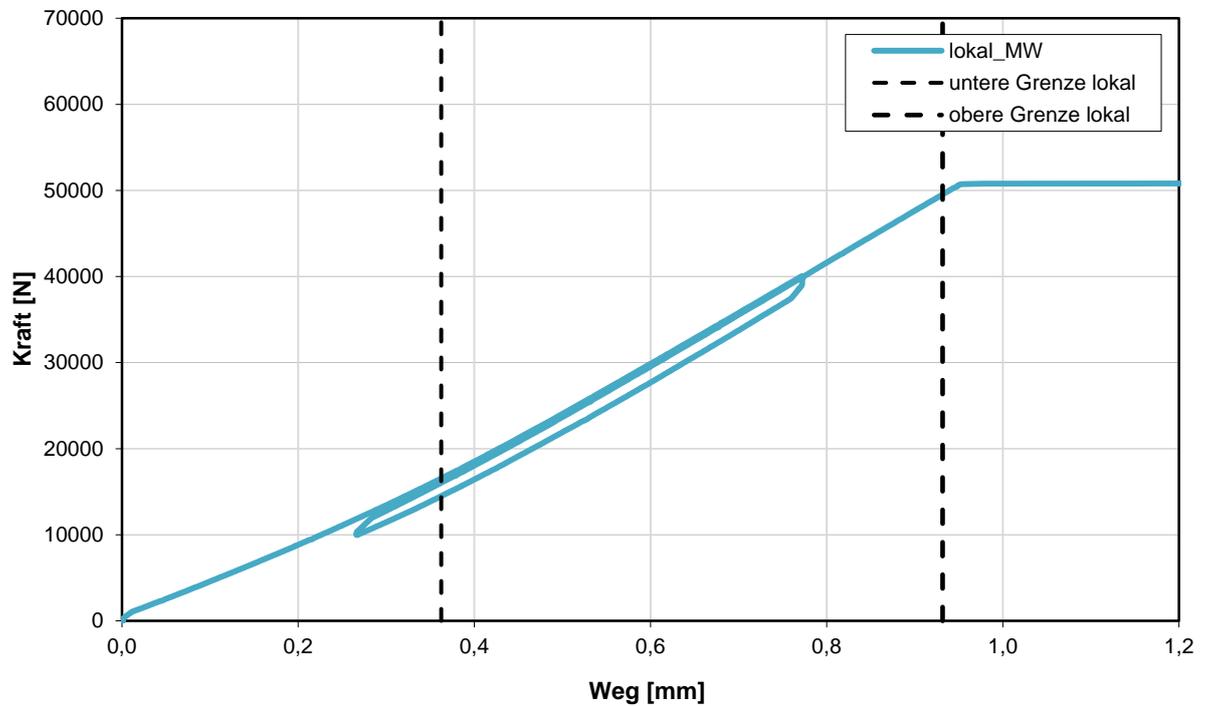


Abbildung 136: Kraft-Weg Diagramm der lokalen Wegaufnehmer

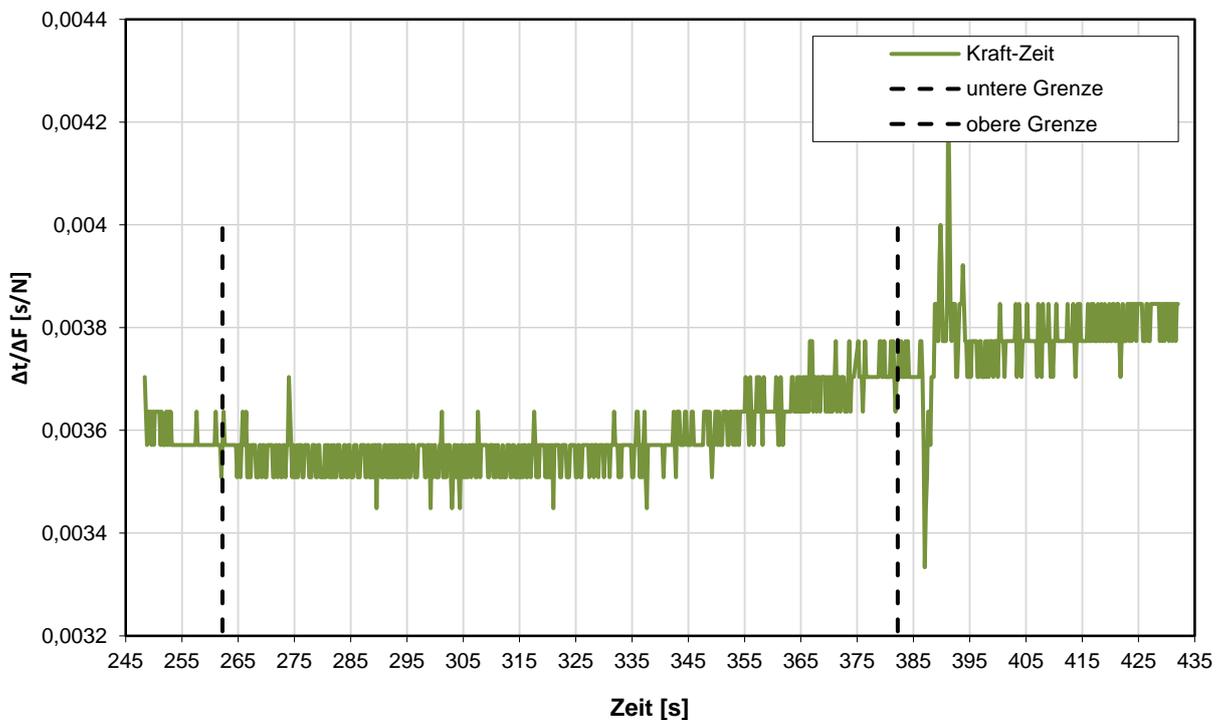


Abbildung 137: Diagramm zur Überprüfung des linear-elastischen Bereichs der lokalen Wegmessung

Zur Ermittlung des E-Moduls wird neben den Abmessungen aus der Prüfkongfiguration, noch das Trägheitsmoment des Querschnitts benötigt. Dieses wurde für den geprüften Querschnitt neu berechnet. Dazu wurden für die Deckplatte und das Profil die gleichen Materialparameter eingesetzt, d.h. die n-Ziffer beträgt für alle längsorientierten Schichten 1,00 und für die zwei Querlagen des Profils 0. Das Trägheitsmoment ergibt sich daher zu $1,56 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$. Eingesetzt in die Formel zur Ermittlung des lokalen E-Moduls ergibt sich folgender Wert für den geprüften Träger:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2 (F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (8.4)$$

$$E_{m,l} = \frac{973 \cdot 800^2}{16 \cdot 155.518.872} \cdot 59390,74 = 14.863,07 \text{ N / mm}^2 \quad (8.5)$$

8-6.2 SCHUBSTEIFIGKEIT

Über die Messung der globalen Verformung, kann durch Umformen der Formel für die Ermittlung des globalen E-Moduls, die Schubsteifigkeit GA des Trägers ermittelt werden. Die Grenzen für den Bereich der Regressionsgeraden wurden gleich groß gewählt, wie bei der Ermittlung des lokalen E-Moduls. Die untere Grenze liegt bei 10,3 % und die obere Grenze bei 31,8 % der Maximallast von 155,63 kN. Die ermittelte Regressionsgerade ergibt einen Wert von dF/dw von 3341,49. Bei einem Regressionskoeffizienten von -0,999946408. In Abbildung 138 ist das Kraft-Zeilen Diagramm mit den zugehörigen Grenzen für die Ermittlung der Regressionsgerade dargestellt.

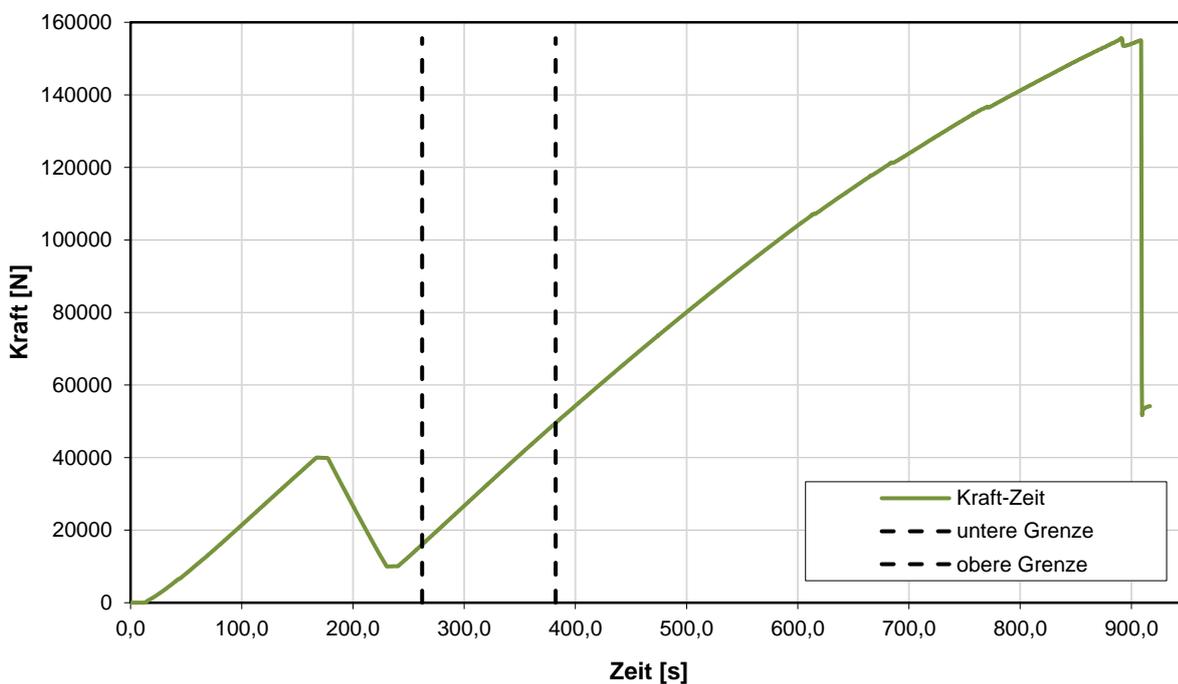


Abbildung 138: Kraft-Zeit Diagramm des 4-Punkt-Biegeversuchs

In Abbildung 139 ist ersichtlich, dass der Auswertungsbereich im Messbereich der Wegaufnahme liegt. Bei 50 kN wurden die Messeinrichtungen vom Prüfkörper abgenommen. Abbildung 140 dient der Überprüfung, ob der Messbereich im linear-elastischen Bereich liegt.

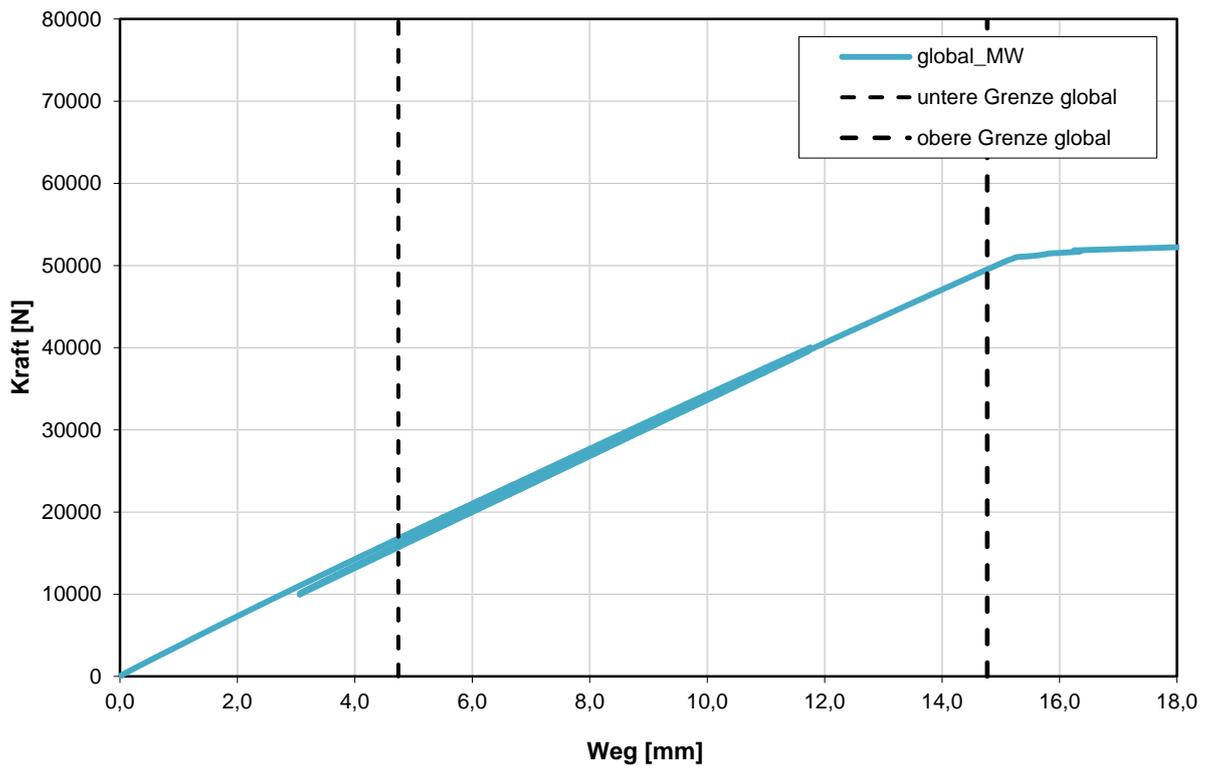


Abbildung 139: Kraft-Weg Diagramm der globalen Wegaufnahme

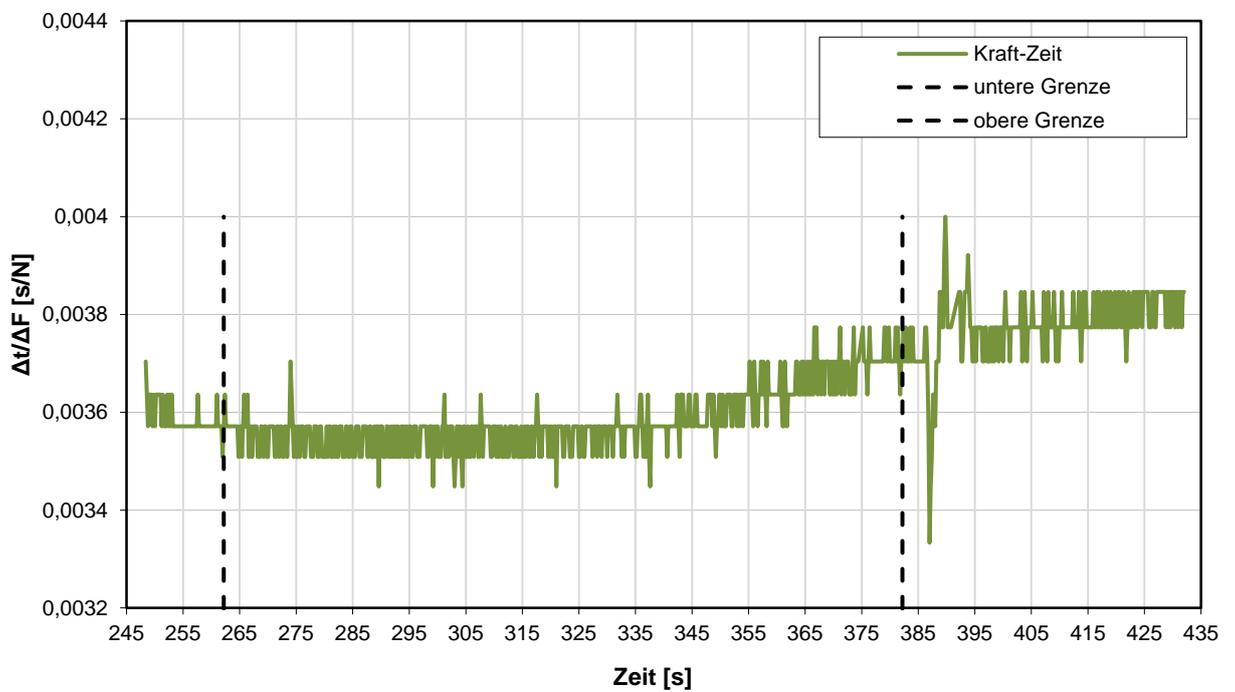


Abbildung 140: Diagramm zur Überprüfung des linear-elastischen Bereichs der globalen Wegmessung

Durch Umformen der Formel für die Ermittlung des globalen E-Moduls erhält man folgende Formel für die Ermittlung der Schubsteifigkeit des 3 m langen Profils:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{24I \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{a}{GA} \right)} \quad (8.6)$$

$$GA = \frac{24EIa}{48EI \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - 3al^2 + 4a^3} \quad (8.7)$$

Für das Trägheitsmoment des Querschnitts wurde der, bereits unter 8-6.1 Lokaler Biege-E-Modul erwähnte Wert von $1,56 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$ eingesetzt. Der Wert für die Schubfestigkeit ergibt sich durch Einsetzen aller Parameter der Prüfkfiguration und Querschnittswerte wie folgt:

$$GA = \frac{24 \cdot 14863 \cdot 155518872 \cdot 973}{48 \cdot 14863 \cdot 155518872 \frac{1}{3341,49} - 3 \cdot 973 \cdot 2919^2 + 4 \cdot 973^3} = 4.491.707,27 \text{ N} \quad (8.8)$$

8-6.3 BIEGESPANNUNG BEI VERSAGEN

Die Biegespannung wurde bei der maximal erreichten Kraft von 155,6 kN errechnet. Da der Träger jedoch nicht auf Biegung versagte, ist die mögliche Biegefestigkeit des Trägers noch höher. Die Biegespannung errechnet sich wie folgt:

$$\sigma_m = \frac{Faz}{2I} \quad (8.9)$$

$$\sigma_m = \frac{155630 \cdot 973 \cdot 190}{2 \cdot 155518872} = 92,50 \text{ N/mm}^2 \quad (8.10)$$

8-7 VERGLEICH MIT BERECHNUNGSMODELL

Die Ergebnisse des 4-Punkt-Biegeversuchs wurden in diesem Kapitel mit den Resultaten des Berechnungsmodells verglichen. In Tabelle 14 sind die Querschnittswerte, erhalten aus dem 4-Punkt-Biegeversuch zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 14: Querschnittswerte ermittelt aus dem 4-Punkt-Biegeversuch

E	14.863 [N/mm ²]
I	$1,56 \cdot 10^8$ [mm ⁴]
EI	$2,31 \cdot 10^{12}$ [N/mm ²]
m	26,84 [kg/m]
A	360,32 [cm ²]
GA	$4,49 \cdot 10^6$ [N]

Im Berechnungsmodell wurden die von Staudacher (2015) ermittelten Steifigkeitskennwerte von ebenem Furnierschichtholz verwendet, wobei die Mittelwerte der Steifigkeitskennwerte verwendet wurden. Der E-Modul für die Deckplatte aus 3,1 mm dicken Furnieren beträgt 14.855 N/mm². Für das Profil,

bestehend aus 1,55 mm dicken Furnieren, gibt Staudacher (2015) einen E-Modul 12.500 N/mm^2 an. Für die Verformung aus dem Schubanteil wurde im Berechnungsmodell vereinfacht die schräge Stegfläche des Profils herangezogen. Die effektive Schubfläche A_{ef} wird mit dem von Staudacher (2015) ermittelten Schubmodul G von 705 N/mm^2 für den geschichteten Aufbau multipliziert und ergibt somit die Schubsteifigkeit $G_{ef}A_{ef}$ des Querschnitts. In Tabelle 15 sind die Querschnittswerte des Berechnungsmodells zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 15: Querschnittswerte im Berechnungsmodell

E_v	14.855 [N/mm ²]
I_{ef}	$1,36 \cdot 10^8$ [mm ⁴]
EI	$2,02 \cdot 10^{12}$ [N/mm ²]
m	27,87 [kg/m]
A	360,32 [cm ²]
G	705 [N/mm ²]
A_{ef}	48,99 [cm ²]
$G_{ef}A_{ef}$	$3,45 \cdot 10^6$ [N]

Der Vergleich wurde im linear-elastischen Bereich des Trägers durchgeführt. Verglichen wurde hier die globale Verformung des Trägers in Feldmitte. Die Durchbiegung im Berechnungsmodell wurde, wie in 6-2 Durchbiegung erläutert, berechnet. Abbildung 141 zeigt die Abmessungen des Einfeldträgers mit 2 Kräften, die beim 4-Punkt-Biegeversuch verwendet wurden.

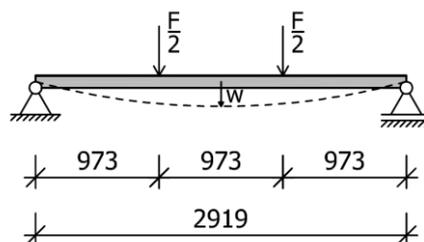


Abbildung 141: Abmessungen des Einfeldträgers mit 2 Kräften in mm

Für den Vergleich wurden die Werte der oberen und unteren Grenze der Auswertung für den E-Modul und zwei zufällig gewählte Werte in diesem Bereich herangezogen. Das Berechnungsmodell liefert einen Wert für die Verformung aus der Momentenbelastung und einen auf Grund der Querkraftverformung. Die beiden Werte werden addiert und bilden die Gesamtverformung des Systems, welche in $w_{Berechnung}$ wiedergegeben wird. Dieser Wert wird in Tabelle 16 mit der globalen Verformung aus dem Versuch ($w_{Versuch}$) verglichen.

Tabelle 16: Vergleich Durchbiegung Berechnungsmodell mit der globalen Durchbiegung aus dem Versuch

	$0,10 \cdot F_{max}$	$0,13 \cdot F_{max}$	$0,21 \cdot F_{max}$	$0,32 \cdot F_{max}$
F	16,05	20,21	32,80	49,54 [kN]
w_{Moment}	3,51	4,42	7,18	10,84 [mm]
$w_{Querkraft}$	2,26	2,85	4,62	6,98 [mm]
$w_{Berechnung}$	5,77	7,27	11,80	17,82 [mm]
$w_{Versuch}$	4,74	5,94	9,66	14,77 [mm]
$w_{Berechnung}/w_{Versuch}$	1,22	1,22	1,22	1,21 [-]

In Abbildung 142 ist der Vergleich der Durchbiegungen grafisch dargestellt. Im Diagramm sind die Kraft-Weg Kurven des Versuchs und des Berechnungsmodells gegenübergestellt. Für den Vergleich wurde die Differenz der Durchbiegungen bei $0,32 \cdot F_{\max}$ (49,54 kN) gekennzeichnet.

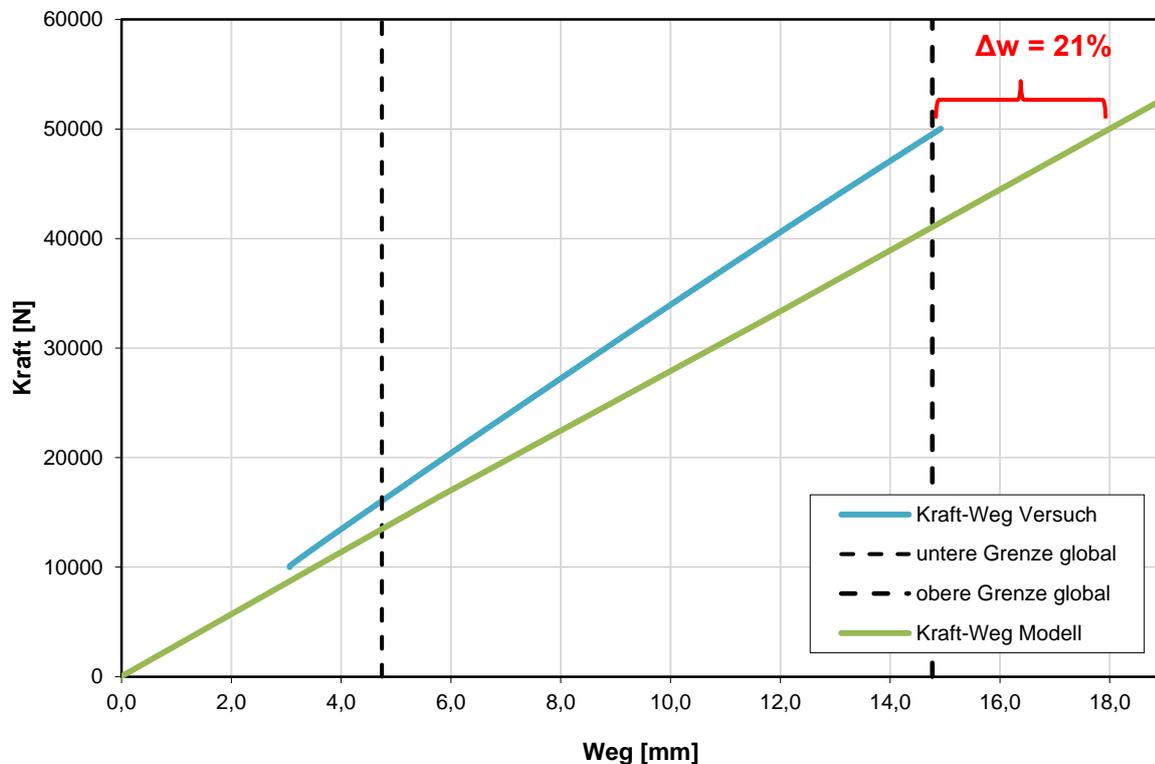


Abbildung 142: Vergleich Versuch mit Berechnungsmodell im Kraft-Weg Diagramm

Aus dem Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte ist erkennbar, dass das Berechnungsmodell um 21 % bzw. 22 % von der tatsächlichen Durchbiegung abweicht. Ein Grund dafür ist sicherlich die Annahme der schubbeanspruchten Fläche. Im Berechnungsmodell wurde lediglich der Steg dafür herangezogen. Ein Vergleich der Schubsteifigkeit in Formel 8.10 zeigt, dass die aus dem Versuch erhaltene Steifigkeit jene des Modells um 30 % übersteigt. Beim Vergleich der Biegesteifigkeit in Formel 8.12 beträgt die Differenz 14 %.

$$\frac{GA_{\text{Versuch}}}{GA_{\text{Modell}}} = \frac{4,49 \cdot 10^6}{3,45 \cdot 10^6} = 1,30 \quad (8.11)$$

$$\frac{EI_{\text{Versuch}}}{EI_{\text{Modell}}} = \frac{2,31 \cdot 10^6}{2,02 \cdot 10^6} = 1,14 \quad (8.12)$$

Die Differenz der Biegesteifigkeit ist auf den geringen, von Staudacher (2015) ermittelten, E-Modul von 12.500 N/mm^2 des Profils zurückzuführen.

Für zukünftige Untersuchungen solcher Profile ist es sinnvoll, sich mit der genauen Prüfung der Einzelkomponenten des Verbundbauteils auseinanderzusetzen, um aussagekräftige Werte für die Modellierung zu erhalten. Zudem muss das Bauteil hinsichtlich der schubbeanspruchten Fläche untersucht werden, um die oben angeführte Differenz der Schubsteifigkeiten ausgleichen zu können.

KAPITEL 9: RÜCKSTELLEFFEKT

In diesem Kapitel wurde der Rückstelleffekt des Profils mit unterschiedlicher Anordnung der Schichten untersucht. Dazu wurden 3 verschiedene Profile hergestellt und vermessen. Es soll festgestellt werden, wie groß der Rückstelleffekt ist und welchen Einfluss die Anordnung der Lagen auf diesen hat.

9-1 HERSTELLUNG

Es wurden mit 1,5 mm dicken Buchenschäl furnieren 3 Profile gepresst. Der Querschnitt hatte 11 Schichten mit unterschiedlicher Lagenorientierung:

- Profil mit nur Längslagen (LL)
- Profil mit einer Querlage in der Mitte (QLm)
- Profil mit Querlagen in der zweiten und zehnten Schicht (QL2)

Die Profile wurden mit der unter 7-1 hergestellten Form gepresst. In Abbildung 143 ist ein zugeschnittener Versuchskörper dargestellt. Gefertigt wurde ein 60 cm langes Profil, welches dann in zwei 25 cm lange Versuchskörper und einen Teil zur Holzfeuchte- und Rohdichtebestimmung aufgeteilt wurde.

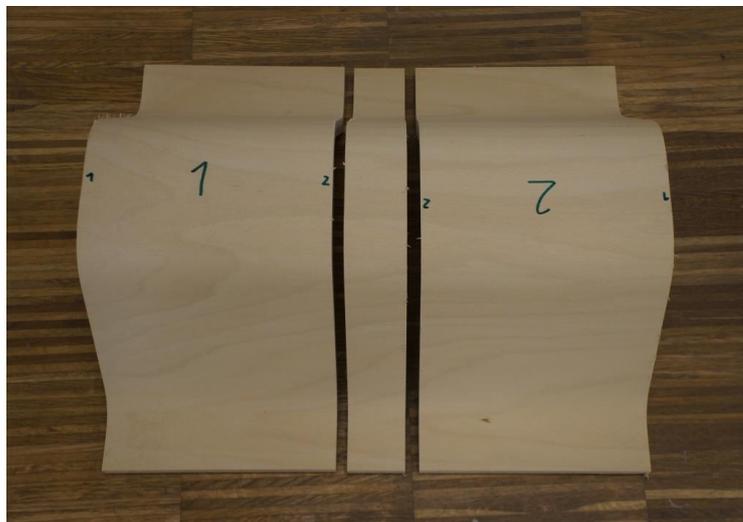


Abbildung 143: zugeschnittene Versuchskörper

Die verarbeiteten Buchenfurniere wiesen vor dem Verkleben eine mittlere Holzfeuchte von 9,8 % auf. Die Furniere hatten im Mittel eine Rohdichte feucht von 635,4 kg/m³. Verklebt wurden die einzelnen Lagen mit Melaminharzkleber Prefere 4546 und Härter Prefere 5022 (Dynea AS; 2012) im Mischungsverhältnis von 100 Teilen Harz zu 30 Teilen Härter. Die aufgetragene Klebstoffmenge betrug im Mittel 281 g/m². Nach dem Klebstoffauftrag wurden die Furniere in einer Furnierpresse bei einem vertikalen Pressdruck von 0,7 N/mm² 22 Stunden lang gepresst.

Die Bezeichnung der Prüfkörper lautet wie folgt: LL_01_02: LL für den Aufbau, 01 für das Profil und 02 für die Seite (siehe Abbildung 143).

9-2 LAGERUNG

Die Profile wurden nach dem Pressen vermessen und anschließend in einer Klimakammer bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % und einer Temperatur von 20°C gelagert.

9-3 MESSUNGEN

Nach dem Pressen wurden auf jeden Querschnitt 13 Punkte, mittels einer Schablone aufgetragen. Durch aufnehmen der Querschnitte mittels Scanner wurde anschließend in einer CAD-Software die Geometrie des Ausgangsquerschnitts mit jener der hergestellten Profile verglichen. Es wurden die Abweichungen in horizontaler und vertikaler Richtung gemessen. Die absoluten Werte der Abweichungen der Punkte im oberen Flansch (siehe dazu Abbildung 144 Punkte 1, 2, 12, 13) wurden anschließend für jeden Schichtaufbau gemittelt und sind im Folgenden dargestellt. Gemessen wurde 24 Stunden nach dem Pressvorgang und ein zweites Mal 20 Tage nach dem Pressvorgang. Vor der zweiten Messung wurden die Profile zweimal in einem Abstand von 6 Stunden gewogen um die Massekonstanz zu überprüfen. Da dies erfüllt war, konnten die Profile vermessen werden. Für die Ermittlung der Verschiebung wurden in Summe pro Schichtaufbau vier Querschnitte vermessen. Jeweils zwei pro Profil (siehe Abbildung 143).

9-3.1 MESSUNG 1

Die erste Messung erfolgte einen Tag nach dem Pressvorgang. Dazu wurden nach dem Pressen Punkte mittels einer Schablone auf den Querschnitt aufgetragen und nach dem Einscannen im CAD Programm vermessen. Die folgenden Abbildungen zeigen drei unterschiedliche Profile mit verschiedenem Querschnittsaufbau. Gemessen wurde die Verschiebung der Punkte 1, 2, 12 und 13. Die Abbildungen zeigen jeweils nur eine Seite eines Profils.

Tabelle 17 zeigt die, für den jeweiligen Schichtenaufbau gemittelten, absoluten horizontalen und vertikalen Abweichungen der Punkte vom Ursprungszustand.

Tabelle 18 zeigt die, für den jeweiligen Schichtenaufbau gemittelten, absoluten Abweichungen der Profilmittel und die gemittelte Holzfeuchte und Rohdichte.

Tabelle 17: gemittelte absolute horizontale und vertikale Verschiebungen der Profilmittel in mm der Messung 1

Profil	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 12		Punkt 13	
	Δx	Δy						
Längslagen	5,56	6,89	5,43	5,02	6,19	5,06	6,22	6,76
2 Querlagen	4,25	1,89	4,29	1,45	3,63	1,26	3,55	1,49
Querlage mitte	5,53	4,58	5,52	3,99	6,07	4,37	6,04	4,92

Tabelle 18: gemittelte absolute Verschiebung der Profilmittel und gemittelte Holzfeuchte und Rohdichte der Messung 1

Profil	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 12	Punkt 13	Holzfeuchte u [%]	Rohdichte ρ [kg/m ³]
	Δl [mm]	Δl [mm]	Δl [mm]	Δl [mm]		
Längslagen	8,86	7,39	7,99	9,19	19,3	760,2
2 Querlagen	4,65	4,52	3,84	3,85	18,9	756,6
Querlage mitte	7,18	6,81	7,48	7,79	19,4	758,2

In Tabelle 19 werden die verschiedenen Querschnittsaufbauten miteinander verglichen. Als Vergleichsaufbau dient dabei der beim Biegeprüfkörper verwendete Aufbau mit 2 Querlagen. Aus der Tabelle ist erkenntlich, dass die mittlere Verschiebung der Punkte 1, 2, 12 und 13 doppelt so groß ist, wie beim Profil mit 2 Querlagen. Das Profil mit einer Querlage in der Mitte weist eine um 1,75 mal so große Verschiebung auf.

Tabelle 19: Verhältnisse der gemittelten absoluten Verschiebungen der Profile der Messung 1

Profil	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 12	Punkt 13	Mittelwert
Längslagen	1,91	1,63	2,08	2,38	2,00
2 Querlagen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Querlage mitte	1,54	1,50	1,95	2,02	1,75

In den folgenden Abbildungen ist jeweils ein Profil der drei untersuchten Querschnittsaufbauten dargestellt.

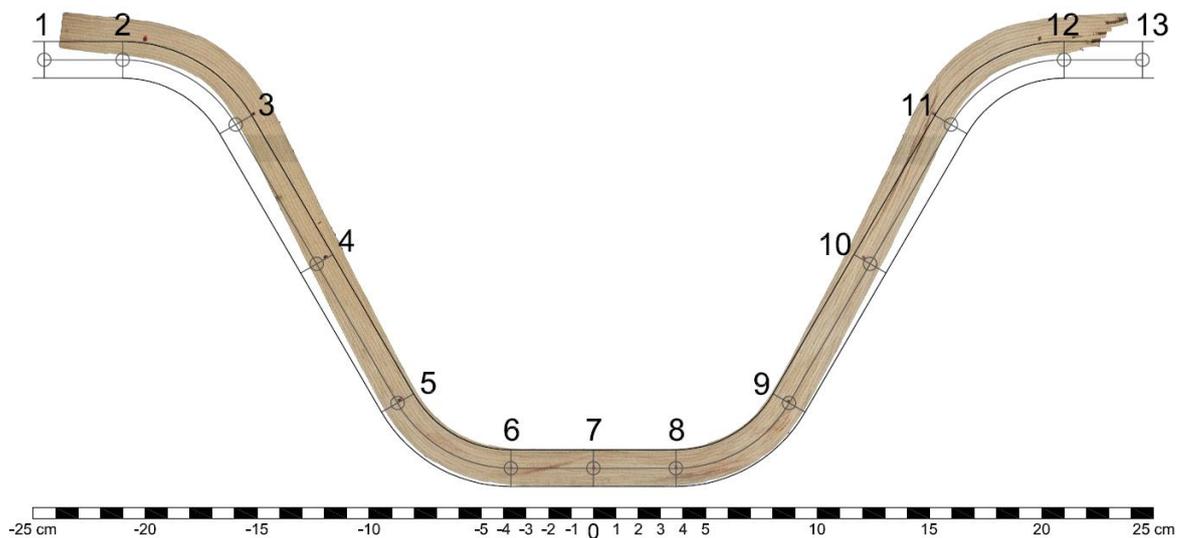


Abbildung 144: Verformung des Profils mit ausschließlich Längslagen; LL_02_01 Messung 1

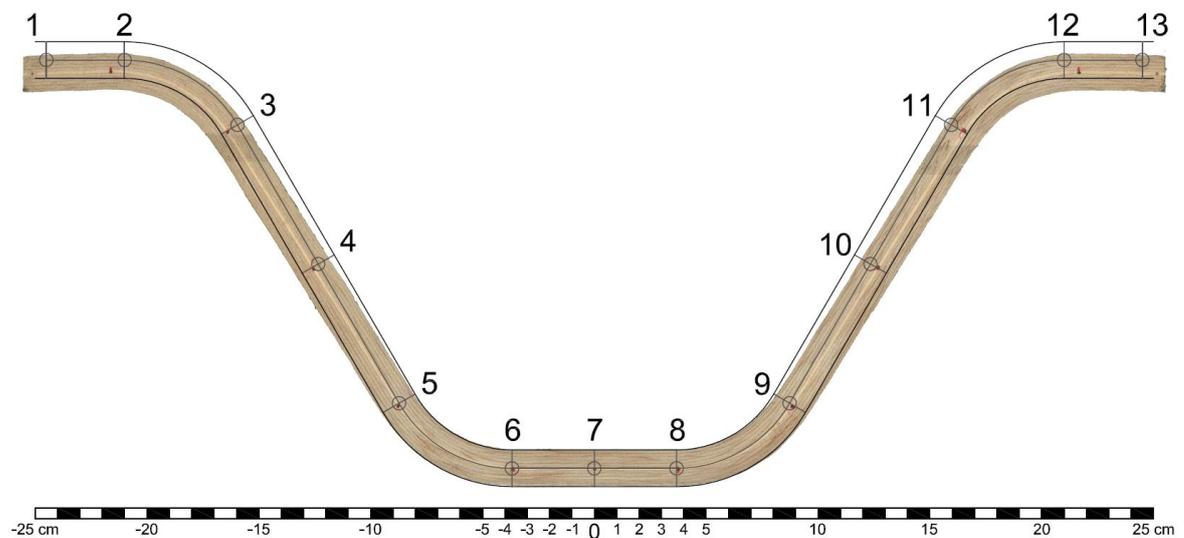


Abbildung 145: Verformung des Profils mit einer Querlage in der Mitte; QLM_01_01 Messung 1

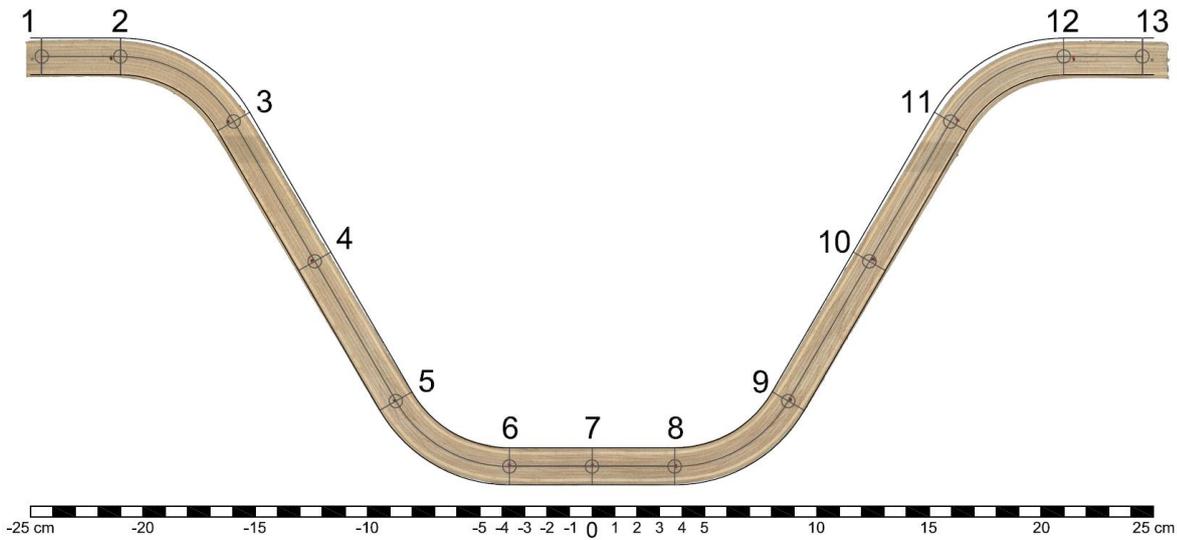


Abbildung 146: Verformung des Profils mit 2 Querlagen; QL2_01_01 Messung 1

9-3.2 MESSUNG 2

Die zweite Messung erfolgte 20 Tage nach dem Pressvorgang. Die Profile wurden für diese Dauer in einer Klimakammer mit 65 % Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 20°C gelagert. Die Profile wurden erst vermessen nach dem sie klimatisiert waren. Klimatisiert ist der Prüfkörper laut ÖNORM EN 408 (2012), wenn er Massekonstanz erreicht hat. Dies gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei Wägungen innerhalb von 6 Stunden um weniger als 0,1 % der Masse des Prüfkörpers abweichen.

Tabelle 20 zeigt die, für den jeweiligen Schichtenaufbau gemittelten, absoluten horizontalen und vertikalen Abweichungen der Punkte vom Ursprungszustand.

Tabelle 21 zeigt die, für den jeweiligen Schichtenaufbau gemittelten, absoluten Abweichungen der Profilpunkte.

Tabelle 20: gemittelte absolute horizontale und vertikale Verschiebungen der Profilpunkte in mm der Messung 2

Profil	Punkt 1		Punkt 2		Punkt 12		Punkt 13	
	Δx	Δy						
Längslagen	0,59	5,63	0,61	4,76	3,30	3,39	3,21	3,30
2 Querlagen	1,01	1,56	1,04	1,28	1,34	0,98	1,34	1,02
Querlage mitte	2,33	4,04	2,36	2,95	2,35	2,87	2,30	3,15

Tabelle 21: gemittelte absolute Verschiebung der Profilpunkte der Messung 2

Profil	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 12	Punkt 13
	Δl [mm]	Δl [mm]	Δl [mm]	Δl [mm]
Längslagen	5,66	4,80	4,73	4,60
2 Querlagen	1,85	1,65	1,66	1,68
Querlage mitte	4,66	3,78	3,71	3,90

In Tabelle 22 werden die verschiedenen Querschnittsaufbauten miteinander verglichen. Als Vergleichsaufbau dient dabei der beim Biegeprüfkörper verwendete Aufbau mit 2 Querlagen. Aus der Tabelle ist erkenntlich, dass die mittlere Verschiebung der Punkte 1, 2, 12 und 13 fast dreimal so groß ist, wie beim Profil mit 2 Querlagen. Das Profil mit einer Querlage in der Mitte weist eine um 2,34 mal so große Verschiebung auf.

Tabelle 22: Verhältnisse der gemittelten absoluten Verschiebungen der Profile der Messung 2

Profil	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 12	Punkt 13	Mittelwert
Längslagen	3,05	2,91	2,85	2,74	2,89
2 Querlagen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Querlage mitte	2,52	2,29	2,24	2,32	2,34

In den folgenden Abbildungen ist jeweils ein Profil der drei untersuchten Querschnittsaufbauten dargestellt.

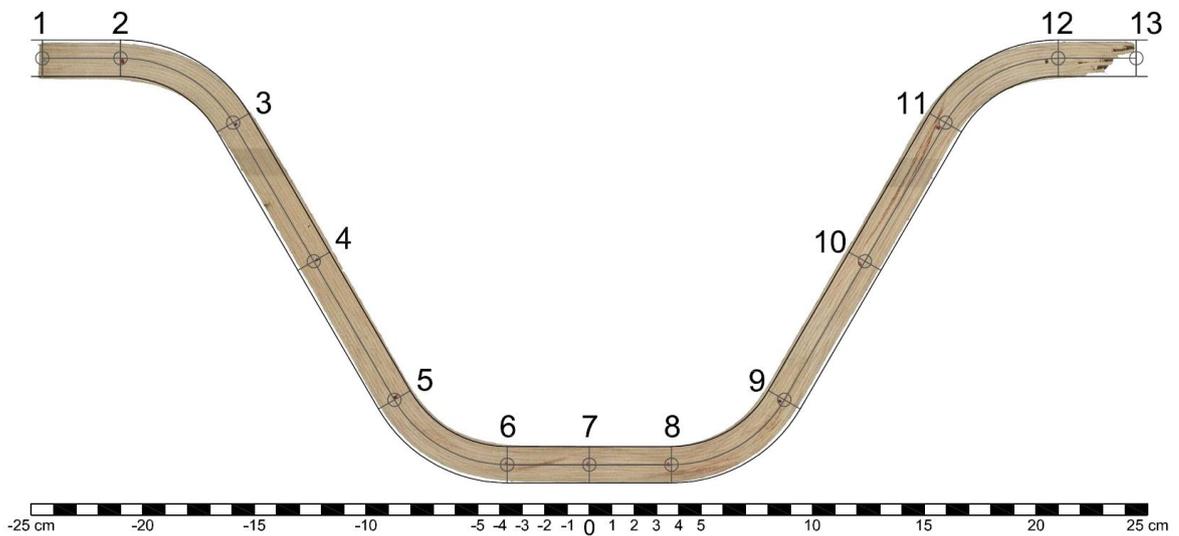


Abbildung 147: Verformung des Profils mit ausschließlich Längslagen; LL_02_01 Messung 2

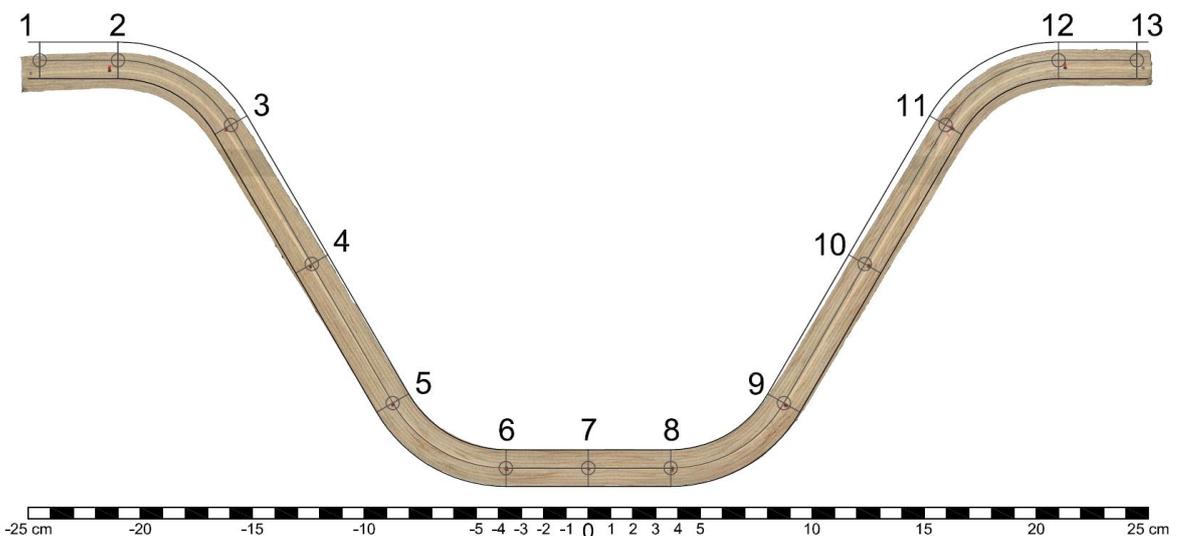


Abbildung 148: Verformung des Profils mit einer Querlage in der Mitte; QLM_01_01 Messung 2

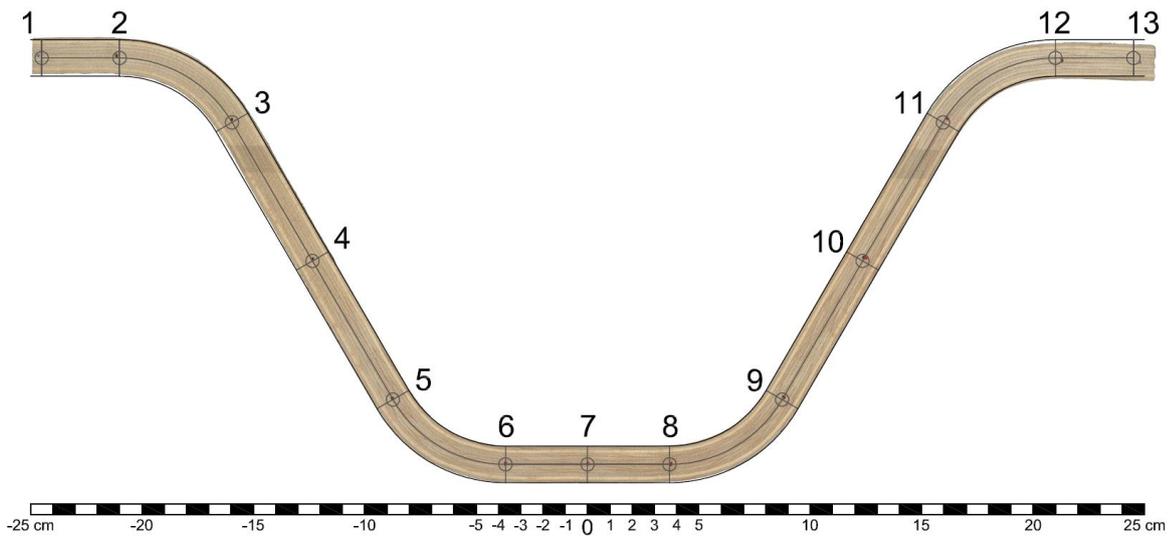


Abbildung 149: Verformung des Profils mit 2 Querlagen; QL2_01_01 Messung 2

9-4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Alle Profile zeigen bei der zweiten Messung einen geringeren Rückstelleffekt. Vor allem beim Profil LL_02 gibt es bei der ersten Messung (Abbildung 144) einen großen Rückstelleffekt, welcher bei der zweiten Messung (Abbildung 147) jedoch nahezu verschwunden ist.

Vergleicht man die gemittelten absoluten Verschiebungen aller Schichtaufbauten miteinander, so kann gesehen werden, dass das Profil mit 2 Querlagen, in der zweiten und zehnten Schicht, den geringsten Rückstelleffekt aufweist und somit den am besten geeigneten Querschnittsaufbau, aller untersuchten, darstellt.

KAPITEL 10: SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Aktuelle Entwicklungen und Publikationen zeigen, dass aus Laubholz, im Besonderen Buche, gewonnene Furniere und die daraus hergestellten Furnierlagenholzprodukte sehr viel Potential beinhalten. Das durch Verkleben von Einzelfurnieren hergestellte Furnierlagenholz weist aufgrund der Homogenisierung geringe Streuungen der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften auf und ist daher für die Herstellung von UHPP-Leichtbauprofilen bestens geeignet. Für die Herstellung der zweidimensionalen umgeformten Profile war es essentiell sich mit der Thematik des Umformprozesses auseinanderzusetzen. Hierbei fand man heraus, dass es durchaus Möglichkeiten gibt, welche eine wirtschaftliche Produktion von UHPP-Leichtbauprofilen ermöglichen.

Die mittels einer gewöhnlichen Furnierpresse hergestellten Prototypen zeigen die einfache Machbarkeit, dieser neuen Holzbauprodukte. Die beim Fertigen der einwelligen und zweiwelligen Prototypen aufgetretenen Probleme der Rissbildung, konnten im Laufe dieser Arbeit durch einfache Überlegungen gelöst werden. Durch das Einlegen einer Zwischenschicht beim Pressen, zwischen Profil und Form, konnte der drei Meter langen Biegeprüfkörpers völlig rissfrei hergestellt werden.

Mit Hilfe des erstellten Berechnungsmodells konnte für die Trapezform der optimale Querschnitt gefunden werden, welcher in weiterer Folge für die Herstellung des drei Meter langen Biegeprüfkörpers verwendet wurde. Das Berechnungsmodell diente dabei der Abschätzung des Potentials eines UHPP-Bauteils hinsichtlich seiner Tragfähigkeit und Steifigkeitseigenschaften. Überdies erwies sich das Berechnungsmodell als sehr praktisch bei der Variation der Parameter und erleichterte dadurch die Formfindung des optimalen Querschnitts immens. Die Herstellung der Form sowie des drei Meter langen Profils, aufgrund der zuvor durchgeführten Querschnittsoptimierung zeigte, dass es möglich war, nur mit einer Schablone, gefräst mit Hilfe einer CNC-Fräse und mit handelsüblichen Tischlereimaschinen, diese problemlos herzustellen. Es können ohne weiteres unterschiedliche Winkel und Rundungen realisiert werden.

Die Prüfung des Bauteils und die daraus erhaltenen Werte liefern in Zusammenhang mit dem Berechnungsmodell ein sehr zuverlässiges Werkzeug zur Abschätzung des Potentials eines UHPP-Bauteils mit trapezförmiger Querschnittsform. Die Prüfung des Trägers zeigt zudem, dass das Trapezprofil in Verbindung mit einer Deckplatte als Verbundbauteil ein vielversprechendes Bauelement für die Zukunft sein kann. Als Einsatzbereich wäre hier die Verwendung als weitgespanntes Deckenelement zu nennen. Zudem kann durch die Verwendung von Schäl furnieren eine ressourcenschonende Verwendung des Baustoffes Holzes gewährleistet werden.

Weiters sei noch erwähnt, dass noch mehr Leistungsvermögen im Bauteil steckt, da beim 4-Punkt-Biegeversuch das gewünschte Biegezugversagen nicht eingetreten ist. Bei der Weiterentwicklung dieses Profils sollte es ein Ziel sein, ein Versagen auf Biegung herbeizuführen. Dies kann durch eine entsprechende weitere Veränderung bzw. Optimierung der Geometrie erreicht werden.

Die durchgeführte Untersuchung des Rückstelleffekts belegt, dass ein Querschnittsaufbau mit zwei Querlagen im Profil den geringsten Rückstelleffekt, im Vergleich zu den anderen untersuchten

Querschnittsaufbauten, verursacht und bestätigt somit die richtige Wahl der Lagenanordnung für den Biegeträger.

Diese Arbeit soll als Grundlage für die weitere Entwicklung von UHHP-Leichtbauprofilen dienen. Für die Weiterentwicklung des trapezförmigen Profils sollte eine FE-Analyse durchgeführt werden, welche, mit den am Einzelfurnier bzw. am ebenen Furnierlagenholz bestimmten Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten, eine genaue Bestimmung des Tragverhaltens ermöglicht.

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

- [1] **Bundeforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft** (BFW) (2011): Waldinventur 2007/09, Zuletzt geprüft am 15.04.2015.
- [2] **Grosser, Dieter** (1977): Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [3] **Wagenführ, Rudi** (2007): Holzatlas. 6., neu bearb. und erw. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag.
- [4] **Schickhofer, Gerhard** (2006): Der Roh- und Werkstoff Holz. Skriptum. **Technische Universität Graz**. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [5] **Moro, José Luis; Rottner, Matthias; Alihodzic, Bernes; Weißbach, Matthias** (2009): Baukonstruktion. vom Prinzip zum Detail. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [6] **Mägdefrau, Karl** (1951): Botanik. Winters Studienführer. Heidleberg: Winter-Verlag.
- [7] **Zimmermann, Tanja; Sell, Jürgen** (1997): Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Laubhölzern. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/35. **EMPA Abteilung Holz**.
- [8] **Krackler, Verena; Keunecke, Daniel; Niemz, Peter** (2010): Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz. In *Entscheidungsgrundlagen zur Förderung von Laubholzverarbeitung und -absatz*, Zuletzt geprüft am 10.05.2015.
- [9] **Knigth, E. Vernon; Wulpi, Meinhard** (1930): Furniere und Sperrholz. Eigenschaften und Herstellung von Furnieren und Sperrholz. 2 Bände. Berlin: M. KRÄYN, Technischer Verlag G.m.b.H., BERLIN W (1).
- [10] **Staudacher, Robert** (2015): Ausgewählte mechanische Kennwerte von Fichten-, Buchen- und Birkenfurnier. Masterarbeit. **Technische Universität Graz**. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [11] **Kalweit, Andreas; Paul, Christof; Peters, Sascha; Wallbaum, Reiner** (2012): Handbuch für technisches Produktdesign. Material und Fertigung ; Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. 2., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI).
- [12] **Danzer Europe Veneer**: Fascination Veneer. Online verfügbar unter www.danzergroup.com, Zuletzt geprüft am 07.04.2015.
- [13] **Kollmann, Franz** (1955): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band II: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, Spananhebende und spanlose Holzbearbeitung, Holzverbindungen. 2 Bände. Berlin, München: Springer-Verlag; J.F. Bergmann (2).
- [14] Norm **DIN 68330**, August 1976: Furniere Begriffe, Deutsches Institut für Normung e. V.
- [15] **Wagenführ, André; Tobisch, Steffen; Emmeler, Rico; Buchelt, Beate; Schulz, Tino** (2011): Furnier im Innenausbau. Definitionen - Eigenschaften - Verarbeitung - Anwendungsbeispiele. Edited by Initiative Furnier + Natur e.V. (IFN). Dresden.

- [16] **Becker, Ralf; Zimmer, Dieter** (2014): *Der Becker: Formholz Kompendium*. 3. Auflage. Minden: Bruns Druckwelt GmbH & Co KG.
- [17] **Kollmann, Franz** (1962): *Furniere, Lagenhölzer und Tischlerplatten. Rohstoffe, Herstellung, Plankosten, Qualitätskontrolle usw.* Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [18] **Dupleix, Anna; Denaud, Louis-Etienne; Blèron, Laurent; Marchal, Remy; Hughes, Mark** (2013): The effect of log heating temperature on the peeling process and veneer quality: beech, birch, and spruce case studies. In *European Journal for Wood Products* 71 (2), Seiten 163–171.
- [19] **Doffiné, E.** (1956): Dämpfgruben für Furniererzeugung. In *Norddeutsche Holzwirtschaft* 1956 (4), Seiten 6–7.
- [20] **Vorreiter, Leopold** (1958): *System Holz - Wasser - Wärme, Holz Trocknung, Dämpfen und Kochen, spanlose Holzverformung. Holztechnologisches Handbuch / mit 68 Tabellen.* Wien [u.a.]: Fromme (Holztechnologisches Handbuch, 2).
- [21] **Rowell, Roger** (2013): *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2. Auflage. Boca Raton: CRC Press.
- [22] **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).
- [23] **Casati Macchine** (2000): *Fila. Furnier- und Plattensäge mit Nachfräsaggregat.* Marnate, Zuletzt geprüft am 09.04.2015.
- [24] **Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS.** Online verfügbar unter <http://www.frischeis.at/produkte/furnier>, Zuletzt geprüft am 09.04.2015.
- [25] **Kollmann, Franz; Kuenzi, Edward; Stamm, Alfred** (1975): *Principles of Wood Science and Technology. Volume II: Wood Based Materials.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- [26] **Fleischer, H. O.** (1949): Experiments in rotary veneer cutting. In *Forest Products Research Society Annual Meeting* 3, Seiten 137–155.
- [27] **Ebert, F. A.** (1950): *Furniertrockenanlagen.* In *Holz* (4).
- [28] **Grenzebach** (2013): *Wood Technology,* Zuletzt geprüft am 13.04.2015.
- [29] **Fiwek, Wolfgang** (2011): *Holz biegen.* Hannover: Vincentz Network.
- [30] **Kollmann, Franz** (1952): Über das Biegen der Hölzer. In *Holz-Zentralblatt* 78 (104), Seiten 1439–1440.
- [31] **Jensen, Martin** (1941): *Method of making ariplane structures.* Angemeldet von Jensen am 20.09.1941. Anmeldenummer 411663. Patent Nr. 2388485.
- [32] **Stevens, William; Turner, N.** (1948): *Solid and Laminated Wood Bending:* H.M. Stationery Office.
- [33] **Wilson, T** (1941): *Wood bending.* In *Forest Products Laboratory* 966.
- [34] **Prodehl, A** (1930): *Untersuchungen über das Biegen gedämpften Holzes.* Dissertation. **Technische Hochschule Dresden.**

- [35] **Rosenthal, Michael** (2009): Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz. Dissertation. **Technische Universität Dresden**. Fakultät Maschinenwesen.
- [36] **Wagenführ, André; Buchelt, Beate; Pfriem, Alexander** (2006): Material behaviour of veneer during multidimensional moulding. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 64, Seiten 83–89.
- [37] **Wagenführ, Rudi; Scheiber, Chr.** (1985): Holzatlas. 2. Auflage. Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- [38] **Kossatz, Gert; Klieber, Eberhard** (1955): Vergütete Hölzer, plan gepreßt und spanlos verformt. In *Schriftenreihe des Institutes für Ausbautechnik im Hochbau der Technischen Hochschule Dresden* (4).
- [39] **Heebink, Bruce** (1953): Fluid-Pressure Molding of Plywood. Edited by United States Departement of Agriculture - Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin (R1624).
- [40] **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, Seiten 151–159.
- [41] **Sandweg, Karl** (1957): 20 Jahre Hochfrequenz-Holzverleimung. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 15 (4), Seiten 174–189, Zuletzt geprüft am 21.03.2015.
- [42] Langzauner Composite Pressen. Online verfügbar unter <http://www.langzauner.at/>, Zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- [43] **Kollmann, Franz** (1951): Herstellung von geformten Sperrholz- und Schichtholzteilen. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 9 (11), Seiten 416–422, Zuletzt geprüft am 30.04.2015.
- [44] **De Zanet, Benigno** (1997): Process and machine for manufacturing shaped profiles in curved plywood for covering columns and the like. Angemeldet von Xiloform S.p.A. am 25.07.1997. Anmeldenummer 97202352.7. Patent Nr. EP 0 822 042 A2. B27D 1/08.
- [45] **Barth GmbH** (2014): Innovative Lösungen. Pressen, Vakuumpressen, Arbeitstische. 2014/2015.
- [46] **Simonds, H.; Weith, A.; Bigelow, M.**: Biegen und Formpressen von Lagenhölzern.
- [47] ISTR-A SIA (2013): VPR-3000 Vacuum Membrane Press, Zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- [48] Vakuumpressen, Membranpressen und Vakuumsack von Columbus. Online verfügbar unter <http://www.columbus-tech.com/>, Zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- [49] **Rüsch, Fritz; Sander, Paul** (1941): Ein bauchiges Faß aus Sperrholz. In *Holz als Roh- und Werkstoff* 4 (9), Seiten 325–327.
- [50] **Srinivasan, Narayana; Jayaraman, Krishnan; Bhattacharyya, Debes** (2008): Profile production in multi-veneer sheets by continuous roll forming. In *Holzforschung* 62 (4), Seiten 453–480.
- [51] **Gilbert, Benoit; Hancock, Steven; Bailleres, Henri** (2014): Thin-Walled Timber Structures. In *Materials and Joints in Timber Structures* (9), Seiten 119–128.
- [52] **Underhill, Ian; Gilbert, Benoit; Bailleres, Henri; McGavin, Robbie; Patterson, Dale** (2014): Structural Veneer Based Composite Products from Hardwood Thinning – Part I:

- Background and Manufacturing. In *Materials and Joints in Timber Structures* (9), Seiten 577–588.
- [53] **Srinivasan, Narayana; Bhattacharyya, Debes; Jayaraman, Krishnan** (2007): Thermoforming of wood veneer composite sheets. In *Holzforschung* 61 (5).
- [54] **Henkel Central Eastern Europe GmbH**: Pattex PV/H Holzleim Wasserfest. Datenblatt. Wien.
- [55] Dynea AS (2012): Technisches Merkblatt Prefere 4546. Flüssiger Melaminharzkleber für den Holzleimbau. **Dynea AS**.
- [56] **Fritz, Bernhard** (1961): Verbundträger. Berechnungsverfahren für die Brückenbaupraxis. Berlin [u.a.]: Springer.
- [57] **Schelling, Wolfgang** (1968): Die Berechnung nachgiebig verbundener, zusammengesetzter Biegeträger im Ingenieurholzbau. Dissertation. **Universität (TH) Karlsruhe**.
- [58] **Hamm, Patricia; Richter, Antje** (2009): Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken. In *Fachtagungen Holzbau*, Seiten 9–18.
- [59] **Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH** (2014a): Leistungserklärung PM-001-2013. Furnierschichtholz aus Buche. Creuzburg.
- [60] **Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH** (2014b): Ingenious Hardwood. Creuzburg, Zuletzt geprüft am 07.04.2015.
- [61] Norm **ÖNORM EN 14358**, 01.04.2007: Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [62] **Purbond** (2011): PURBOND HB S309. 1K-Polyurethanklebstoff zur Herstellung von tragenden Holzbauteilen.
- [63] Norm **ÖNORM EN 14374**, 01.02.2005: Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen, ON Österreichisches Normungsinstitut.
- [64] Norm **ÖNORM EN 408**, 01.09.2012: Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, ON Österreichisches Normungsinstitut.

A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Baumartenverteilung in Flächenprozent (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW); 2011)	1
Abbildung 2: mögliches Deckenelement mit Trapezprofilen und einer Deckplatte als Holz-Holz-Verbundbauteil	3
Abbildung 3: Trapezprofil im Schnitt vor dem Verbund mit einer Deckplatte	3
Abbildung 4: Rotbuchenbaum und Blätter (Schickhofer; 2006) leicht gefladerte Holzstruktur durch Jahresringausbildung, gedämpft und fast schlichte Struktur, ungedämpft (Wagenführ; 2007)	6
Abbildung 5: aufgeschnittener Baumstamm und seine Strukturmerkmale (Moro et al.; 2009)	7
Abbildung 6: Ausschnitt aus dem Holzkörper, dem Kambium und dem Bast eines zerstreutporigen Laubholzes in dreidimensionaler Darstellung (Mägdefrau; 1951)	8

Abbildung 7: Zellwandmodell (Zimmermann, Sell; 1997).....	9
Abbildung 8: Auswahl an verschiedenen Furnieren (Danzer Europe Veneer)	11
Abbildung 9: Einteilung der Furnierarten nach DIN 68330 (1976)	12
Abbildung 10: Furniererzeugungsprozess im Überblick (Becker, Zimmer; 2014).....	13
Abbildung 11: Entrindungsvorgang mittels Fräse (Danzer Europe Veneer).....	14
Abbildung 12: Eisenklammern zur Verhütung von Endrissen a) Bügelform b) C-Klammer c) S-Klammer und Anordnung von S-Klammern im Rundholz (Kollmann; 1962).....	14
Abbildung 13: gefüllte und leere Kochgrube	16
Abbildung 14: Einfluss der Aufheiztemperatur auf die Dickenschwankung (Dupleix et al.; 2013).....	16
Abbildung 15: Einfluss der Aufheiztemperatur auf den Rissindex (CI) und Funktionsprinzip des Fuitometers (Dupleix et al.; 2013)	17
Abbildung 16: Dämpfgrube für direkte Beheizung (Doffiné; 1956).....	18
Abbildung 17: Dämpfgrube für indirekte Beheizung (Doffiné; 1956).....	18
Abbildung 18: Furnier-Gattersäge in Betrieb. Der Lattenverschlag verdeckt den Kurbeltrieb zwecks Unfallverhütung (Kollmann; 1962).....	20
Abbildung 19: Furnier- und Plattensäge mit Nachfräsaggregat Typ FILA (Casati Macchine; 2000) ..	21
Abbildung 20: Eiche Blume und Eiche Streife (Becker, Zimmer; 2014).....	21
Abbildung 21: Flachmessern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	22
Abbildung 22: Echt-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	22
Abbildung 23: Faux-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	23
Abbildung 24: Flach-Quartier-Messern (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	23
Abbildung 25: Teile und Wirkung eines Schneidwerkes von Furniermessermaschinen (Vorreiter; 1963).....	24
Abbildung 26: Einheben eines Blockes, Messervorgang beim senkrechten Furniermessern, Restbohle auf Unterdruckhalterung, Messer- und Druckbalken	25
Abbildung 27: Anordnung von Messer und Druckleiste mit zugehörigen geometrischen Bedingungen (Kollmann; 1962)	26
Abbildung 28: Schältechnik beim Halbrundschälen (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	27
Abbildung 29: Schältechnik beim Riftschälen (Danzer Europe Veneer) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	27
Abbildung 30: Schältechnik beim Aus-dem-Herzen-Schälen (Danzer Europe Veneer) (Wagenführ et al.; 2011) und Darstellung am Stamm (Furnier & Schnittholz von FRISCHEIS)	28
Abbildung 31: Schältechnik beim Rundschälen (Danzer Europe Veneer)	28

Abbildung 32: Spindel mit zurückfahrbare Außenklaue und angeschälter Rundholzstamm, Restbohlen mit zusätzlicher Abstützung und Werkzeugschlitten mit Messer- und Druckbalken.....	29
Abbildung 33: Gesamtausbeute (Abfall, Anschäler, endloses Furnierband, Restrolle) beim normalen Rundschälen und wichtigste Größen beim Schnittvorgang in Rundschälmaschinen (Kollmann; 1962)	30
Abbildung 34: zu starker Druck des Druckbalkens mit dennoch exzellenter Furnierqualität und Schneidvorgang ohne Druckbalken mit Schälrisse (Fleischer; 1949)	30
Abbildung 35: schematische Darstellung des Spiralfurnierschälens (Vorreiter; 1963)	31
Abbildung 36: Durchlauffurniertrockenanlage mit Rollenförderung (Grenzebach; 2013)	33
Abbildung 37: Scherenarten, h) Schneiden-Übergriff und i) Schnittkerbe (Vorreiter; 1963).....	34
Abbildung 38: ägyptisches Schiffsmodell, Grabbeigabe des Tutanchamun-Grabes (Fiwek; 2011).....	36
Abbildung 39: Zargenaußenform und fertige Zarge einer Geige (Fiwek; 2011)	36
Abbildung 40: Thonet Stuhl „Nr. 14“ (Wiener Kaffeehausstuhl) (Fiwek; 2011)	37
Abbildung 41: Flugzeugflügel aus Holz mit Verwendung von gepressten Formhölzern aus Furnieren und Pressform mit Furnieren für ein I-Profil (Jensen; 1941)	38
Abbildung 42: dreidimensional geformte Sitzschale (Fiwek; 2011).....	38
Abbildung 43: Furnierzuschnittmuster vor dem Pressvorgang und gepresste Sitzschale mit dargestellten Einkerbkanten (Becker, Zimmer; 2014)	39
Abbildung 44: Zahlensymbole für biegetechnische Berechnungen nach Wilson (1941) und Prodehl (1930)	40
Abbildung 45: Verschiebung der neutralen Faser a) Ausgangszustand b) ungedämpft gebogen c) gedämpft gebogen d) gedämpft und mit Zugband gebogen (Vorreiter; 1958); Biegen mittels Zugband, A Anfangsstufe, B Endstufe (Kollmann; 1955)	41
Abbildung 46: Biegung eines Furniers normal zur Faser	42
Abbildung 47: Biegung eines Furniers parallel zur Faser	42
Abbildung 48: Versuch zur Ermittlung des Biegeradius von Furnieren (Kossatz, Klieber; 1955)	44
Abbildung 49: Tangentialschnitt mit M Markstrahl, Holzstrahl; J Jahrring (Wagenführ, Scheiber; 1985).....	45
Abbildung 50: mikroskopische Aufnahme von gerissenem Buchenfurnier, Seitenansicht (Palubicki et al.; 2010) und schematische Darstellung des Rissentstehungsvorgangs (Becker, Zimmer; 2014)	46
Abbildung 51: SMOF Belichtungsanordnung und ausgewertetes Bild eines gerissenen Furniers mit den ermittelten Risstiefen (Palubicki et al.; 2010)	46
Abbildung 52: formgepresstes Sperrholz aus 1,5 mm starken Buchenfurnieren mit 2 Querlagen	47
Abbildung 53: Formpressvorgang (Becker, Zimmer; 2014)	47
Abbildung 54: a) Formteil aus Lagenholz kurz vor Ende der Schließzeit b) Spannungszustand in den einzelnen Furnierlagen kurz vor Ende der Schließzeit nach Kossatz, Klieber (1955)	48
Abbildung 55: a) Formteil aus Lagenholz am Ende der Schließzeit und während der Aushärtezeit b) Spannungszustand im Gesamtquerschnitt nach Abbinden des Klebstoffs c) Spannungszustand am	

Ende der Schließzeit d) Spannungszustand nach dem Spannungsausgleich im Verlaufe der Aushärtezeit nach Kossatz, Klieber (1955).....	48
Abbildung 56: Hochfrequenz-Schichtskiverleimanlage aus dem Jahr 1957 (Sandweg; 1957) und moderne Skipresse für Alpinski mit einer Gesamtpresskraft von 900 kN (Langzauner Composite Pressen)	50
Abbildung 57: Einkolbenpresse, Dreikolbenpresse und Vierkolbenpresse (Becker, Zimmer; 2014) ...	50
Abbildung 58: Diagramm bei Anwendung senkrechten Drucks auf eine halbrunde Form (Kollmann; 1955).....	51
Abbildung 59: Schema einer Schlauchpressenanordnung zum Überfurnieren von Möbelteilen (Kollmann; 1955)	51
Abbildung 60: Gummisackformung außerhalb der Form (Kollmann; 1955).....	52
Abbildung 61: Gummisack als Hülle über einer Patrize und über einer Matrize (Kollmann; 1955)	52
Abbildung 62: Formpressverfahren mittels innenliegendem Gummisack (Kollmann; 1955) und Ablauf des Verfahrens von De Zanet (1997)	53
Abbildung 63: Formpressen mittels Vakuumsack über einer Einzelform nach Simonds et al.	54
Abbildung 64: geöffnete Membran-Vakuum-Pressen (ISTRA-A SIA; 2013) und Membran-Vakuum-Pressen mit eingespannter Form und Heizhaube (Vakuumpressen, Membranpressen und Vakuumsack von Columbus)	54
Abbildung 65: Wickelvorgang von Hohlkörpern aus schräggeführten Furnierbändern (Vorreiter; 1958) und Herstellung eines bauchigen Sperrholzfassens (Rüsch, Sander; 1941)	55
Abbildung 66: typischer Walzformprozess und Wellblechprofil (Srinivasan et al.; 2008)	56
Abbildung 67: Maschine zur Bestimmung der Koordinaten des gefertigten Profils und Walztest mit dargestellter Verformungslänge (Srinivasan et al.; 2008)	56
Abbildung 68: hergestellte C-Profile a) ohne Beulsteife b) mit Beulsteife (Gilbert et al.; 2014)	57
Abbildung 69: Fertigungsprozess und fertige C-Profile (Gilbert et al.; 2014).....	58
Abbildung 70: Prüfkfiguration für den Typ A Querschnitt a) Ansicht Flansch b) Ansicht Steg und Testergebnisse für die horizontale Verschiebung am Typ A (Gilbert et al.; 2014).....	58
Abbildung 71: verschiedene an der Griffith University (Brisbane, Australien) hergestellte Profile a) rundes Hohlprofil b) rechteckiges Hohlprofil c) C-Profil d) I-Profil (Underhill et al.; 2014)	59
Abbildung 72: Herstellungsprozess von Profilen aus Furnierlagenholz (Underhill et al.; 2014).....	60
Abbildung 73: a) Trapezstahlpressform mit temperaturogepresstem Profil aus 3 Furnierschichten b) Wellblechform aus Stahl mit temperaturogepresstem Profil aus 3 Furnierschichten (Srinivasan et al.; 2007).....	60
Abbildung 74: schematische Darstellung des Rückstelleffekts (Srinivasan et al.; 2007)	61
Abbildung 75: Anordnung der Schichten bei den Proben und Ergebnisse des Rückstelleffekts (Srinivasan et al.; 2007).....	62
Abbildung 76: Überlagerung Walzenprofil (1) und geformter Probekörper (2) (Srinivasan et al.; 2008)	63
Abbildung 77: 1. Form Trapezprofil einwellig, Maße in mm	65

Abbildung 78: 1. Form Trapezprofil zweiwellig, Maße in mm	66
Abbildung 79: Matrize einwellig	66
Abbildung 80: Fräsvorgang für die zweiwellige Matrize und fertige Pressform	66
Abbildung 81: Prototyp 1 einwellig nach dem Pressvorgang und nach dem Zuschneiden.....	68
Abbildung 82: Klebstoffauftrag und Schichten der Furniere	69
Abbildung 83: Form kurz vor dem Pressvorgang und fertiges Profil	69
Abbildung 84: Furnierpapierrolle ungelocht und mittels Furnierpapier gefügte Furniere	70
Abbildung 85: Prototyp 3 zweiwellig.....	71
Abbildung 86: gefügte und verstärkte Furniere.....	72
Abbildung 87: Pressvorgang zweiwelliges Profil	72
Abbildung 88: zweiwelliges Profil nach dem Pressvorgang	73
Abbildung 89: Detailaufnahme des gerissenen Bereichs	73
Abbildung 90: mit Klebstoff versehener Stoß und fertige Verbindung nach dem Pressen.....	74
Abbildung 91: Bilder Prototyp 5	75
Abbildung 92: einwelliges Profil mit Deckplatte aus Kerto Q.....	76
Abbildung 93: einwelliges Profil mit Deckplatte aus Buchensperrholz.....	76
Abbildung 94: zweiwelliges Profil mit Deckplatte aus Buchensperrholz	76
Abbildung 95: variable Querschnittsabmessungen für das Bauteil.....	77
Abbildung 96: betrachtete Tragsysteme	78
Abbildung 97: Querschnittsdarstellung aus Excel und zugehöriger Normalspannungsverlauf	81
Abbildung 98: Punkte in denen die Schubspannung ermittelt wurde und Schubfluss	81
Abbildung 99: qualitativer Schubspannungsverlauf	82
Abbildung 100: Schwingungen in der ersten Eigenform am Einfeldträger (Hamm, Richter; 2009)	83
Abbildung 101: Zusammenhang Frequenz und abgegebene Kraft beim Gehen (Hamm, Richter; 2009)	84
Abbildung 102: Ablaufdiagramm zur Nachweisführung für Schwingungen (Hamm, Richter; 2009) .	85
Abbildung 103: Grenzwerte abhängig von subjektiven Bewertungen und Nutzung bzw. Einbaulage (Hamm, Richter; 2009).....	85
Abbildung 104: Platte BauBuche (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH; 2014b)	86
Abbildung 105: variable Querschnittsabmessungen für das Bauteil.....	88
Abbildung 106: Diagramm bei Anwendung senkrechten Drucks auf eine halbrunde Form (Kollmann; 1955).....	90
Abbildung 107: gewählte Querschnittsform nach erster Parametervariation.....	90
Abbildung 108: Betrachtetes statisches System mit zugehörigen Abmessungen	91
Abbildung 109: Gegenüberstellung des optimiertem mit dem bereits vorhandenem Profil	92
Abbildung 110: Vergleich der Eingabevariationen	93

Abbildung 111: Bauablauf Matrize im Querschnitt	94
Abbildung 112: Ermittlung des Plattenabstands	95
Abbildung 113: Übertragen der Schablonenform auf die Fichtenplatten und grobes Zuschneiden mit der Bandsäge	97
Abbildung 114: Fräsvorgang mittels Kopiervorrichtung und fertig gefrästes Grundelement der Form	97
Abbildung 115: Grundgerüst und bereits zum Teil aufgeschraubte Eschenbretter bzw. -leisten.....	97
Abbildung 116: Erhitzen der Platte mittels Heißluftföhn und anschrauben derselben	98
Abbildung 117: teilweise fertiggestellte Matrize und fertige Matrize	98
Abbildung 118: Zuschnitt der Furniere mit der Kreissäge und gefügte Querlage	99
Abbildung 119: Klebstoffauftrag und auf der Matrize aufgelegte, mit Kleber versehene Furnierlagen	99
Abbildung 120: offene und geschlossene Presse mit Form.....	100
Abbildung 121: gepresste Deckplatte und Stirnfläche der Platte	101
Abbildung 122: "Querschot" und außen aufgeklebte Auflagerverstärkung	101
Abbildung 123: Klebstoffauftrag und Profil mit aufgeklebter Deckplatte vor dem Zuschneiden	102
Abbildung 124: fertiggestellter Prüfkörper	103
Abbildung 125: Ansicht der Biegeprüfkonfiguration.....	104
Abbildung 126: Draufsicht der Biegeprüfkonfiguration	104
Abbildung 127: Prüfkörper mit angebrachten Messeinrichtungen.....	105
Abbildung 128: 4-Punkt-Biegeversuch mit zugehörigen Schnittkraftverläufen	106
Abbildung 129: Nagel zur Aufhängung des Messgestänges und Darstellung des gesamten Prüfaufbaus	106
Abbildung 130: Beispiel einer typischen Hystereseschleife	107
Abbildung 131: Lastverformungskurve innerhalb eines Bereichs der elastischen Verformung (ÖNORM EN 408; 2012).....	108
Abbildung 132: Träger kurz vor Erreichen der Maximallast	109
Abbildung 133: Versagen des Trägers an der "Nordseite".....	109
Abbildung 134: Versagen des Trägers an der "Südseite"	110
Abbildung 135: Kraft-Zeit Diagramm des 4-Punkt-Biegeversuchs	110
Abbildung 136: Kraft-Weg Diagramm der lokalen Wegaufnehmer	111
Abbildung 137: Diagramm zur Überprüfung des linear-elastischen Bereichs der lokalen Wegmessung	111
Abbildung 138: Kraft-Zeit Diagramm des 4-Punkt-Biegeversuchs	112
Abbildung 139: Kraft-Weg Diagramm der globalen Wegaufnehmer	113
Abbildung 140: Diagramm zur Überprüfung des linear-elastischen Bereichs der globalen Wegmessung	113
Abbildung 141: Abmessungen des Einfeldträgers mit 2 Kräften in mm	115

Abbildung 142: Vergleich Versuch mit Berechnungsmodell im Kraft-Weg Diagramm	116
Abbildung 143: zugeschnittene Versuchskörper	117
Abbildung 144: Verformung des Profils mit ausschließlich Längslagen; LL_02_01 Messung 1.....	119
Abbildung 145: Verformung des Profils mit einer Querlage in der Mitte; QLm_01_01 Messung 1..	119
Abbildung 146: Verformung des Profils mit 2 Querlagen; QL2_01_01 Messung 1	120
Abbildung 147: Verformung des Profils mit ausschließlich Längslagen; LL_02_01 Messung 2.....	121
Abbildung 148: Verformung des Profils mit einer Querlage in der Mitte; QLm_01_01 Messung 2..	121
Abbildung 149: Verformung des Profils mit 2 Querlagen; QL2_01_01 Messung 2	122

A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Baumartenentwicklung im Ertragswald (in 1000 ha) (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW); 2011)	2
Tabelle 2: mittels Regressionsgleichungen berechnete Biegeradien und Verhältnis der minimalen Biegeradien normal und parallel zur Faserrichtung (Wagenführ et al.; 2006)	43
Tabelle 3: zulässige Biegeradien für Rotbuchenschäl furniere (Kossatz, Klieber; 1955)	44
Tabelle 4: Grenzwerte für den kleinstzulässigen Krümmungsradius bei Furnieren normal zur Faser (Kollmann; 1955)	44
Tabelle 5: Querschnittswerte der Profile (Gilbert et al.; 2014)	57
Tabelle 6: Prüfergebnisse der Druckprüfungen (Gilbert et al.; 2014)	59
Tabelle 7: Festigkeitskennwerte der Platte aus BauBuche in N/mm ² und Rohdichten in kg/m ³ (Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH; 2014b)	86
Tabelle 8: Faktor k_s zur Berücksichtigung der Prüfkörperanzahl (ÖNORM EN 14358; 2007).....	87
Tabelle 9: ermittelte Mittelwerte für die BauBuche S (nur längsorientierte Schichten) in N/mm ²	88
Tabelle 10: ermittelte mean Werte für die BauBuche Q (mit querorientierten Schichten) in N/mm ² ...	88
Tabelle 11: gewählte Festigkeiten für die Nachweisführung	91
Tabelle 12: Zusammenfassung der berechneten Querschnittswerte und Nachweise des gewählten Profils	91
Tabelle 13: Kennwerte der hergestellten Profile	100
Tabelle 14: Querschnittswerte ermittelt aus dem 4-Punkt-Biegeversuch.....	114
Tabelle 15: Querschnittswerte im Berechnungsmodell	115
Tabelle 16: Vergleich Durchbiegung Berechnungsmodell mit der globalen Durchbiegung aus dem Versuch.....	115
Tabelle 17: gemittelte absolute horizontale und vertikale Verschiebungen der Profilmittelpunkte in mm der Messung 1	118
Tabelle 18: gemittelte absolute Verschiebung der Profilmittelpunkte und gemittelte Holzfeuchte und Rohdichte der Messung 1	118

Tabelle 19: Verhältnisse der gemittelten absoluten Verschiebungen der Profile der Messung 1	119
Tabelle 20: gemittelte absolute horizontale und vertikale Verschiebungen der Profilpunkte in mm der Messung 2	120
Tabelle 21: gemittelte absolute Verschiebung der Profilpunkte der Messung 2	120
Tabelle 22: Verhältnisse der gemittelten absoluten Verschiebungen der Profile der Messung 2	121

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