

Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
CH-8093 Zürich

Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 39

Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz

Wald&Holz Projekt Nr. 2005.09

Bearbeitungszeitraum: März 2006- März 2007

Peter Niemz
Leiter Arbeitsgruppe Holzphysik

Thomas Schnider
Bearbeiter

Zürich, den 23.3.2007

Impressum

Verfasser

Thomas Schnider
Feldgass 18
CH-6170 Schüpfheim

Erstprüfender Dozierender

Dr. Andreas Hurst
Fachbereichsleiter Holz, AHB Biel

Zweitprüfender Dozierender

Dr. Ernst Zürcher
Dozent für Werkstoffkunde, AHB Biel

Experte

Hermann Blumer
Dipl. Bauing. ETH/SIA

Anschrift der BFH Biel

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Abteilung Holz
Solothurnstrasse 102
Postfach
CH 2504 Biel

Praktikumsstelle

ETH Zürich
Institut für Baustoffe (IfB), Holzphysik
Schafmattstrasse 6
CH - 8093 Zürich

©2007

CH 8093 Zürich

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form schriftlich oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei der ETH einzuholen.

Abstract

Die zentrale Aufgabe dieser Diplomarbeit ist die Förderung des Absatzes von Schweizer Laubholz mittlerer Stammabschnitte durch erhöhte Wertschöpfung. Insbesondere beim Stammstück nach dem Erdstamm, dem so genannten mittleren Stammabschnitt.

Der Absatzmarkt von Laubholz in Zentraleuropa weist eine gewisse Stagnation auf. Zusätzlich wurden preisgünstige Laubhölzer in die Schweiz importiert. Beide Prozesse fördern das Überangebot an Laubholz des mittleren Stammabschnitts auf dem Schweizmarkt. Besonders bei der Laubholzart Buche gestaltet sich die Verwendung des mittleren Stammabschnittes als schwierig. Dieses Holz besitzt grosse Eigenspannungen, das die Verwendung für hochwertige Sortimente unmöglich macht. Früher setzte man dieses Buchenholz in der Eisenbahnschwellenproduktion ein und anschliessend verwendete man sie im Gartenbau oder auf Kinderspielplätzen. Durch das im September 2001 in Kraft getretene Gesetz, dass die Verwendung von Teeröl imprägnierten Holzschwellen im Gemüsegartenbau und bei Kinderspielplätzen untersagt, zeichnet sich ein deutlicher Rückgang des Absatzes von Holzschwellen ab.

Ein Ansatzpunkt für die Förderung des Absatzes sieht man in der Eingliederung von Buchenholz des mittleren Stammabschnittes in neue Anwendungsgebiete, wie Innenausbau oder Möbelbau. Erste Erfolge auf diesem Weg erzielte man durch Auf trennen und Zusammenfügen sowie auch durch eine Wärmebehandlung, oft auch als thermische Behandlung bezeichnet. Dabei wird das Holz zwischen 120°C und 200°C in einer sauerstoffarmen Atmosphäre erwärmt. Durch diese thermische Behandlung reduzieren sich die unerwünschten Eigenspannungen im Buchenholz. Das Ziel ist es, das thermisch behandelte Buchenholz auf die mögliche Weiterverarbeitung zu verklebten Profilen oder ein- oder mehrschichtiger Platten zu prüfen.

Beim Einschnitt von Buchenholz des mittleren Stammabschnittes zeigte sich, dass durch eine Querschnittsverkleinerung der Bretter kein Abbau der wuchsbedingten Eigenspannungen im Buchenholz statt findet. Bei Vorversuchen zur Verklebung stellte man fest, dass sich 1-K PUR Klebstoff (Einkomponenten Polyurethan) für die Verklebung von thermisch behandeltem Buchenholz am besten eignet. Dabei konnte durch eine Vorbehandlung mit Wasser die zu geringe Holzfeuchtigkeit bei thermisch behandeltem Holz ausgeglichen werden. Anschliessend wurden dreischichtige Massivholzplatten und Fensterprofile aus thermisch vergütetem und unvergütetem Buchenholz hergestellt.

Bei den Hauptversuchen zeigte sich eine eindeutige Verbesserung von Fensterprofilen aus thermisch behandeltem Buchenholz gegenüber unbehandeltem Buchenholz bei einer natürlichen Bewitterung. Bei den hergestellten Dreischichtplatten reduzierte sich der geprüfte Plattenverzug um 64%, die behinderte Quellung um 63% und die freie Quellung um 44%. Delaminirungsversuche haben nur eine geringe Minderung der Klebfugenfestigkeit im Wechselklima ergeben.

Eine thermische Behandlung von Buchenholz des mittleren Stammabschnittes zeigte klar die Reduzierung der Eigenspannungen. Die Herstellung von Profilen und mehrschichtigen Platten aus thermisch behandeltem Buchenholz stellen ein gutes Ersatzprodukt für den versiegenden Absatzkanal der Holzschellenproduktion dar. Dabei könnten fromstabile und tragfähige Dreischichtplatten oder Latten mit einem Kern aus thermisch behandeltem Buchenholz und Beplankungen aus unbehandelten hergestellt werden. Diese könnten im Aussenbereich von Wand- und Dachelementen als Konterlattung oder zu Versteifung eingesetzt werden.

Vorwort

Im vierjährigen Studienlehrgang zum Holzingenieur FH an der Berner Fachhochschule für Architektur, Holz und Bau in Biel ist ein einjähriges Praktikum vorgesehen. Dieses Praktikum soll einen Bogen vom theoretischen Wissen zur praktischen Anwendung dieses Wissens schlagen. Ich absolvierte mein Praktikum an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich am Institut für Baustoffe bei der Arbeitsgruppe für Holzphysik.

In dieser Zeit schrieb ich auch meine Diplomarbeit über das Thema:

Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz für neuartige Holzwerkstoffe.

Am Thema interessierte mich vor allem das Überführen von sonst minderwertigem Holz zu einem hochwertigen Produkt, das zu einer Erhöhung der Wertschöpfung des Holzes beitragen kann.

Im Verlaufe meiner Arbeit im Institut für Baustoffe hatte ich nicht nur die Gelegenheit in ein umfassendes Gebiet der Holzforschung Einblick zu erhalten, sondern kam auch mit anderen Gebieten des Bereiches Baustoffe in Kontakt.

Zum Schluss bleibt mir nur noch allen beteiligten Personen, die an der Entstehung meiner Diplomarbeit mithalfen, recht herzlich zu danken.

Das sind zum einen die Industriepartner Balz Holz AG, Purbond AG, Geistlich Ligamenta AG, Fensterfabrik Albisrieden AG, Bauwerk Parkett AG und Corbat Holding SA, die mir Versuchsmaterial und Gedankenanstösse von Seiten der Industrie gaben.

Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr. Ing. habil. Peter Niemz und allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Holzphysik. Sie hatten immer ein offenes Ohr für meine Probleme und gute Ratschläge.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Andreas Hurst und Dr. Ernst Zürcher, die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Dr. Hurst regte die Arbeit an und gab mir viele wertvolle Hinweise im Laufe der Bearbeitung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	DEFINITION NEUARTIGER HOLZWERKSTOFFE	3
2.2	BUCHENHOLZ (FAGUS SYLVATICA L.) DES MITTLEREN STAMMABSCHNITTES	3
2.2.1	<i>Problematik des Buchenholzes.....</i>	3
2.2.2	<i>Definition des mittlern Buchenstammabschnittes.....</i>	4
2.3	SPANNUNGEN IM HOLZ UND HOLZWERKSTOFFEN	5
2.3.1	<i>Definitionen.....</i>	5
2.3.2	<i>Entstehung und Auswirkungen von Spannungen im Holz und Holzwerkstoffen.....</i>	5
2.3.2.1	Entstehung und Auswirkungen von Spannungen durch äussere Kräfte	6
2.3.2.2	Entstehung und Auswirkungen von inneren Spannungen.....	8
2.3.3	<i>Möglicher Ansatz zum Abbau der Eigenspannungen im mittleren Stammabschnitt von Buche.....</i>	10
2.3.4	<i>Möglichkeiten der Spannungsmessung.....</i>	10
2.3.4.1	Freischneiden	10
2.3.4.2	Bohrmethode / Schnittaufweitungsmethode	11
2.3.4.3	Biegemoment-Methode	12
2.3.4.4	Rechnerische Bestimmung der Spannungen mittels FEM (Finite-Elemente-Methoden)	13
2.4	THERMISCH BEHANDELTES HOLZ	14
2.4.1	<i>Physikalische Eigenschaften</i>	15
2.4.1.1	Holzfeuchtigkeit.....	15
2.4.1.2	Biologische Haltbarkeit.....	16
2.4.1.3	Quellung	16
2.4.1.4	Wetterbeständigkeit.....	17
2.4.1.5	Rohdichte.....	17
2.4.1.6	Festigkeit	18
2.4.1.7	Brinell-Härte	18
2.4.2	<i>Bearbeitungseigenschaften</i>	18
2.4.2.1	Kleben	18
2.4.2.2	Oberflächenbehandlung	19
2.4.3	<i>Produktionsverfahren</i>	19
2.4.3.1	Thermische Behandlung mit Öl	19
2.4.3.2	Thermische Behandlung mit Feuchte- Wärme- Druck- Verfahren	20
2.4.3.3	Thermische Behandlung unter interner Gasatmosphäre.....	21
2.4.3.4	Thermische Behandlung mit Heiss-Luft	21
2.4.4	<i>Industrie, Handel und Verbände</i>	21
2.4.4.1	Balz Holz AG	22
2.4.4.2	Thermowood	23
2.4.4.3	Stellac Oy	23
2.4.4.4	Plato International BV	23
2.4.4.5	Thermoholz austria	23
3	Zielstellung	24

4	Material und Methoden.....	25
4.1	VERSUCHSÜBERSICHT	25
4.1.1	<i>Variablen, Messgrößen und Einheiten</i>	26
4.2	VERSUCHSMATERIAL UND GERÄTE	27
4.2.1	<i>Holz.....</i>	27
4.2.2	<i>Presse.....</i>	28
4.2.3	<i>Universalprüfmaschine (Zwick Z100).....</i>	29
4.3	NUMMERIERUNGSSYSTEM DER PRÜFKÖRPER	30
4.3.1	<i>Fensterprofile</i>	30
4.3.2	<i>Plattenaufbau</i>	31
4.3.3	<i>Zugscherproben.....</i>	31
4.3.4	<i>Nummerierung der eingesetzten Klimate.....</i>	32
4.3.5	<i>Klebstoffe und ihre Produktnamen.....</i>	32
4.4	VORVERSCHE	33
4.4.1	<i>Bestimmung der Spannungen in unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mittels Untersuchung der Verformung.....</i>	33
4.4.1.1	Material.....	33
4.4.1.2	Methode.....	33
4.4.2	<i>Prüfung der Klebfugenfestigkeit verschiedener Klebstofftypen.....</i>	36
4.4.2.1	Material.....	36
4.4.2.2	Methode.....	37
4.5	HERSTELLUNG DER DREISCHICHTPLATTEN UND FENSTERPROFILE	39
4.5.1	<i>Herstellung Fensterprofile</i>	39
4.5.2	<i>Herstellung der Platten</i>	41
4.6	HAUPTVERSCHE	43
4.6.1	<i>Bestimmung des Verhaltens von Fensterprofilen bei natürlicher und künstlicher Bewitterung.....</i>	43
4.6.1.1	Natürliche Bewitterung.....	43
4.6.1.2	Künstliche Bewitterung.....	44
4.6.2	<i>Plattenverzug.....</i>	45
4.6.3	<i>Freie Quellung bei Dreischichtplatten</i>	47
4.6.4	<i>Behinderte Quellung bei Dreischichtplatten (Quelldruck).....</i>	49
4.6.4.1	Bestimmung der Quellkraft	49
4.6.4.2	Bestimmung der Gleitreibungskoeffizienten	50
4.6.4.3	Berechnung des Quelldruckes.....	51
4.6.5	<i>Eigenspannungen in Dreischichtplatten</i>	52
4.6.6	<i>Delaminierungseffekt bei Wechselklimalagerung</i>	55

5	Ergebnisse und Diskussion	57
5.1	SPANNUNGEN IM UNBEHANDELTN BUCHENHOLZ DES MITTLEREN STAMMABSCHNITTES MITTELS UNTERSUCHUNG DER VERFORMUNG	57
5.1.1	<i>Verformung beim Einschnitt eines Buchenstamms</i>	57
5.1.2	<i>Verformung beim Auftrennen von Buchenbrettern</i>	58
5.1.3	<i>Verformung von Buchenbrettern nach einer Quellung im Feuchtklima</i>	59
5.1.4	<i>Zusammenfassung</i>	60
5.1.5	<i>Diskussion</i>	60
5.2	SCHERFESTIGKEIT DER KLEBFUGE	62
5.2.1	<i>Scherfestigkeit der Klebfugen nach der Verklebung bei 20°C/35% und Variation des Prüfklimas</i>	62
5.2.2	<i>Scherfestigkeit der Klebfugen nach der Verklebung bei 20°C/65% und Variation des Prüfklimas</i>	63
5.2.3	<i>Zusammenfassung</i>	64
5.2.4	<i>Diskussion</i>	64
5.3	VERHALTEN VON FENSTERPROFILEN BEI KÜNSTLICHER UND NATÜRLICHER BEWITTERUNG	65
5.3.1	<i>Natürliche Bewitterung</i>	65
5.3.1.1	Unversiegelte Fensterecken	65
5.3.1.2	Versiegelte Fensterecken	67
5.3.2	<i>Künstliche Bewitterung</i>	67
5.3.3	<i>Zusammenfassung</i>	68
5.3.4	<i>Diskussion</i>	68
5.4	PLATTENVERZUG	69
5.4.1	<i>Zusammenfassung</i>	71
5.4.2	<i>Diskussion</i>	71
5.5	FREIE QUELLUNG BEI DREISCHICHTPLATTEN	72
5.5.1	<i>Zusammenfassung</i>	75
5.5.2	<i>Diskussion</i>	75
5.6	BEHINDERTE QUELLUNG BEI DREISCHICHTPLATTEN (QUELLDRUCK)	76
5.6.1	<i>Maximaler Quelldruck nach der Beendigung der Versuchsreihe</i>	76
5.6.2	<i>Quelldruck in Abhängigkeit der Zeit</i>	77
5.6.3	<i>Quelldruck in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit</i>	78
5.6.4	<i>Quelldruck in Abhängigkeit der freien Quellung</i>	79
5.6.5	<i>Zusammenfassung</i>	80
5.6.6	<i>Diskussion</i>	80

5.7	EIGENSPANNUNGEN IN DREISCHICHTPLATTEN	81
5.7.1	<i>Vorhandene Eigenspannungen nach dem Plattenverzug</i>	81
5.7.2	<i>Vorhandene Eigenspannungen nach der freien Quellung.....</i>	82
5.7.3	<i>Vorhandene Eigenspannungen nach der behinderten Quellung</i>	83
5.7.4	<i>Zusammenfassung</i>	84
5.7.5	<i>Diskussion.....</i>	85
5.8	TESTUNG DES DELAMINIERUNGS-EFFEKTES BEI WECHSELKLIMALAGERUNG	86
5.8.1	<i>Zusammenfassung</i>	87
5.8.2	<i>Diskussion.....</i>	87
6	Ausblick und Empfehlung für die praktische Anwendung der Ergebnisse	88
6.1	AUSBlick FÜR WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGSArbeiten.....	88
6.2	PRAktische Anwendung der Ergebnisse.....	89
7	Verzeichnisse	90
7.1	ABBILDUNGEN	90
7.2	DIAGRAMME	93
7.3	TABELLEN	96
7.4	FORMELN.....	98
7.5	ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	99
7.6	GLOSSAR	100
7.7	SCHLAGWORTVERZEICHNIS	107
7.8	LITERATURVERZEICHNIS.....	109
8	Zwingende Form	111
8.1	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	111
8.2	NOTE / ABNAHMEERKLÄRUNG	112
8.3	TEIL NOTEN	112
8.4	SCHRIFTLICHE BEURTEILUNG DER ARBEIT DURCH DIE PRÜFER.....	113
9	Anhang.....	114

1 Einleitung

Derzeit wird in den Schweizer Wäldern nur etwa 50% des jährlich nachwachsenden Holzes geerntet. Durch eine waldbauliche Umstrukturierung der Wälder vom reinen Nadelwald zum Mischwald wird der Laubholzanteil in den Schweizer Wäldern noch wesentlich ansteigen. Zusätzlich wird aus Osteuropa, vor allem aus Rumänien und der Slowakei, Laubholz in die Schweiz importiert. Dies sind traditionelle Länder mit einem hohen Laubholzvorkommen. Zu diesem anwachsenden Angebot von Laubholz kommt eine abnehmende Nachfrage durch eine gewisse Stagnation in der zentraleuropäischen Möbelindustrie dazu. Längerfristig zu beachten ist ein möglicher Holzmangel in Westeuropa. Eine Ursache dafür ist die immer grösser werdende Kapazität der Verarbeitungsbetriebe, als auch die zunehmende energetische Nutzung des Holzes. Die Auswirkung dieses Holzmangels wird eine möglichst komplettete Ausnutzung von Holz sein. Der Werkstoff Holz wird künftig noch mehr an Bedeutung gewinnen.

Besonders bei der Laubholzart Buche gestaltet sich die Verwendung des mittleren Stammabschnittes als schwierig. Das Holz aus diesem Stammstück besitzt grosse Eigenspannungen. Dies beeinträchtigt die Nutzung für hochwertige Sortimente. Früher setzte man dieses Buchenholz für die Produktion von Eisenbahnschwellen ein. Nach dem Ablauf der 20 bis 30 jährigen Nutzungsdauer im Geleisebau, wurden die ausgewechselten Schwellen zum grössten Teil an Privatpersonen weiterverkauft. So ergab sich nach einem Bericht der BAFU (Bundesamt für Umwelt) [9] pro Jahr eine Menge von 125000 Schwellen bei der SBB und bei Privatbahnen von 80000 Schwellen. Diese ausgemusterten Schwellen wurden anschliessend im Gartenbau oder bei Kinderspielplätzen verwendet. Durch das im September 2001 in Kraft getretene Gesetz, dass die Verwendung von Teeröl imprägniertem Holz auf Kinderspielplätzen und im Gemüsegartenbau untersagt, zeichnete sich ein deutlicher Rückgang des Absatzes von Buchenholzschwellen ab.

Um diesen Absatzrückgang zu stoppen, versucht man Buchenholz des mittleren Stammabschnittes für neue Anwendungsgebiete attraktiv zu machen. Erste Erfolge auf diesem Weg erzielte man durch eine Wärmebehandlung. Dabei wird das Holz zwischen 120°C und 170°C erwärmt. Durch diese Wärmebehandlung erhält das Buchenholz, aber auch andere Holzarten, veränderte Eigenschaften.

Versuche haben gezeigt, dass durch diese Wärmebehandlung von Buchenholz eine Verbesserung der Holzeigenschaften und eine deutliche Wertschöpfung erreicht werden könnte. Folgende Schwerpunkte sind dabei in diesem Zusammenhang zu nennen. Die geringe Dauerhaftigkeit von Buchenholz gegenüber holzzerstörenden Pilzen (Dauerhaftigkeitsklasse 5 nach DIN EN 350-2) wird deutlich verbessert. Zudem erreicht man eine Egalisierung des bei Buche auftretenden fakultativen Rotkerns (Diplomarbeit von Herr Oelhafen, 2005). Diese Rotkernbildung bewirkt eine starke Qualitätsminderung des Buchenholzes. Andererseits ergibt die Wärmebehandlung die derzeit stark gefragte dunkle Farbgebung von Holzprodukten. Dieses dunkle Holz ist ein idealer Ersatz für das sonst importierte dunkle Exotenholz. Ausserdem werden durch eine Wärmebehandlung des Holzes nach bisherigem Erkenntnisstand die Eigenspannungen bei Buchenholz abgebaut. Durch diese verbesserten Eigenschaften kann das Holz von mittlern Buchenstammabschnitten in neuen Produkten eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen Möglichkeiten gesucht werden, aus wärmebehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes, Halbfabrikate herzustellen. Diese neuen Halbfabrikate sollen eine Erhöhung der Wertschöpfung und somit eine Steigerung des Absatzes von Laubholz in der Schweiz erzielen. Ansatzpunkte für geeignete Anwendungsgebiete der Halbfabrikate sind in Innenausbau und bei Möbeln zu suchen. Dort vor allem in den Anwendung von geklebten Profilen, ein- oder mehrschichtiger Platten sowie dem Parkett.

Wärmebehandeltes Holz wird in der Schweiz von der Firma Balz Holz industriell hergestellt und vertrieben. Zusätzlich zu Balz Holz hat die Firma Corbat Holding im März 2006 die Produktion von wärmebehandeltem Holz in der Schweiz aufgenommen. Derzeit wird an einer Optimierung gearbeitet.

2 Stand des Wissens

2.1 Definition neuartiger Holzwerkstoffe

HWS (Holzwerkstoffe) werden hergestellt, um die natürliche Inhomogenität des Holzes zu verringern. Holz zeigt unter Trockenheit oder Feuchte Schwind- und Quellerscheinungen und dies in allen drei Wuchsrichtungen unterschiedlich stark. Auch bei einer mechanischen Beanspruchung unterscheidet sich die maximale Kraftaufnahme in den unterschiedlichen Richtungen. Die Verringerung dieser Inhomogenität des Holzes geschieht durch eine Zerkleinerung des Holzes in Leisten oder Späne und die anschliessende Zusammensetzung in einer neuen Anordnung des Holzes. HWS sind Verbundmaterialien die aus Vollholz, Furnier oder Holzfasern hergestellt werden.

Neuartige HWS sollten dabei spezielle Anforderungen, die der Markt verlangt, erfüllen. Dabei kann es sich um alte Materialien handeln, die neu komponiert werden oder alte Kombinationen mit neuen Materialien. Neue HWS können dabei in der Architektur zu neuen dekorativen Elementen führen oder für neuartige Tragelemente eingesetzt werden. Dabei ergeben neuen HWS auch verbesserte Eigenschaften, die zu einem neuen Anwendungsgebiet führen können.

2.2 Buchenholz (*Fagus sylvatica L.*) des mittleren Stammabschnittes

2.2.1 Problematik des Buchenholzes

Wie schon in Kap. 1 erwähnt, ist das Überangebot an Buchenholz auf dem Schweizer Holzmarkt ein grosses Problem. Durch dieses Überangebot an Buchenholz wird oft hochwertiges Holz in der MDF- und HDF-Produktion (MDF = mitteldichte Faserplatte; HDF = hochdichte Faserplatte) eingesetzt oder sogar als Energieträger verwendet. Diese Tendenz trifft nicht nur für Buchenholz zu, sondern auch für die übrigen einheimischen Laubholzarten.

Ein weiteres Problem, das speziell bei Buchenholz auftritt, sind wuchsbedingte Eigenspannungen. Diese sind vor allem im Holz des mittleren Stammabschnittes sehr ausgeprägt. Die Verwendung dieses Holzes erweist sich durch diese auftretenden Eigenspannungen im Buchenholz als sehr problematisch. Bei extremen Spannungen in den Buchenstämmen kann sich der Stamm nach dem Fällen spalten (Abbildung 5, S. 9).

Dies bedeutet ein erschwerter Einschnitt und eine geringere Ausbeute. Bei der Weiterverarbeitung des Holzes ergeben sich nach einem Aufschneiden oder Trocknen starke Verformungen, was die Verwendung des Buchenholzes sehr erschwert. Früher setzte man Buchenholz aus dem mittleren Stammabschnitt für die Produktion von Eisenbahnschwellen ein. Durch das im September 2001 in Kraft getretene Gesetz, dass die Verwendung von Teeröl imprägniertem Holz im Gemüsegartenbau und auf Kinderspielplätzen untersagt, zeichnete sich ein deutlicher Rückgang des Absatzes von Holzschwellen ab.

2.2.2 Definition des mittlern Buchenstammabschnittes

Nach üblichen Holzhandelsgebräuchen für Rundholz wird ein Buchenstamm in drei Stammabschnitte unterteilt. In den Erdstamm, den mittleren Stammabschnitt und in den Zopfstamm. Der Erdstamm wird bei Buchenholz meist zu Schreinersortimenten eingeschnitten. Der Zopfstamm ergibt Industrie- oder Energieholz. Aus dem mittleren Stammabschnitt wurden früher meist Eisenbahnschwellen hergestellt. Die Längen der einzelnen Stammabschnitte sind stark abhängig von der Gesamtstammlänge. Der mittlere Stammabschnitt sollte aber durch 2.7m teilbar sein.

Am besten lässt sich das Buchenholz des mittlern Stammabschnittes über seine Qualität bestimmen. Nach SCHEIZERISCHEN HANDELSGEBRÄCHEN FÜR RUNDHOLZ [37] hat Schwellenholz bei der Rundlaubholzsortierung die Qualitätsklasse C. Bei der Qualitätsklasse C sollte der mittlere Stammdurchmesser mindestens 30cm betragen. Erlaubt sind verwachsene Äste (<7cm), faule Äste (<5cm), Drehwuchs, leichte Längsrisse, Kreuzrisse, eine Krümmung <4cm pro Laufmeter und Rotkern. Dabei ist bei einem mittleren Stammdurchmesser bis 39cm ein Rotkern von 7cm erlaubt und über 40cm Stammdurchmesser ein solcher von 10cm.

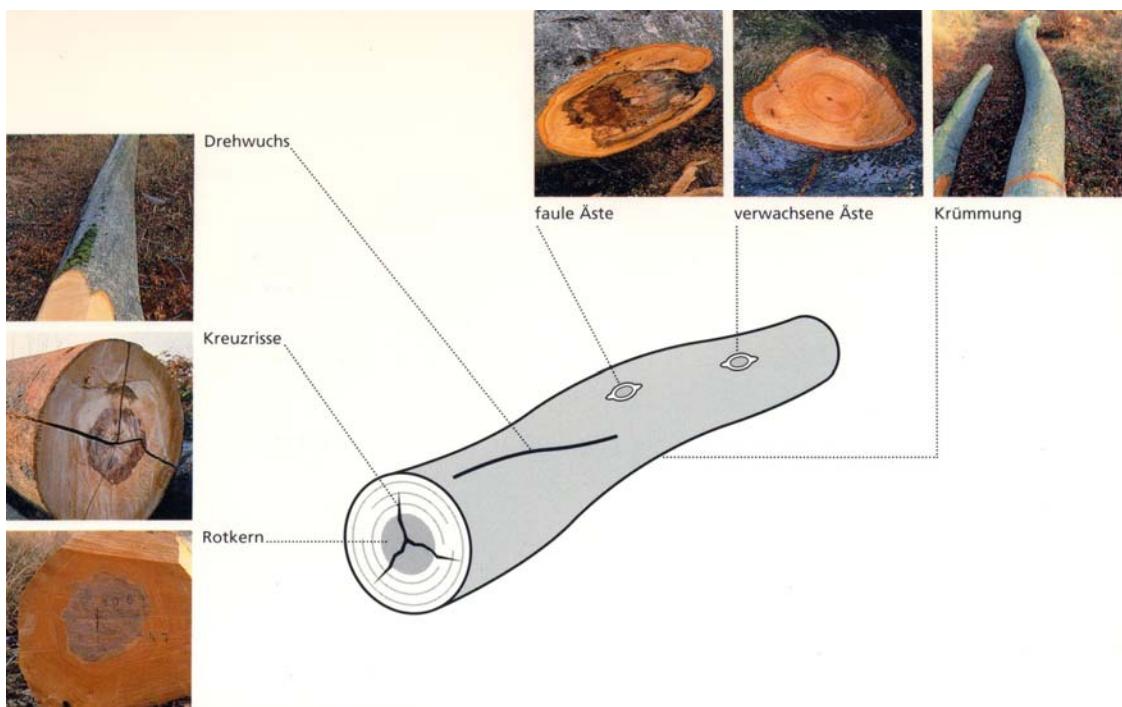


Abbildung 1: Kriterien zur Bestimmung der Qualitätsklasse von Buchenrundholz

2.3 Spannungen im Holz und Holzwerkstoffen

2.3.1 Definitionen

Um die Problematik von Spannungen im Holz besser zu verstehen, werden folgende Definitionen erläutert:

- Die Spannung (σ) ist der Quotient aus Kraft (F) pro Flächeneinheit (A).

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Formel 1: Spannung

σ : Spannung [N/mm²]

F : Kraft [N]

A : Fläche [mm²]

- Nach Definition von WELLING [38] versteht man allgemein unter dem Begriff Eigenspannungen: Spannungszustände in einem geschlossenen System, die ohne Einwirkung äusserer Kräfte oder Momente existieren und die sich im mechanischen Gleichgewicht befinden.

2.3.2 Entstehung und Auswirkungen von Spannungen im Holz und Holzwerkstoffen

In Holz und HWS (Holzwerkstoffe) auftretende Spannungen können, wie in der Abbildung 2 zu sehen ist, in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden. In Spannungen die im Inneren des Holzes oder HWS entstehen und in solche, die durch Einwirkung von äusseren Kräften entstehen. Das Resultat dieser Spannungen können Verformungen (Plattenverzug bei Spanplatten und MDF) oder auch Risse (Trocknungsrisse bei der Holztrocknung) sein. Meistens werden Spannungen, die nach einem Einfluss von äusseren oder inneren Kräften im Material noch wirken, als Eigenspannungen bezeichnet.

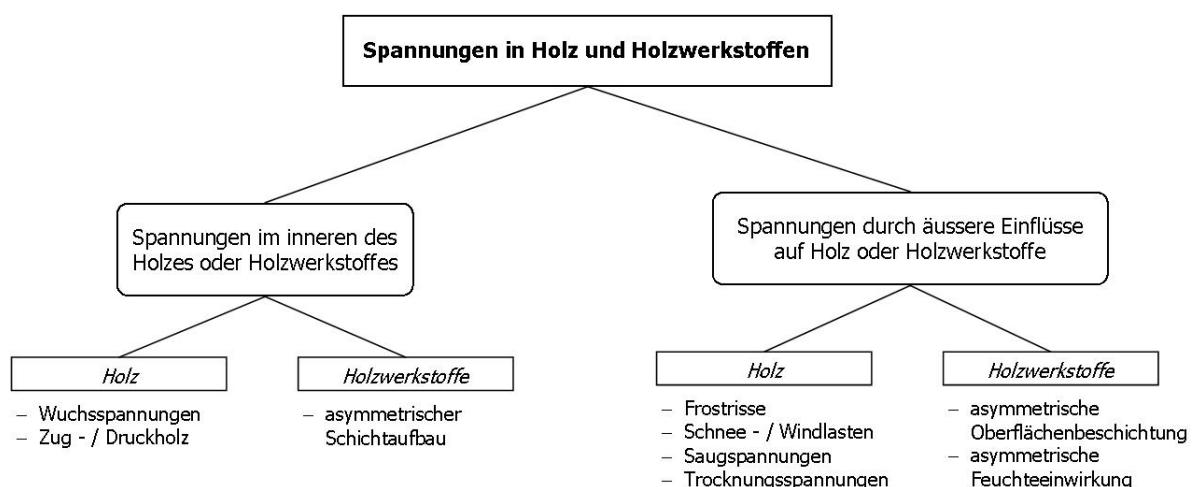


Abbildung 2: Aufteilung der entstehenden Spannungen im Holz und in Holzwerkstoffen.

2.3.2.1 Entstehung und Auswirkungen von Spannungen durch äussere Kräfte

Frostrisse:

Bei tiefen Minustemperaturen, Wind oder Tauwetter können an stehenden, harten Laubholz- und Nadelholz bäumen Frostrisse auftreten. Diese Frostrisse werden auf Kristallisierungsvorgänge von dem im Stamm vorhandenem Wasser zurückgeführt. Dabei dehnt sich das Wasser beim Gefrieren aus und sprengt die Holzfasern. Die Risse sind meist im Wurzelanlauf vorhanden und verlaufen in Radialrichtung. Durch Überwallung dieser Risse, als eine Reaktion des lebenden Baumes, entstehen an der Stammoberfläche so genannte Frostleisten (TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN [36]; BEIMGRABEN [7]).

Schnee- und Windlasten:

Wird ein stehender Baum durch Wind oder Schnee stark belastet, so können nach NIEMZ [24] sowohl auf seiner Zug- als auch auf der Druckseite Risse entstehen. Dabei wird auf der Zugseite das Gewebe der Kambiumzone zerstört und auf der Druckseite entstehen Stauchungen, die im Holz als Stauchlinien von blossem Auge zu erkennen sind. Erste mikroskopische Brüche sind aber bereits unterhalb der Bruchlast nachweisbar.

Saugspannungen:

Der Wassertransport im lebenden Baum wird zum Teil durch kapillare Zugkräfte angetrieben, die als Saugspannungen im Baum auftreten. Entsteht nun nach ARCHER [1] die Situation, dass die Krone mehr Wasser abgibt als die Wurzel nachliefern kann, können die Saugspannungen so gross werden, dass das Holzgewebe zerreisst. Die entstandenen Risse verlaufen meist in Radialrichtung.

Trocknungsspannungen:

Einen grossen Einfluss auf die Verformung und Rissbildung beim Holz hat die Trocknung. Je schneller Holz getrocknet wird, desto stärker sind die entstehenden Trocknungsspannungen. Die Stärke der Trocknungsspannungen und somit die Stärke der Rissbildung ist von vielen Faktoren abhängig. Die wichtigsten Faktoren sind sicher die Trocknungsgeschwindigkeit, der Feuchtegehalt des Holzes, die Holztemperatur und die Dauer. Verschiedene Faktoren wie die unterschiedlichen Quell- und Schwindmasse in den drei anatomischen Wuchsrichtungen (vor allem tangential und radial), sowie liegende Jahrringe (Tangentialschnitt) und ein hohes Elastizitätsmodul bei Laubhölzern begünstigen die Rissbildung.

Bei der Trocknung von Holz stellt sich ein Feuchtegefälle von aussen nach innen ein. Durch die unterschiedliche Holzfeuchte im Querschnitt des Holzes und durch das feuchteabhängige Schwindverhalten des Holzes, entstehen zunächst Zugspannungen im trockenen Holz (aussen) und Druckspannungen im feuchten Holz (innen). Dies hat den Grund in der Behinderung des Schwindens der trockenen äusseren Schichten, durch die feuchteren inneren Schichten. Daraus resultieren Trocknungsspannungen im Holzquerschnitt. Diese Spannungen können schnell ansteigen und eine bleibende Verformung hinterlassen. Steigen die Spannungen weiter an, kann es durch Überschreiten der Bruchspannung bzw. -dehnung in den äusseren Zonen des Holzes zu Rissen kommen. Mit zunehmender Trocknungsdauer und sinkender Holzfeuchtigkeit im Holzinneren, beginnt das Holz nun auch im Inneren zu schwinden, so dass nun Zugspannungen entstehen. Diese auftretenden Zugspannungen können zu Innenrissen führen. Die Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Trocknungsspannungen schematisch auf (NIEMZ [24]).

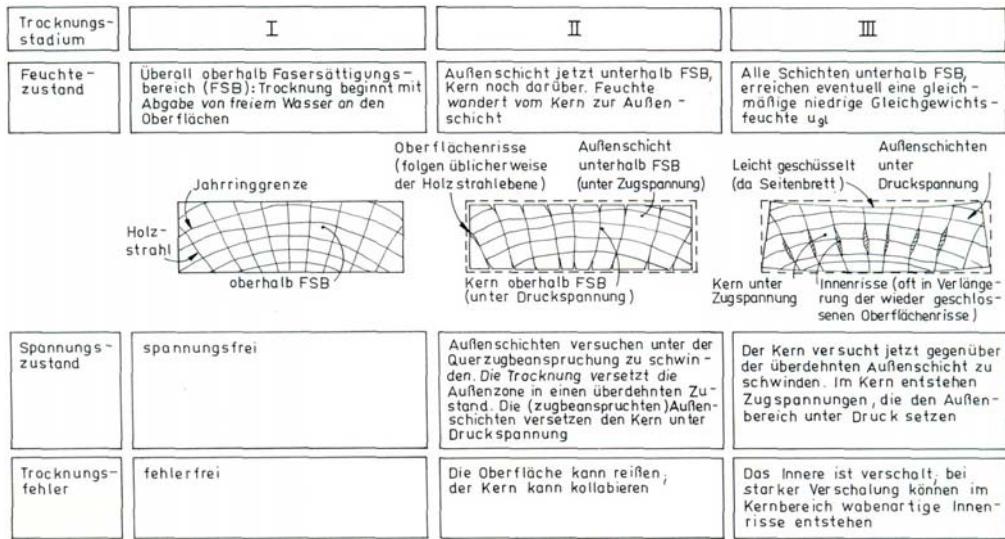


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung im Holz bei der Trocknung (nach Hoadley [17]).

Asymmetrische Feuchteinwirkung:

Nach NIEMZ [24] entsteht ein ähnlicher Effekt bei einer einseitigen Feuchtänderung eines plattenförmigen HWS` s. Es stellt sich ebenfalls ein Feuchtegefälle zwischen den Plattenseiten ein. Wie bei der Holztrocknung ergibt sich auch bei HWS durch einen unterschiedlichen Feuchtegehalt der einzelnen Plattenschichten ein Aufbau von inneren Spannungen in der Platte. Diese Spannungen führen zu einer Verformung der Platte (siehe auch Abbildung 4 unten).

Asymmetrische Oberflächenbeschichtung:

Wird ein plattenförmiger HWS durch einseitiges Furnieren oder Belegen mit einer Kunstharzplatte asymmetrisch beschichtet, kommt es je nach der Plattendicke und dem Grad der Asymmetrie zu Verformungen der Platte. In der Abbildung 4 ist die Verformung von asymmetrisch beschichteten Spannplatten, in Abhängigkeit des Beschichtungsmaterial und des Klimas, aufgezeigt (NIEMZ [24]).

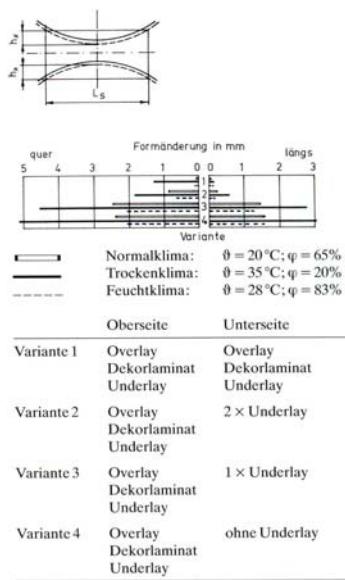


Abbildung 4: Formänderung von asymmetrischen beschichteten Spannplattenstreifen in Abhängigkeit vom Klima (nach Böhme [8]).

2.3.2.2 Entstehung und Auswirkungen von inneren Spannungen

Asymmetrischer Schichtaufbau:

HWS wie zum Beispiel Spannplatten können sich durch eine herstellungsbedingte Asymmetrie des Plattenaufbaus verformen. Die Ursache dieser Verformung ist in einem grösseren Anteil einer stärker oder schwächer quellenden Plattenschicht zu finden. Somit verschiebt sich das Spannungsgleichgewicht aus der Plattensymmetrie und es entsteht ein Plattenverzug.

Reaktionsholz:

Innere Spannungen bei Holz werden vor allem durch die Bildung von Reaktionsholz und durch wuchsbedingten Spannungen am lebenden Baum hervorgerufen. Wie die Bezeichnung Reaktionsholz schon aussagt, bildet es sich als Reaktion auf einen äusseren Einfluss. Dieser Einfluss ist meistens eine einseitige Belastung des Baumes durch Schneelasten oder Stammteilen, die aus ihrer lotrechten Position gerieten. Nach BEIMGRABER [7] reagieren dabei Nadelhölzer mit der Bildung von Druckholz und Laubhölzer mit der Bildung von Zugholz. Druckholz ist im Stammquerschnitt als dunkles, im Spätholz des Jahrringes verlaufendes Band zu erkennen. Es bildet sich an der Unterseite des belasteten Stammstückes. Druckholz zeigt gegenüber von normalem Holz einen erhöhten Ligninanteil. Der erhöhte Ligninanteil erhöht die Druckfestigkeit des Holzes. Nach NIEMZ [24] zeichnet sich Druckholz durch eine Erhöhung seines Schwind- und Quellmasses in Längsrichtung aus, das eine starke Verformung bei der Holztrocknung bewirkt. Zugholz hingegen erscheint nach BEIMGRABER [7] schwach silbrig glänzend an der Oberseite des belasteten Stammstückes. Es ist mit blossem Auge nur schwer zu erkennbar. Gegenüber dem normalen Holz bildet sich im Zugholz vermehrt Cellulose. Nach NIEMZ [24] verkürzt sich Zugholz nach seiner Auftrennung und neigt somit zur Deformation. Durch diese speziellen Eigenschaften von Reaktionsholz ergeben sich erhebliche Probleme bei der Verarbeitung.

Wachstumsspannungen:

Nach TRENDENBURG und MAYER-WEGELIN [36] können während des Baumwachstums durch auftretende Belastungen erhebliche Eigenspannungen im Baum entstehen. Diese Spannungen befinden sich beim stehenden Baum im Gleichgewicht. Sobald der Baum gefällt wird, verschiebt sich dieses Gleichgewicht. Durch diese Verschiebung der Spannungen im Stamm können sich Risse bilden. Es können sowohl in Längs-, wie auch in Querrichtung Spannungen im Stamm vorhanden sein. Wie Versuche gezeigt haben, stehen die inneren Schichten des Stammes in Längsrichtung unter Druckspannungen und die äusseren Schichten unter Zugspannungen. Sie entstehen vermutlich dadurch, dass einzelne Schichten bei ihrer Entstehung unter Zugspannung geraten. Diese Spannung beginnt bei der Bildung der Holzzelle im Kambium. Nach der Bildung ziehen sich die Zellen um einen kleinen Betrag zusammen und setzen so die inneren Zellschichten unter einen Längsdruck. Somit verkürzt sich Holz, das an der Peripherie des Stammquerschnittes liegt und marknahes Holz verlängert sich bei seiner Auftrennung. Die entstehenden Eigenspannungen können nach TRENDENBURG und MAYER-WEGELIN [36] einen Wert von $3-7 \text{ N/mm}^2$ erreichen. Nachweislich lassen sich auch Querzugsspannungen im Baum feststellen. Die Querzugsspannung wird nach BEIMGRABER [7] als tangential Druckbelastung an der Peripherie des Stammes und als radiale Zugbelastung in der Marknähe definiert. Dies wird veranschaulicht, wenn man eine Stammscheibe mit einem Schnitt versieht, der von der

Peripherie des Stammes bis ins Mark verläuft. Dabei verengt sich die Schnittfuge an der Peripherie der Stammscheibe und verbreitert sich in der Marknähe. Daraus schloss KOEBLER [20], dass in den äusseren Jahrringe Druckspannungen in Umfangsrichtung herrschen und im Inneren der Stammscheibe Zugspannungen vorliegen müssen. Durch diese Eigenspannungen im Holz kommt es beim Auftrennen von Holz zu Verformungen oder sogar zu Rissen, unabhängig von den entstehenden Spannungen bei der Holztrocknung.

Ausgewählte Holzarten wie Rotbuche und dort vor allem der mittlere Stammabschnitt besitzen extrem hohe wuchsbedingte Eigenspannungen, die nach dem Fällen zum Aufspalten des Stammes führen können (Abbildung 5). Untersuchungen dazu wurden unter anderem im Rahmen eines EU Projektes von der EMPA, der Universität Freiburg, der Universität Wien, der Universität Montpellier 2 und von der KVL Dänemark durchgeführt.



Abbildung 5: Rissbildung in Rotbuche durch Eigenspannungen (Foto: Uni Freiburg)

2.3.3 Möglicher Ansatz zum Abbau der Eigenspannungen im mittleren Stammabschnitt von Buche

Ein möglicher Abbau der wuchsbedingten Eigenspannungen im Buchenholz des mittleren Stammabschnittes könnte nach bisherigen Erfahrungen durch eine Wärmebehandlung des Holzes erreicht werden. Dieser Abbau der Eigenspannungen entsteht vermutlich durch die mikroskopischen Risse zwischen den Zellwänden, die durch die Wärmebehandlung entstehen. Diese Risse bewirken eine Entspannung der wuchsbedingten Spannungen zwischen den einzelnen Zellen, ähnlich einem Holz das aufgetrennt wird. Solche Risse sind auch in den REM-Aufnahmen (Raserelektronenmikroskop) der Diplomarbeiten von OELHAFEN [26] die in der Abbildung 6 ersichtlich sind. Die Risse verlaufen entlang der Markstrahlen. Tendenziell beginnen sie an der Jahrringgrenze.

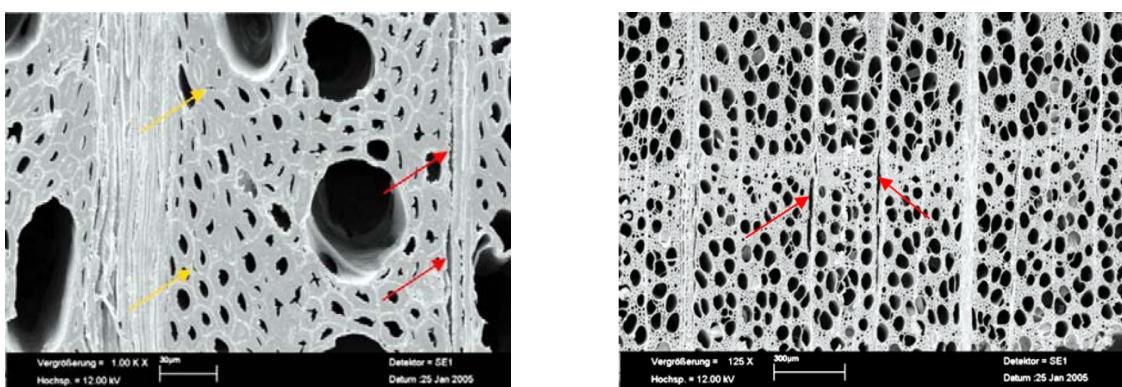


Abbildung 6: REM-Aufnahmen eines thermisch behandelten Buchenholzquerschnittes. Die roten Pfeile bezeichnen Risse und die gelben Pfeile markieren Ablösungen der Zellen im Bereich der Mittellamelle (nach OELHAFEN [26]).

2.3.4 Möglichkeiten der Spannungsmessung

2.3.4.1 Freischneiden

Sind in einem Material Eigenspannungen vorhanden, so kommt es bei deren schichtweiser Auftrennung zu Längenänderungen der Schichten (Verkürzung bei Zug-, Verlängerung bei Druckspannungen). Abbildung 7 zeigt dies schematisch am Beispiel von Wuchsspannungen. An der Spannungsentstehung sind dabei nur die elastischen, keine plastischen oder verzögert elastische Verformungen beteiligt.

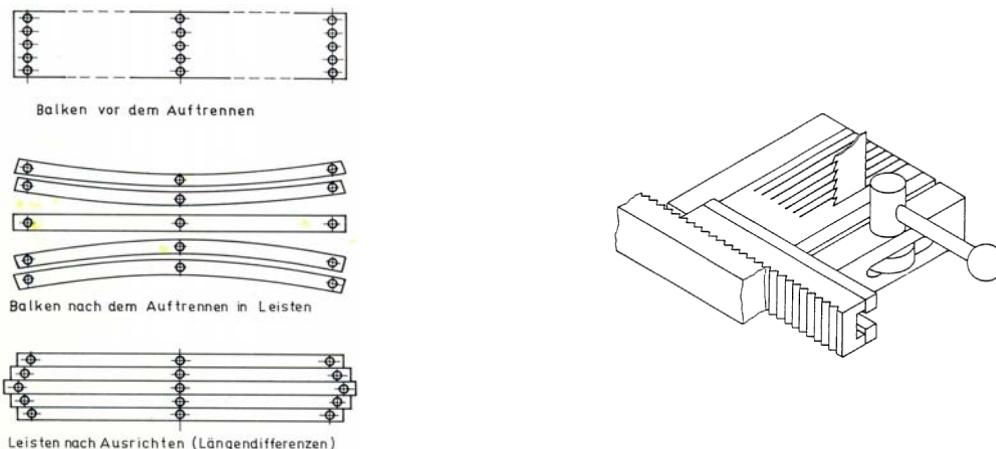


Abbildung 7: Verformung von Holz nach Freischneiden in Schichten (links) (Aussenschichten unter Zug-, Innenschichten unter Druckspannungen) sowie Vorrichtung zum Freischneiden der Spannungen (rechts)

Dabei wird der Einschnitt der Prüfkörper wie folgt durchgeführt. Zuerst werden die einzelnen Anfangslängen (l_0) vor dem Freischneiden der Gabelzinken gemessen. Anschliessend werden die Gabelzinken frei geschnitten und ihre nun entspannte Endlänge (l) erneut gemessen. Von den einzelnen Gabelzinken wird der E-Modul (E) bestimmt. Über das Hooksche Gesetz (Formel 2) werden nun die Spannungen (σ) zwischen den Gabelzinken berechnet.

$$\sigma = \varepsilon \bullet E$$

Formel 2: Hooksche Gesetz der Spannung

- σ : Spannung [N/mm²]
 ε : Dehnung [%]
 E : Elastizitätsmodul [N/mm²]

Dabei wird die relative Dehnung (ε) mit Hilfe der Formel 3 und der ermittelten Anfangslänge (l_0) und Endlänge (l) berechnet.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \bullet 100\%$$

Formel 3: Dehnung

- ε : Dehnung [%]
 Δl : Längenänderung [mm]
 l : Endlänge (Länge nach dem Auftrennen) [mm]
 l_0 : Anfangslänge (Länge vor dem Auftrennen) [mm]

2.3.4.2 Bohrmethode / Schnittaufweitungsmethode

Beim Einbringen eines Schnittes in ein unter Spannung stehendes Holzstück, setzt sich die wirkende Spannung durch Verformungen frei. Ein in die Oberfläche eingebrachter Schnitt wird sich, je nach vorliegender Spannung, aufweiten bzw. schliessen. Aus der Verformung kann auf den Spannungszustand geschlossen werden.

Das gleiche gilt für ein Bohrloch. Aus der Deformation lässt sich auf den Spannungszustand schliessen. Die Deformation kann beispielsweise durch um das Bohrloch angebrachte Dehnungsmessstreifen gemessen werden. Wird langsam mit einem Bohrer ein Loch ins Holz gebohrt und dabei die Leistungsaufnahme gemessen, lässt sich daraus auf den Spannungszustand schliessen. Veränderungen in der Leistungsaufnahme treten durch das Ausweiten bzw. Schliessen des Bohrloches auf. Ferner gehen Dichte-, Feuchteunterschied sowie Abweichungen in der Holzstruktur als Störgrössen ein.



Abbildung 8: Schnittaufweitungsverfahren am Beispiel einer Stammscheibe

2.3.4.3 Biegemoment-Methode

Um Trocknungsspannungen nachweisen zu können, wurde folgende Methode entwickelt. Das Verfahren ermöglicht eine kontinuierliche Messung der Trocknungsspannungen und ihrer Verteilung. Dabei wird von folgendem Prinzip ausgegangen:

Eine unter Spannungen stehende Probe wird mittig aufgetrennt. Es kommt zur Verformung. Für das Geraderichten der Probe ist ein Biegemoment (M) erforderlich. Das Biegemoment wird mit Dehnmessstreifen ermittelt.

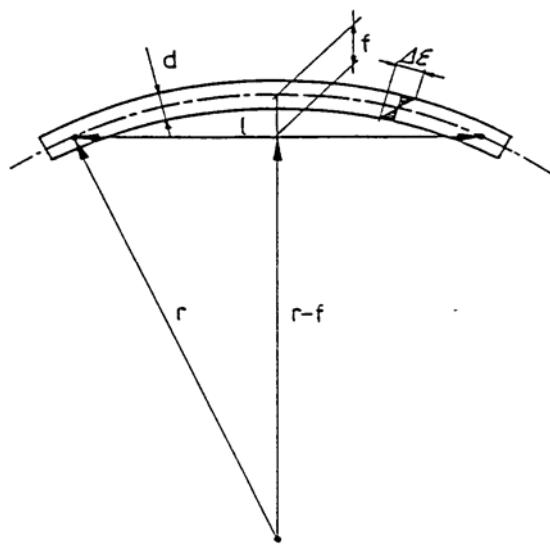


Abbildung 9: Schematische Darstellung zur Bestimmung von Trocknungsspannungen mittels Biegemoment-Methode

$$M = \int_{x=0}^{x=d} b_y(x) * x dx$$

Formel 4: Biegemoment

$$\sigma_y(x) = a * x^4 + b * x^3 + C$$

Formel 5: Spannungsverteilung

Aus der Krümmung (f), die in der Abbildung 9 ersichtlich ist, kann nach dem Aufschneiden der Proben in Schichten ebenfalls mit Hilfe der Formel 6 auf die Dehnung (ε) geschlossen werden. Dabei enthält die Dehnung elastische wie plastische Verformungen, letztere nach Klimatisierung und erfolgtem Abbau des viskoelastischen Anteils.

Bei der Ermittlung des E-Moduls kann auch hier die elastische Verformung nach dem Hookschen Gesetz (Formel 2) für die Spannung ermittelt werden.

$$\varepsilon = \frac{8 * f * d}{4 * f^2 + l^2}$$

Formel 6: Berechnung der Dehnung

2.3.4.4 Rechnerische Bestimmung der Spannungen mittels FEM (Finite-Elemente-Methoden)

Finite-Elemente-Methoden bieten recht gute Möglichkeiten, die Spannungsentstehung zu simulieren (z.B. Trocknungsspannungen). Die Dehnungen treten bei Holz fast ausschliesslich durch Feuchteänderungen auf, der Einfluss der thermischen Dehnung ist vergleichsweise gering. Die meisten FEM-Programme berücksichtigen aber nur die durch thermische Längenänderung bewirkte Spannung. Unter Zugrundelegung der differentiellen Schwindung (% Längenänderung / % Feuchteänderung) wird in den FEM-Programmen anstelle der thermischen die feuchtebedingte Ausdehnung eingesetzt. Bei FEM-Programmen ist es erforderlich, das erweiterte Hooksche Gesetz für orthotrope Körper einzusetzen und dabei 3 E-Moduli, 3 Schubmoduli und 6 Poissonsche Konstanten einzusetzen. Die Bereitstellung dieser Konstanten bieten derzeit die grössten Schwierigkeiten.

2.4 Thermisch behandeltes Holz

Unter thermisch vergütetem Holz versteht man Holz, dass zwecks der Veredlung bei Temperaturen über 170°C, meist um die 200°C behandelt wird. Bei der thermischen Behandlung von Holz werden die Holzbestandteile strukturell und chemisch geändert. Dadurch wird die Farbe deutlich dunkler, die Gleichgewichtsfeuchte und die Quellung sinken und die mechanischen Eigenschaften gehen zurück, während die Pilzresistenz steigt. Je intensiver die Behandlung ist, umso dunkler wird das Holz.

Die Grundlagen der thermischen Vergütung wurden an und für sich schon vor Jahrzehnten entwickelt. Erste Arbeiten wurden bereits 1937 von STAMM [30] in den USA durchgeführt. In den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden nochmals zahlreiche Forschungsarbeiten dazu durchgeführt. So ist zum Beispiel BURMESTER (1973 [10], 1975 [12]) zu nennen, der das FWD-Verfahren (Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren) zur Dimensionsstabilisierung von Spanplatten entwickelte. Weitere Arbeiten führten unter anderem auch KOLLMANN und SCHNEIDER [21] (1964) durch.

Bei der thermischen Vergütung wird durch Wärmezufuhr die Holzstruktur auf chemischer Ebene verändert, was je nach Behandlungsparametern verschieden stark ausgeprägte Änderungen der physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften des Holzes bewirkt (BURMESTER 1970 [11], KOLLMANN und SCHNEIDER 1964 [21]). Insbesondere wird der Anteil an Hemicellulose deutlich reduziert.

Die thermische Modifizierung wird heute sowohl zur Erhöhung der Pilzresistenz als auch zur Farbänderung eingesetzt, um die derzeit gefragten dunklen Farbtöne zu erzielen.

Dunkle Farbtöne sind bei den heimischen Holzarten kaum vorhanden. Haupteinsatzgebiete von thermisch behandeltem Laubholz sind Parkett und Möbel. Die Abbildung 10 zeigt Beispiele für den Einsatz von thermisch behandeltem Holz im Außensektor (Terrassenbeläge, Gartenmöbel) oder Produkte im boomenden Wellness-Sektor (Sauna, Badzimmer).

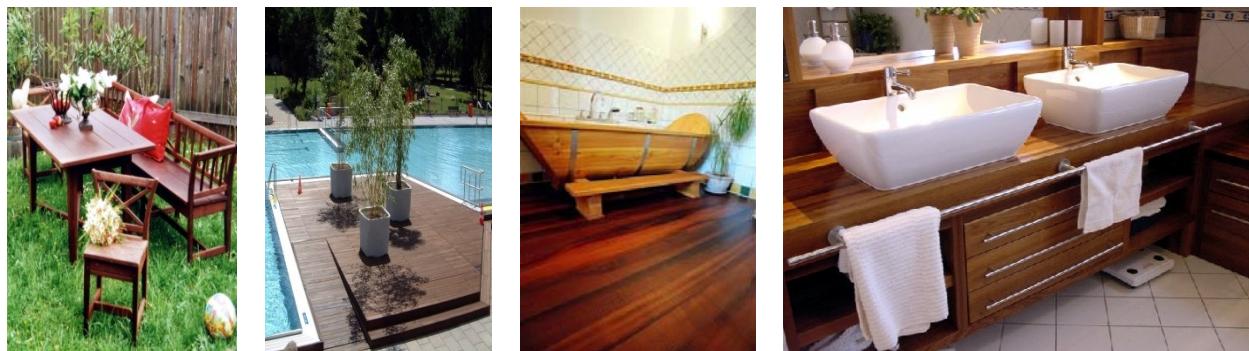


Abbildung 10: Die vier Abbildungen zeigen die neuen Anwendungsbereiche von thermisch behandeltem Holz: (von links nach rechts) im Außenbereich bei Gartenmöbel; als Bodenbelag bei einem Swimmingpool; als Parkettboden im Badezimmer; als Lavabomöbel.

2.4.1 Physikalische Eigenschaften

2.4.1.1 Holzfeuchtigkeit

Die thermische Behandlung von Holz führt zu einer verminderten Holzfeuchtigkeit. Je nach den vorliegenden Behandlungsparametern wie Behandlungstemperatur, -druck und -dauer, sinkt nach OELHAFEN [26] die Holzfeuchtigkeit um 40–80% gegenüber unbehandeltem Holz. Bei BÄCHLE und SCHMUTZ [4], der Versuche an industriell vergütetem Laubholz durchführte, zeichnet sich der gleiche Trend ab. Hier nehmen die Holzfeuchtigkeit (Diagramm 1 und Tabelle 1, S.17) der thermisch behandelten Proben um rund 40% ab.

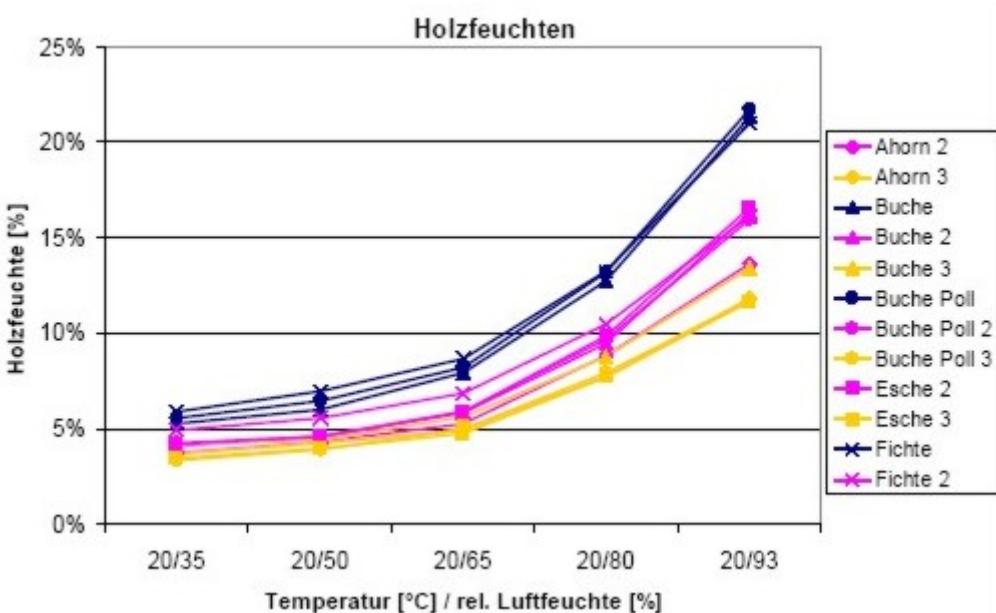


Diagramm 1: Verlauf der Holzfeuchtigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei steht die Bezeichnung Buche = unbehandelt, Buche 2 = Behandlungsstufe II und Buche 3 = Behandlungsstufe III.

Die Holzfeuchtigkeit wird durch die drei chemischen Hauptbestandteile des Holzes Lignin, Zellulose und Hemizellulose nach BURMESTER [11] wie folgt beeinflusst:

Die Holzfeuchtigkeit des Holzes wird wesentlich durch die hygrokopische Hemizellulose beeinflusst. Sie besitzt die stärksten hydrophilen Eigenschaften und hat einen relativ hohen Anteil in der Zellwand. Durch die thermische Behandlung werden, die für die hydrophilen Eigenschaften verantwortlichen OH-Gruppen teilweise abgebaut bzw. umgewandelt.

Zudem neigt die Zellulose durch die Wärmebehandlung zur Kristallisierung und damit zur Absättigung eines grossen Teiles ihrer freien OH-Gruppen und somit zur Einschränkung ihrer hydrophilen Eigenschaften.

Lignin, das grösstenteils in der Mittellamelle eingelagert ist, hat nur einen geringen Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte. Lignin blockiert dort, wo es Polysaccharide umschliesst, deren sorptives Verhalten.

Zusätzlich vernetzen sich die aromatischen Ringe des Lignins über Methylenbrücken. Diese Reaktion ist zwar gering, führt aber zu einer gesteigerten Quervernetzung des Holzes, wobei eine verringerte Hygroskopie des Holzes entsteht (TJEERDSMA et al. [35]).

2.4.1.2 Biologische Haltbarkeit

Bei Laboruntersuchungen nach DIN-EN 113 wurde eine Verbesserung der Pilzresistenz von thermisch behandeltem Holz festgestellt. Diese Verbesserung resultiert aus der Änderung der chemischen und strukturellen Zusammensetzung des thermisch behandelten Holzes.

Laut NIEMZ et al. [25], PATZELT et al. [27] und SCHANACK [29] erhöht sich durch die thermische Behandlung der relative Anteil des Lignins, während sich der Zellulosegehalt nur leicht verringert und der Anteil der Hemizellulose stark abnimmt. Zudem werden die freien OH-Gruppen blockiert. Dadurch können die von den Pilzen produzierten Enzyme, welche für den Abbau der Zellulose und der Hemizellulose verantwortlich sind, das Wasser, das sie zur Spaltung der Bindungen brauchen, vermutlich nicht mehr einbauen (BÄCHLE [3]).

2.4.1.3 Quellung

Aufgrund der verminderten Holzfeuchtigkeit und der Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des thermisch behandelten Holzes nimmt das Quellmass in tangentialer als auch in radialer Richtung um bis zu 50% ab im Vergleich zum Ausgangsmaterial. Die Quellungsanisotropie zwischen radial und tangential bleibt jedoch gleich. Dies zeigen auch Versuche von BÄCHLE und SCHMUTZ [4], der die Quellung von industriell vergütetem Holz untersuchte.

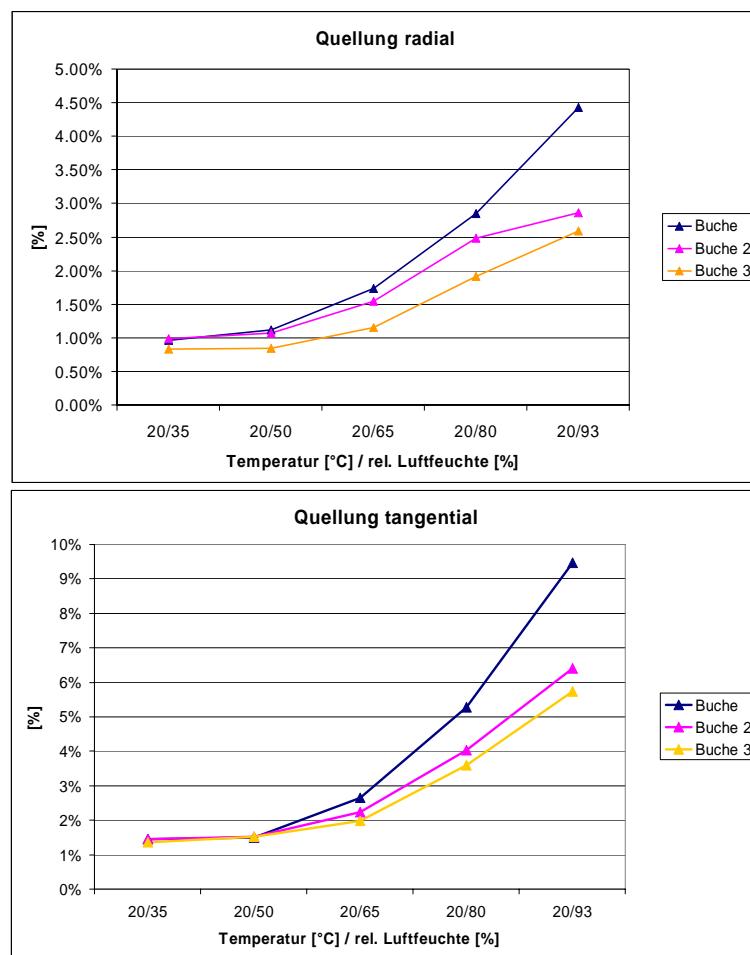


Diagramm 2: Änderung der Quellung nach einer thermischen Behandlung des Holzes nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung Buche = unbehandelt, Buche 2 = Behandlungsstufe II und Buche 3 = Behandlungsstufe III.

2.4.1.4 Wetterbeständigkeit

Wie das meisten Holz ist auch thermisch behandeltes Holz nicht resistent gegen die Auswirkungen von UV-Strahlung (Ultraviolett-Strahlung). Entsprechend ändert sich die Farbe bei direkter Sonneneinstrahlung und Abwitterung nach einiger Zeit vom ursprünglichen Braun in ein verwittertes Grau (BÄCHLE [3]).



Abbildung 11: Im Freilandversuch bewittertes Thermoholz (Fichte) der Fa. BALZ HOLZ AG [6] aus Langnau im Emmental. Die Bewitterung dauerte 230 Tage von Anfang April bis Ende November 2003. Oben links: Fichte unbehandelt, nach 230 Tagen Bewitterung; unten rechts: Fichte thermisch behandelt, nach 230 Tagen Bewitterung. Der Bewitterungsversuch wurde von BÄCHLE [3] durchgeführt.

2.4.1.5 Rohdichte

Nach THERMOWOOD [34] reduziert sich die Rohdichte durch die thermische Behandlung um ca. 10%. Diese Reduzierung ist durch den Abbau bzw. Umwandlung der drei chemischen Hauptbestandteile des Holzes zu erklären (siehe Kap. 2.4.1.1). Wobei noch zu bemerken ist, dass bei der thermischen Behandlung sich die Masse wie auch das Volumen des Holzes verringern. Im Verhältnis nimmt die Masse des Holzes bei der Behandlung mehr ab als das Volumen und deshalb sinkt die Rohdichte des Holzes (JUNGHANS [18]).

Tabelle 1: Abnahme der Härte von industriell hergestelltem thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung unb.=unbehandelt, Stufe 2=Behandlungsstufe II und Stufe 3=Behandlungsstufe III. Index 0=Mittelwert und s=Standardabweichung.

		Ahorn Stufe 2	Ahorn Stufe 3	Buche unb.	Buche Stufe 2	Buche Stufe 3	Buche Pollmeier unb.	Buche Pollmeier Stufe 2	Buche Pollmeier Stufe 3	Esche unb.	Esche Stufe 2	Esche Stufe 3	Fichte unb.	Fichte Stufe 2
Rohdichte [g/cm ³]	0	0.561	0.564	0.738	0.692	0.656	0.685	0.629	0.676	0.633	0.659	0.56	0.462	0.481
	s	0.011	0.024	0.018	0.03	0.031	0.023	0.021	0.014	0.028	0.032	0.047	0.049	0.08
Holzfeuchte [%]		6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

2.4.1.6 Festigkeit

Die Festigkeit des Holzes wird unter anderem stark durch die Dichte, aber auch andere Faktoren beeinflusst. Durch die thermische Behandlung werden Dichte und Festigkeit reduziert. Die Festigkeit, insbesondere die Bruchschlagarbeit sinkt sehr stark ab. Der E-Modul wird vergleichsweise wenig reduziert. (THERWOOD [34])

2.4.1.7 Brinell-Härte

Die thermische Behandlung hat einen eingeschränkten Einfluss auf die Brinell-Härte des Holzes. Nach OELHAFEN [26], der Untersuchungen an im Labor thermisch behandelten Buche und Esche durchgeführt hat, steigt die Härte des Holzes bei einer niedrigen Behandlungstemperatur teilweise leicht an, sinkt jedoch bei der Erhöhung der Behandlungstemperatur ab. Die Veränderung der Härte durch die thermische Behandlung ist eher im Zusammenhang mit ihrer Rohdichteänderung zu sehen. Sie hat den grösseren Einfluss auf die Härte als die strukturelle Veränderung des Holzes durch die thermische Behandlung.

BÄCHLE und SCHMUTZ [4] bestimmte die Brinell-Härte bei industriell behandeltem Laubholz und erhielt eine klare Abnahme der Härte bei einer zunehmender Behandlungsstärke. Dabei waren die Messungen in radialer Druckrichtung höher als solch in tangentialer Druckrichtung, was dem üblichen Trend entspricht.

Tabelle 2: Abnahme der Brinell-Härte von industriell hergestelltem thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung unb.=unbehandelt, Stufe 2=Behandlungsstufe II und Stufe 3=Behandlungsstufe III. Index 0=Mittelwert und s=Standardabweichung.

		Ahorn Stufe 2	Ahorn Stufe 3	Buche unb.	Buche Stufe 2	Buche Stufe 3	Buche Pollmeier unb.	Buche Pollmeier Stufe 2	Buche Pollmeier Stufe 3	Esche unb.	Esche Stufe 2	Esche Stufe 3	Fichte unb.	Fichte Stufe 2
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung tangential	0	22.44	17.54	39.32	29.48	16.58	35.53	23.06	24.75	33.19	36.71	19.97	19.49	17.64
	s	1.46	1.43	2.82	1.97	1.31	1.23	2.2	2.2	2.61	3.58	2.57	4.08	3.02
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung radial	0	30.4	25.1	42.4	34.6	20.5	36.5	26.9	31.7	36.9	33.4	24.1	15.8	14.3
	s	2.2	2.5	3.5	3.7	1.3	1.7	2.8	3.5	9.7	6.3	6.2	3.0	5.7
Holzfeuchte [%]		6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

2.4.2 Bearbeitungseigenschaften

2.4.2.1 Kleben

Da thermisch behandeltes Holz Wasser langsamer aufnimmt als unbehandeltes Holz, ist bei Klebstoffen, die einen hohen Anteil wasserbasierter Lösungsmittel enthalten eventuell mit längeren Trocken- und Presszeiten zu rechnen. Dies ist bei den meisten 1-K PVAc-Klebstoffen (Einkomponenten Polyvinylacetat) der Fall.

Bei der Verwendung von 1K-PUR-Klebstoff (Einkomponenten Polyurethan), der häufig in der holzverarbeitenden Industrie verwendet wird, ist die notwendige Mindestholzfeuchtigkeit von 6% zu beachten. PUR-Klebstoff benötigt Feuchtigkeit als Reaktionspartner für den Härtungsprozess, die er aus dem Holz und der Luft bezieht. Wenn sowohl das Holz, was bei thermischen behandeltem Holz durch die 50% geringere Holzfeuchtigkeit der Fall ist (siehe Kap. 2.4.1.1), als auch die Luft sehr trocken ist, kann es zu Verklebungsfehlern kommen. (THERWOOD [34])

2.4.2.2 Oberflächenbehandlung

Um Farbveränderungen und andere witterungsbedingte Effekte zu verhindern, ist eine Oberflächenbehandlung empfehlenswert. Pigmentbasierende Produkte eignen sich gut zur Oberflächenbehandlung und verhalten sich ähnlich wie auf unbehandeltem Holz. Bei auf Wasser basierenden Produkten muss beachtet werden, dass thermisch behandeltes Holz weniger Wasser aufnimmt als normales Holz. Dies kann sich auf die Trockenzeit und Eindringtiefe auswirken (THERMOWOOD [34]).

2.4.3 Produktionsverfahren

Die Parameter der verschiedenen thermischen Behandlungsverfahren unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander. Die industriell eingesetzten Verfahren haben eines gemeinsam, dass sie unter sehr sauerstoffarmen Bedingungen in mehr oder weniger geschlossenen Systemen durchgeführt werden. Die derzeit führenden Verfahren können grob in vier Gruppen eingeteilt werden:

- Kap. 2.4.3.1 Thermische Behandlung mit Öl
(Produktnname z.B. Menz-Holz¹)
- Kap. 2.4.3.2 Thermische Behandlung mit Feuchte- Wärme- Druck- Verfahren
(Produktnname z.B. Plato[®] Holz)
- Kap. 2.4.3.3 Thermische Behandlung unter interner Gasatmosphäre
(Produktnname z.B. Bois Rétifié, Rétification[®] ², Balz-Holz)
- Kap. 2.4.3.4 Thermische Behandlung mit Heiss-Luft
(Produktnamen z.B. ThermoWood[®], „Mafi-Vulcano3“)

2.4.3.1 Thermische Behandlung mit Öl

Beim Öl-Hitze-Verfahren wird das zu behandelnde Holz in heißes Pflanzenöl getaucht und im Ölbad langsam auf 180°C bis 220°C aufgeheizt. Die eigentliche Behandlungsdauer beträgt 2 bis 4 Stunden. Die während der Behandlung austretenden Gase verhindern weitestgehend die Aufnahme von Öl, so dass die Ölausnahme 20-40 kg/m³ je nach Holzdimension meist nicht übersteigt. Die Holzoberfläche ist daher nach der Behandlung trocken. Es entsteht jedoch ein leichter Ölgeruch, der oft als störend empfunden wird. Deshalb begrenzen sich die Anwendungen von Öl behandeltem Holz meist auf die Außenbereiche wie z.B. Gartenmöbel, Terrassenböden oder Pergola (GROSSMANN [16]).

¹ Menz-Holz ist ein Hersteller für Gartenmöbel, Terrassen und Wintergärten aus Rhön in Deutschland. Homepage: <http://www.menzholz.de>, Stand 25.4.2006

² Unter den Namen Bois Rétifié oder Rétification ist das thermisch behandelte Holz in Frankreich verbreitet. Zwei bekannte Thermoholz Hersteller sind die Firmen Fours & Brûleurs REY und Retiwood.

³ Mafi-Vulcano ist ein Produktenname einer Designlinie des Parkettherstellers Mafi. Sie produzieren ausschließlich Parkette, die lackfrei sind. Die Oberflächenversiegelung basiert auf Holzbodenölen. Homepage Firma Mafi: <http://www.mafi.at>, Stand 25.4.2006

2.4.3.2 Thermische Behandlung mit Feuchte- Wärme- Druck- Verfahren

Das FWD-Verfahren (Feuchte- Wärme- Druck- Verfahren) ist besser bekannt unter dem Namen Plato®-Verfahren, wie die gleichnamige Entwicklerfirma PLATO INTERNATIONAL BV [28] (siehe Kap. 2.4.4.4). Beim Plato-Verfahren handelt es sich um einen mehrstufigen Prozess der thermischen Holzveredelung:

1. Hydrothermolyse:

In der ersten Phase wird das Holz in einem Autoklav unter einer Wasserdampfatmosphäre und einer Temperatur von 175°C behandelt. Dabei werden die Hemizellulose und das Lignin inaktiv. Die Zellulose, die für die mechanischen Eigenschaften des Holzes ausschlaggebend ist, bleibt aktiv.

2. Trocknung:

In der zweiten Phase des Prozesses wird das Holz auf 8% Feuchtigkeit getrocknet. Diese Trocknung geschieht in herkömmlichen industriellen Trocknungsanlagen, um in der dritten Phase des Prozesses keine inneren Risse zu erhalten.

3. Aushärtung:

Im dritten Prozessschritt wird das Holz noch einmal auf 175 °C erhitzt, aber diesmal ohne Wasserdampfatmosphäre. Dieser Schritt dient der Vernetzung der inaktiven Hemizellulose und Lignins. Das Resultat dieses Schrittes ist das Erhalten der Dauerhaftigkeit und der Dimensionsstabilität des Holzes.

4. Veredelung:

Im vierten und letzten Prozessschritt wird das Holz noch konditioniert. Die Holzfeuchtigkeit von 1%, die am Ende des dritten Schrittes herrscht, muss auf eine Weiterverarbeitungsfeuchtigkeit von 6-8% gesteigert werden.

(PLATO INTERNATIONAL BV [28], 1. EUROPÄISCHER THERMOHOLZTAG IN DRESDEN 2003 [33] und GROSSMANN [16])

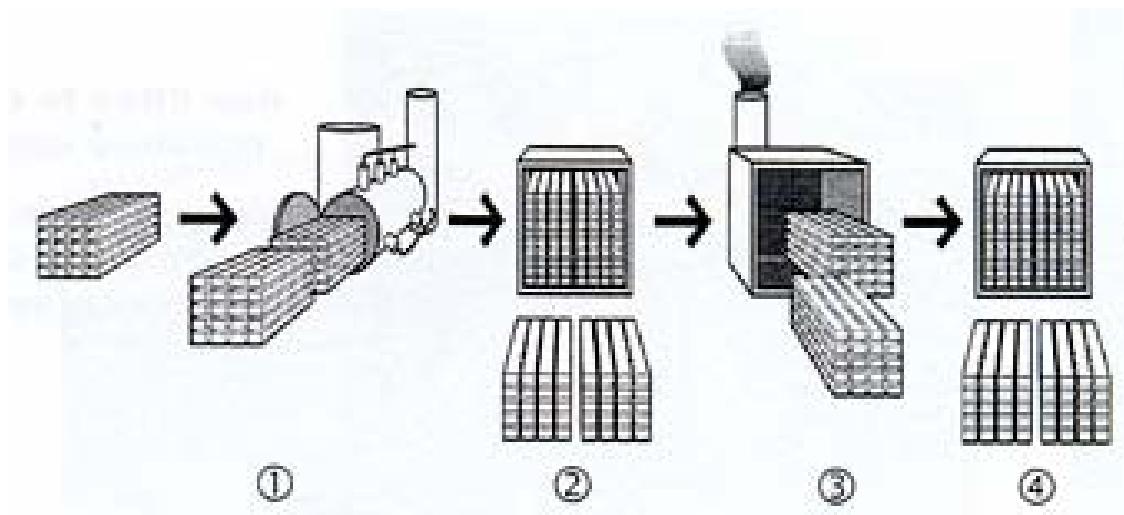


Abbildung 12: Die vier Phasen des Plato Veredelungsprozesses für Thermoholz

2.4.3.3 Thermische Behandlung unter interner Gasatmosphäre

Bei Inertgas-Verfahren wird anstelle von Wasserdampf oder Öl oft mit Stickstoff gearbeitet. Diese Stickstoffatmosphäre besitzt einen Restsauerstoffgehalt von unter 2% und dient als Schutzatmosphäre gegen das mögliche Einzünden des Holzes. Die thermische Behandlung des Holzes findet unter erhöhtem Druck statt (GROSSMANN [16]).

2.4.3.4 Thermische Behandlung mit Heiss-Luft

Die für dieses Verfahren eingesetzten Anlagen gleichen einer Trockenkammer. In der Aufheizphase wird das Holz zunächst getrocknet. Durch Einleiten von Wasserdampf wird die Umgebungsluft weitgehend entfernt (Sauerstoffrestgehalt < 3.5%), so dass während der eigentlichen Behandlung bei 150°C bis 250°C das Holz nicht zu stark oxydieren (verbrennen) kann. Die Gesamtprozessdauer beträgt ca. 3 Tage. Die durch die Behandlung entstehenden Gase können nach OELHAFEN [26] durch ihrer Verbrennung als Wärmeenergie wieder in den Prozess zurückgeführt werden. Durch das ständige Abführen der entstehenden Pyrolysegase wird der als unangenehm empfundene Holzgeruch verringert (GROSSMANN [16]).

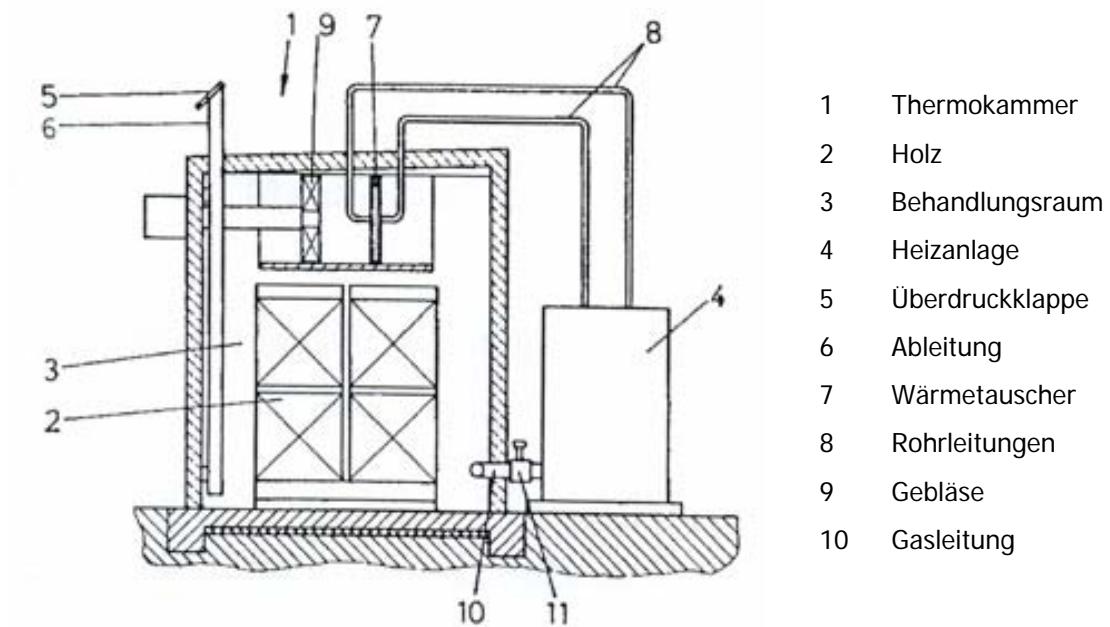


Abbildung 13: Heiss-Luft-Thermokammer der Firma Mühlböck

2.4.4 Industrie, Handel und Verbände

Als Erste interessierten sich die Finnen für die thermische Holzbehandlung ohne chemische Zusätze. Mittlerweile wird thermisch behandeltes Holz in vielen Ländern in Europa hergestellt. Auch in der Schweiz hat die Technologie der thermischen Holzbehandlung Einzug gefunden. Zumal Thermoholz, das aus einheimischen Hölzern hergestellt wird, die sehr viel widerstandsfähigeren Tropenhölzer wie Bangkirai oder Teak zu ersetzen vermag.

In folgenden Abschnitt werden kurz die wichtigsten Firmen, die in der Thermoholz-Branche tätig sind, vorgestellt:

2.4.4.1 Balz Holz AG

Die Firma Balz Holz AG in Langnau im Emmental wurde 1834 gegründet. Anfangs produzierte und handelte sie mit Leder. 1861 wechselte die Firma in die Holzbranche. Die Firma Balz produziert zurzeit auf einer Fläche von 20'000m². Ihre Dienstleistungen reichen von der Holztrocknung und Holzimprägnierung über die Verleimung von Keilzinken und Brettschichtholz bis zur Herstellung von Lärmschutzwänden.

Bei der Firma Balz Holz AG geschieht die Vergütung des Holzes in einem Autoklaven (Abbildung 14) der Anfangs 2002 in Betrieb genommen wurde. Die Vergütung wird in einer Inertgasatmosphäre aus Stickstoff unter Druck und bei einer Temperatur von 150-200°C über mehrere Stunden durchgeführt.



Abbildung 14: Der Autoklav der Fa. BALZ HOLZ AG [5] in Langnau im Emmental wird für die Herstellung von künstlichem Altholz (thermisch behandeltes Holz) verwendet. Die thermische Behandlung geschieht in einer Intergasatmosphäre aus Stickstoff unter Druck und bei einer Temperatur zwischen 150-200°C über mehrere Stunden.

Das thermisch behandelte Holz wird von der Firma Balz als Alternative für Altholz vermarktet. Das „echte“ Altholz, das aus Abrissgebäuden stammt, muss zuerst aufwendig aufgearbeitet werden und ist somit teurer. Künstlich hergestelltes Altholz (Abbildung 15) wird von Architekten und Bauherren gerne im hochwertigen Innenausbau eingesetzt. Hauptsächlich wird thermisch behandeltes Holz in den vom Tourismus geprägten Alpenregionen eingesetzt.



Abbildung 15: Künstliches Altholz (thermisch behandeltes Holz) wird häufig von Architekten und Bauherren im hochwertigen Innenausbau genutzt. Hauptsächlich wird thermisch behandeltes Holz in den vom Tourismus geprägten Alpenregionen eingesetzt.

2.4.4.2 Thermowood

Der Name Thermowood hat zwei Bedeutungen. Zum einen ist es ein Produktnamen für thermisch behandelte Hölzer. Zum anderen ist Thermowood das Logo des finnischen Thermowood-Verbandes (Finnish Thermowood Association).

Der finnische Thermowood-Verband wurde im Dezember 2000 gegründet. Er hat das Ziel, die Verwendung der Thermowood-Produkte zu steigern. Zusätzliche Aufgaben dieser Organisation sind die Qualitätssicherung ihres Produktes, ihre Klassifizierung und die Weiterentwicklung von thermisch behandeltem Holz. Die Mitglieder des Verbandes sind entweder in der Produktion von thermisch behandeltem Holz tätig, oder sie stellen die Anlagen für die thermische Behandlung her. (THERMOWOOD[34])

2.4.4.3 Stellac Oy

Stellac Oy ist ein finnisches Unternehmen, das mit der Entwicklung der thermischen Behandlung von Holz entstand. Der heutige Geschäftsführer von Stellac Oy arbeitete Anfangs der 90er Jahre als Projektforscher an den Grundlagen der thermischen Holzbehandlung mit. 1997 gründete er mit seinen Geschäftspartnern die Firma Stellac OY und realisierte die thermische Behandlung von Holz im industriellen Massstab. Das Hauptprodukt der Firma sind die Anlagen zur thermischen Holzveredlung. Zudem produzieren sie Anlagen für die Holztrocknung (STELLAC [31]).

2.4.4.4 Plato International BV

Plato International BV ist ein Niederländischer Thermoholz Hersteller, der mit speziell schonenden und patentierten vier Phasen Veredelungsprozess Holz thermisch behandelt (siehe Kap. 2.4.3.2). Plato forschte erstmals 1993 im Bereich der thermischen Holzveredelung. 2000 erbaute die Firma Plato in Arnhem für 30 Millionen Euro eine Produktionsstätte für die Behandlung von Thermoholz.

Die Firma Plato International BV ist in zwei Abteilungen strukturiert. Plato Wood Products BV ist die Abteilung, die für die Produktion des Thermoholzes zuständig ist. Die zweite Abteilung, Plato International Technology BV, befasst sich mit der Weiterentwicklung des thermisch vergüteten Holz und dessen Herstellungsprozesses.

(PLATO INTERNATONAL BV [28] und 1. EUROPÄISCHER THERMOHOLZTAG IN DRESDEN 2003 [33])

2.4.4.5 Thermoholz austria

Die Firma Thermoholz austria ist ein Gemeinschaftsprojekt der Firmen MIRAKO [22] und der Firma MÜHLBÖCK [23]. Thermoholz austria ist eine der ersten Firmen in Österreich, die thermisch behandeltes Holz herstellt und vermarktet.

Die Firma Mirako wurde 1957 von Herta Mitteramskogler gegründet. Im Jahre 2000 baute Mitteramskogler eine Versuchsanlage für die thermische Behandlung von Holz. 2002 erhielt Mitteramskogler den Oberösterreichischen Waldpreis für ihre Initiative bei der Vermarktung und Entwicklung von thermisch behandeltem Holz. Im gleichen Jahr gründete sie die Firma Thermoholz austria und baute mit ihren Geschäftspartner Mühlböck die erste industriell einsetzbare Thermokammer in Österreich. Bereits 2004 konnte die Firma Thermoholz austria ihre Kapazität verdoppeln. (THERMOHOLZ AUSTRIA [2]).

3 Zielstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden im Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Corbat Holz, Bauwerk AG, Balz Holz AG, Fensterfabrik Albisrieden AG und dem Klebstoffhersteller Geistlich AG die Eigenschaften eines Verbundes zwischen thermisch behandeltem und unbehandeltem Buchenholz erarbeitet. Dazu wird auf folgende Produkte eingegangen:

- Profile, insbesondere Fensterprofile
- mehrschichtige Plattenelemente, insbesondere Dreischichtplatten

Das verwendete Buchenholz kommt dabei aus dem Stammstück zwischen dem Erdstamm und dem Zopfstamm, dem so genannten mittleren Stammabschnitt sein. Dabei sind folgende Fragestellungen zu klären:

Allgemeine, produktübergreifende Fragestellung

Es sollen Verklebung von homogenen und Mischaufbauten aus thermisch behandeltem und unbehandeltem Buchenholz mit den Klebstoffsorten UF (Harnstoff-Formaldehyd), PVAc (Polyvinilacetat) und 1-K PUR (1-Komponenten Polyurethan) geprüft werden. Die Klebstoffe werden hinsichtlich ihrer Fugenfestigkeit geprüft, um den geeigneten Klebstoff für die Verklebung von thermisch behandeltem Holz zu ermitteln.

Hauptpartner: Balz Holz AG (Lieferung Thermoholz), Fensterfabrik Albisrieden AG, Purbond und Geistlich (Bereitstellung Klebstoffe)

Verklebung von Profilen (beispielhaft an Fensterprofilen)

Es sollen Materialkombinationen (z.B. unbehandeltes und behandeltes Holz) hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit getestet werden. Dabei soll thermisch behandeltes Holz aussen bzw. innen eingesetzt werden. Hier soll das Verhalten der Profile gegenüber äusseren Einflüssen herausgefunden werden.

Hauptpartner: Fensterfabrik Albisrieden AG (Fertigung Fenster)

Verklebung flächiger Elemente (beispielhaft an dreischichtigen Platten)

Es sollen die Auswirkungen des unterschiedlichen Quell- und Schwindverhaltens von thermisch vergütetem und unvergütetem Buchenholz (Vergleich thermisch behandelt und unbehandelt) erarbeitet werden. Ausserdem sollen die Auswirkungen der Quellung auf das Gesamtelelementes beim einem Klimawechsel Trocken/Feucht auf die Spannungen zwischen den Lagen sowie evtl. auftretende Fugenöffnungen und Delaminierungseffekte festgestellt werden. Hier versucht man die Auswirkungen der veränderten Eigenschaften des thermisch behandelten Holzes auf dreischichtige Plattenelemente zu ermitteln.

Zusätzlich wird der Einfluss eines abwechselnden Feucht-/Trockenklimas auf die Festigkeit der Klebefuge bei Zugscherproben untersucht.

Hauptpartner: Bauwerk AG, Corbat Holding, Balz Holz AG.

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsübersicht

Tabelle 3: Übersicht der Versuchsreihen mit ihren Prüfungen oder Verfahren

Versuchsreihe	Prüfung/Verfahren	Normen	Methoden	Ergebnisse Diskussion
Vorversuche:				
• Spannungen im unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes	Bestimmung der Formstabilität beim Auftrennen von Buchenholz zu immer kleineren Querschnitten.		Kap.: 4.4.1 Seite: 33	Kap.: 5.1 Seite: 57
• Klebfugenfestigkeit	Zugscherprüfung	DIN EN 205	Kap.: 4.4.2 Seite: 36	Kap.: 5.2 Seite: 62
Hauptversuche:				
<i>Versuchsreihe an Fensterprofilen</i>				
• Verhalten von Fensterprofilen bei natürlicher und künstlicher Bewitterung	Fensterecken werden einer natürlichen und einer künstlichen Bewitterung ausgesetzt, um den Alterungsprozess optisch zu ermitteln.	DIN EN 927-6	Kap.: 4.6.1 Seite: 43	Kap.: 5.3 Seite: 65
<i>Versuchsreihen an Dreischichtplatten</i>				
• Plattenverzug	Die Prüfkörper werden einem Differenzklima ausgesetzt und in Abhängigkeit der Zeit des Plattenverzugs gemessen.	TGL 4413	Kap.: 4.6.2 Seite: 45	Kap.: 5.4 Seite: 69
• freie Quellung	Die Prüfkörper werden mit einem induktiven Wegaufnehmer kontinuierlich auf ihre Quellung hin untersucht.		Kap.: 4.6.3 Seite: 47	Kap.: 5.5 Seite: 72
• behinderte Quellung	Die Prüfkörper werden in eine Quellkraftprüfvorrichtung eingelegt und einem Trocken-Feucht Klima ausgesetzt.		Kap.: 4.6.4 Seite: 49	Kap.: 5.6 Seite: 76
• Eigenspannung	Freischnitt-Methode		Kap.: 4.6.5 Seite: 52	Kap.: 5.7 Seite: 81
<i>Versuchsreihe an Zugscherproben</i>				
• Delaminierungseffekt bei Wechselklimalagerung	Die Prüfkörper werden einem zyklischen Wechselklima ausgesetzt und anschliessend einer Zugscherprüfung unterzogen.	DIN EN 205	Kap.: 4.6.6 Seite: 55	Kap.: 5.8 Seite: 86

4.1.1 Variablen, Messgrößen und Einheiten

Tabelle 4: Variablen, Messgrößen und Einheiten der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Variablen	Messgrößen	Einheit	Anzahl Prüfkörper
• Spannungen in unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes	- Probenquerschnitt - Feuchtigkeit	- Verformung	mm / m`	2
• Klebfugenfestigkeit	- Klebstoffe - Verklebeklimate - Prüfklima - Prüfkörperaufbau	- Scherfestigkeit	N / mm ²	10
• Verhalten von Fensterprofilen bei natürlicher und künstlicher Bewitterung	- Fensterprofilaufbau - Bewitterungsprogramm	- optische Bewertung		1
• Plattenverzug	- Prüfkörperaufbau - Zeit	- Formänderung in Abhängigkeit der Zeit	mm / Tag	2
• freie Quellung	- Prüfkörperaufbau - Zeit	- Dehnung	% pro Tag	2
• behinderte Quellung	- Prüfkörperaufbau - Zeit - Holzfeuchtigkeit - relative freie Quellung	- Quelldruck in Abhängigkeit - der Zeit - der Holzfeuchtigkeit - der relative freien Quellung	N/mm ² / Tag N/mm ² / % N/mm ² / %	1
• Eigenspannung	- Prüfkörperaufbau - Versuchsreihe	- Spannung	N / mm ²	1 - 2
• Delaminierung	- Prüfkörperaufbau - Dauer des Wechselklimas	- Scherfestigkeit	N / mm ²	15

4.2 Versuchsmaterial und Geräte

4.2.1 Holz

Das verwendete Holz stellte die Firma Balz Holz AG in Langnau i.E (im Emmental) zur Verfügung. Das Buchenholz stammte aus dem mittleren Stammabschnitt. Die genaue Herkunft des Holzes ist nicht bekannt. Das thermisch modifizierte Buchenholz wurde in einem Autoklaven bei einer Stickstoffatmosphäre behandelt. Die thermische Behandlung fand bei zwei unterschiedlichen Behandlungsstufen statt. Die Behandlungsstufe III bewirkt eine intensivere thermische Vergütung des Holzes als die Stufe II. Die genauen Parameter der Behandlungsstufen sind nicht bekannt. Die Bretter waren unterschiedlich lang und breit und zwischen 25 und 30mm dick. Alle Bretter waren besäumt und parallel geschnitten, aber nicht markgetrennt.

Tabelle 5: Abkürzungen der verwendeten Behandlungsstufen von Buchenholz

Kürzel	Bezeichnung
I	thermisch unbehandeltes Buchenholz
II	thermisch behandeltes Buchenholz der Behandlungsstufe II
III	thermisch behandeltes Buchenholz der Behandlungsstufe III

4.2.2 Presse

Zur Anwendung kam die Zschokke Laborpresse 4000 kN mit beheizbaren Pressplatten. Der Hersteller der Presse ist die Firma Conrad Zschokke AG aus Döttingen. Der Umbau der Presse wurde im Jahr 2005 von der Firma Imex Technik AG aus Döttingen durchgeführt.

Die maximale Presskraft liegt bei 4000 kN, das entspricht einem Öldruck von 300 bar. Dabei kann der Öldruck auf 0.1 bar genau abgelesen werden. Die Abmessungen der Pressplatten liegen bei 640 x 640mm. Diese können auf eine maximale Temperatur von 200°C erhitzt werden.



Abbildung 16: Zschokke Laborpresse 4000 kN mit beheizten Pressplatten

4.2.3 Universalprüfmaschine (Zwick Z100)

Einige Prüfungen der Materialfestigkeiten wurden mit der Universalprüfmaschine Zwick Z100 der Firma Zwick GmbH & Co in Ulm durchgeführt. Die Hauptbestandteile der Zwick Z100 bestehen aus einem Lastenrahmen, in dem eine Traverse stufenlos an zwei Stahlsäulen geführt wird. Der Antrieb der Traverse verlief über eine Kugelgewindestange, die Arbeiten im Zug- und Druckbetrieb ermöglicht. Über eine Kraftmessdose werden die auftretenden Kräfte gemessen und an den Computer weitergeleitet. Es können dabei Prüfungen bis zu einer maximal Kraft von 100 kN durchgeführt werden. Die Ausgabe der Daten und die Steuerung der Maschine erfolgt über die Software testXpert®.

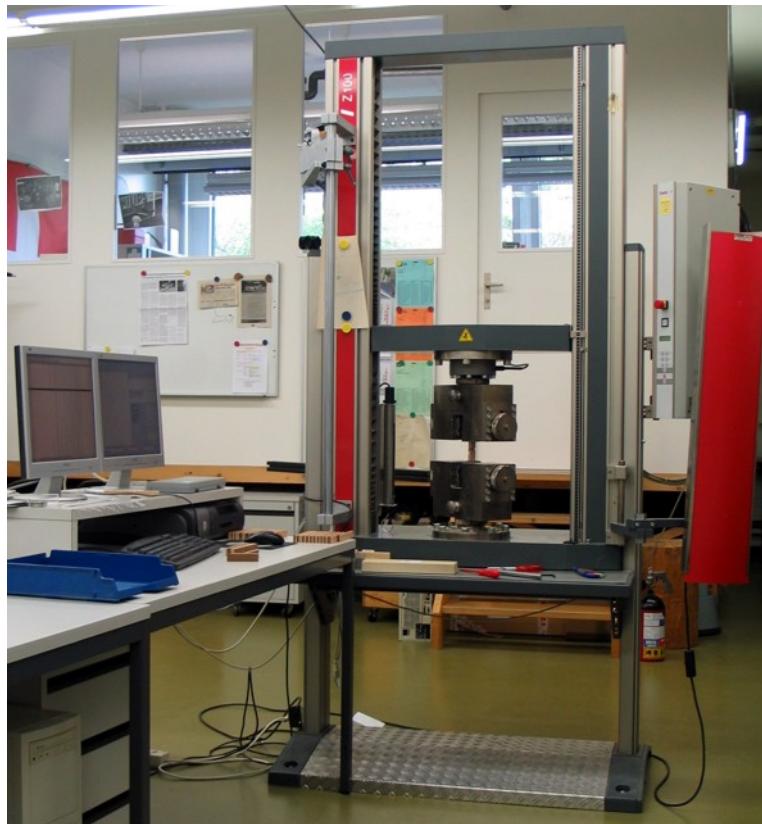


Abbildung 17: Universalprüfmaschine Zwick Z100

4.3 Nummerierungssystem der Prüfkörper

4.3.1 Fensterprofile

Tabelle 6: Nummerierungssystem der verwendeten Fensterprofile.

Kürzel	Aufbau	Schicht	Material
[DS: Deckschicht] [MS: Mittelschicht]			
I-I-I		DS MS DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch unbehandeltes Buchenholz
II-II-II		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III-III-III		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III
II-I-II		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III-I-III		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III

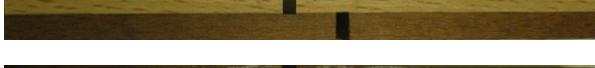
4.3.2 Plattenaufbau

Tabelle 7: Nummerierungssystem der verwendeten Dreischichtplatten.

Kürzel	Aufbau	Schicht	Material
		[DS: Deckschicht] [MS: Mittelschicht]	
I-I-I		DS MS DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch unbehandeltes Buchenholz
II-II-II		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III-III-III		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III
II-I-II		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III-I-III		DS MS DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III

4.3.3 Zugscherproben

Tabelle 8: Nummerierungssystem der verwendeten Zugscherproben

Kürzel	Aufbau	Material
I/I		thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch unbehandeltes Buchenholz
II/II		thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III/III		thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III
II/I		thermisch unbehandeltes Buchenholz thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II
III/I		thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III thermisch unbehandeltes Buchenholz
III/II		thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III

4.3.4 Nummerierung der eingesetzten Klimate

Die Klimate sind im Text in einer eckigen Klammer aufgeführt. In der Klammer steht als erstes die Temperatur in °C. Danach ist die relative Luftfeuchtigkeit in % angegeben. Die zwei Zahlen sind mit einem Schrägstrich unterteilt und werden ohne Einheit geschrieben.

Beispiel:

Das Klima [20/65] hat also eine Temperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 65%.

Die Klimate bei den Probenummerierungen sind mit einem Kleinbuchstaben abgekürzt. Die jeweiligen Abkürzungen zu den Klimaten sind in der Tabelle 9 aufgeführt. Das Normklima [20/65] wurde in Anlehnung der DIN EN 50 014 [15] gewählt

Tabelle 9: Abkürzungen der Klimate für die Probenummerierung und im Text

Kürzel Proben	Kürzel Text	Bezeichnung	Temperatur	relative Luftfeuchtigkeit
e	[20/25]	extremes Trockenklima	20°C	25%
t	[20/35]	Trockenklima	20°C	35%
s	[20/50]	Sorptionsklima	20°C	50%
n	[20/65]	Normalklima	20°C	65%
q	[20/85]	Quellklima	20°C	85%
f	[20/93]	Feuchtklima	20°C	93%

4.3.5 Klebstoffe und ihre Produktnamen

Tabelle 10: Abkürzungen der eingesetzten Klebstoffe

Kürzel bei den Proben	Kürzel im Text	Produktname
1	PUR 1	Mirapur 9521
2	PVAc	Miracol 6360
3	PUR 2	Purbond HB 110
4	PUR 3	Purweld 665
5	UF	Placol 4506

4.4 Vorversuche

4.4.1 Bestimmung der Spannungen in unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mittels Untersuchung der Verformung

Durch wuchsbedingte Spannungen im Holz, vor allem in Buchenholz des mittleren Stammabschnittes (siehe Kap. 2.3.2.2), verformt das Holz beim Auftrennen. Diese Verformung ist ein Indikator für die wirkenden Spannungen. Je grösser die Verformung ist desto grösser ist der Einfluss der vorhandenen Spannungen. Um diese Verformungen näher zu untersuchen, wurde ein Buchenstamm des mittleren Stammabschnittes zu Brettern eingeschnitten, im Schnittholztrockner getrocknet und anschliessend an der ETH zu immer kleineren Querschnitten aufgetrennt. Mit dieser Versuchsreihe erhofft man den Verformungsgrad in Abhängigkeit der Querschnittsänderung zu bestimmen. In einem zweiten Schritt wird der Einfluss von Feuchtigkeit auf den Verformungsgrad nach einer Quellung der Buchenbretter ermittelt. Dafür wurde die eine Hälfte des Brettes nach dem Auftrennen in einem Feuchtklima gelagert.

4.4.1.1 Material

Der verwendete Buchenstamm des mittleren Stammabschnittes kam aus der Region Willisau im Kanton Luzern. Der Stamm hatte ein Alter von 80-90 Jahren und wuchs in Hanglage auf einer Höhe von 700-800 Meter über Meer. Er wurde im Winter 05/06 gefällt. Der Buchenstamm war 4.5m lang und hatte einen mittleren Stammdurchmesser(Mittenstammdurchmesser) von 36cm.

4.4.1.2 Methode

Bestimmen der Verformung beim Einschnitt eines Buchenstammes des mittleren Stammabschnittes:

Die Bestimmung der Verformung erfolgte mittels einer Krümmungslehre. Diese bestand aus einem Aluminiumprofil, das an beiden Enden verschiebbare Auflagerstifte besass. Die in der Mitte angebrachte Messuhr der Firma Mitutoyo war auf 15mm geeicht (Abbildung 18). Da die Krümmungslehre nur über eine Länge von max. 2.20m eingesetzt werden konnte, wurde der Stamm in der Mitte halbiert und man erhielt zwei Stammstücke (Stammstück 1 und 2) von je 2.25m Länge. Aus den Stammstücken 1 und 2 trennte man zwei Balken mit einem Querschnitt von 250/250mm heraus. Aus diesen Balken wurden anschliessend Bretter mit den Dicken 30, 40 und 50mm zu je zwei Stück herausgeschnitten. Dabei wurden zwei verschiedene Einteilungen gewählt, eine rot und eine blau. Bei der roten Einteilung war das dünste Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dickste im Stammzentrum. Bei der blauen Einteilung befand sich das dünste Brett im Stammzentrum und das dickste an der Peripherie des Stammes (Abbildung 19). Diese Unterteilung der Stammhälften wählte man, um den Einfluss von Zugspannungen (eher in der Peripherie des Stammes) und Druckspannungen (eher im Stammzentrum) auf die Verformung zu untersuchen. Die Messpunkte hatten einen Abstand (l) von 2.12m.



Abbildung 18: Krümmungslehre zur Bestimmung der Verformung von Brettern nach dem Einschnitt

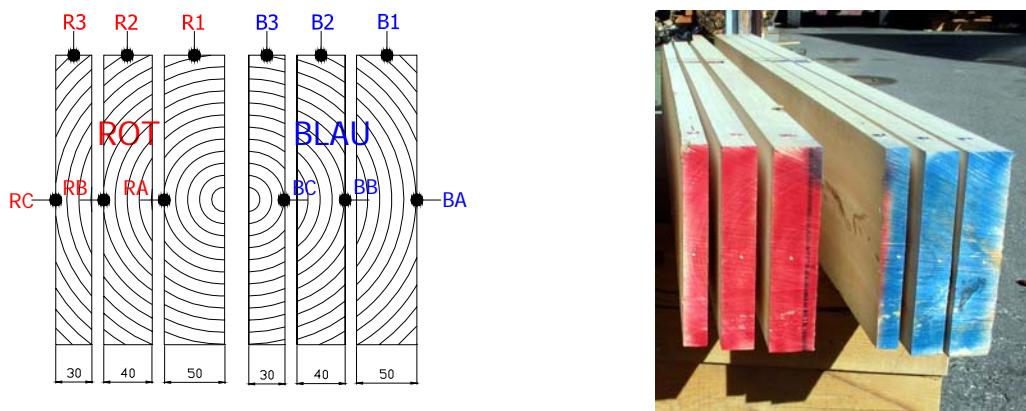


Abbildung 19: Einteilung der Brettdicken und Position der Messpunkte.

Vor dem Auftrennen der Balken zu Brettern wurde eine Nullungsmessung an den Messpunkten durchgeführt. Die erste Messung der Verformung erfolgte nach der Marktrennung der beiden Balken. Die zweite Messung führte man nach dem Auftrennen in die einzelnen Bretter durch. Nach dem Beenden des Einschnitts trocknete man die Bretter in einer handelsüblichen Zu- und Abluft- Trocknungsanlage. Dazu wurde folgendes Trocknungsprogramm gefahren. Zuerst wurden die Buchenbretter während 2h bei 45°C durchgewärmt. Anschliessend erhöhte sich die Trocknungstemperatur auf 50-55°C und blieb konstant bis zum Erreichen des Fasersättigungspunktes ($u=$ ca. 30%) des Holzes. Danach kam eine schrittweise Erhöhung der Temperatur von 60°C zu 65°C bis das Buchenschnittholz eine Holzfeuchtigkeit von 8-12% erreicht hatte. Anschliessend an die Trocknung der Bretter wurde erneut eine Messung der Verformung durchgeführt. Die Berechnung der Verformung erfolgte mit der Formel 7. Um einen Vergleich mit dem Auftrennen der Bretter zu ermöglichen, bezog man die Verformung auf einen Meter.

$$f = \frac{f_2 - f_1}{l} \cdot 1000$$

Formel 7: Verformung

f : Verformung [mm/m`]

l : Abstand der Messpunkte [mm]

f_1 : Länge vor dem Auftrennen [mm]

f_2 : Länge nach dem Auftrennen [mm]

Bestimmung der Verformung beim Auftrennen von Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes:

Die getrockneten Bretter mit einer Holzfeuchte von 8% wurden auf eine Länge von 1m und eine parallele Breite von 240mm zugeschnitten. Danach erhielt jedes Brett auf beiden Schmalflächen drei Messpunkte (A, B und C). Der Messpunkt B war in der Mitte der Schmalfläche. Die Messpunkte A und C lagen in einem Abstand von 150mm vom Messpunkt B entfernt. Um eine präzise Messung zu ermöglichen, fügte man die Schmalflächen der Bretter an der Hobelmaschine zuvor leicht an. Die Trennschnitte erfolgten so, dass sie die Bretter halbierten. Das bedeutet, dass der erste Trennschnitt eine Breite des Brettes von 120mm ergab, der zweite eine Breite von 60mm und der dritte eine Breite von 30mm. Nach der Auftrennung wurde die eine Hälfte des Brettes in einem Feuchtklima von [20/95] eingelagert und die andere Hälfte weiter aufgetrennt. Die Bretter im Feuchtklima lagerten zwei Wochen dort und wurden anschliessend auf ihre Verformung nach einer Quellung gemessen. Sie erreichten dabei eine Holzfeuchte von 19%.

Zur Messung der Verformung an den Brettern wurde eine Prüfvorrichtung auf einer Trägerplatte mit der Abmessung 700/500mm aufgebaut. Die Trägerplatte besass Gewindebohrungen mit einer Rasterung von 25/25mm. In diese Gewindebohrungen konnten Stativstäbe eingeschraubt werden, an denen die zwei Messuhren der Firma Mitutoyo montiert wurden (Abbildung 20). Die Messgenauigkeit der Messuhren betrug 0.01mm. Die auf die Breitfläche des Brettes messende Messuhr eichte man anfangs Messung auf 15mm. Um den Einfluss der sägerauen Oberfläche zu minimieren, lag einen Stahlquader mit einer Fläche von 30/10mm und einer Dicke von 10mm unter dem Messdorn, um dessen Auflagefläche zu vergrössern (Abbildung 21). An dieser Messuhr konnte die Verformung in der Dicke des Brettes abgelesen werden. Die zweite Messuhr wurde auf 5mm geeicht und mass auf der Schmalfläche des Brettes. Diese Messuhr zeigte die Verformung in der Breite des Brettes.

Die Bretter lagerten auf drei M8 Aussensechskant-Schrauben. Zwei dieser Auflager wurden je nach Breite der Bretter verschoben. Der Seitenanschlag bestand aus zwei Stahlstangen, die mit der Trägerplatte verschraubt waren. Die Auflager und die Anschläge hatten einen Abstand (l) von 650mm. Die Berechnung der Verformung erfolgte mit der Formel 7.

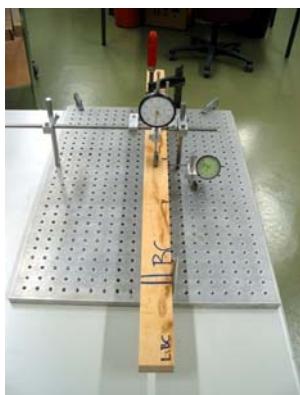


Abbildung 20: Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Verformung nach dem Auftrennen von Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes.

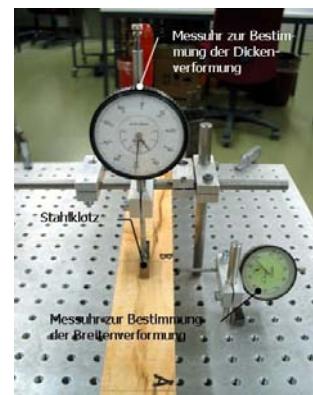


Abbildung 21: Messuhren der Firma Mitutoyo. Die rechte Messuhr (grüne) misst die Breitenverformung. Die linke (weiße) misst die Dickenverformung der Buchenbretter.

4.4.2 Prüfung der Klebfugenfestigkeit verschiedener Klebstofftypen

4.4.2.1 Material

Tabelle 11: Verarbeitungsmerkmale der verwendeten Klebstoffe

Bezeichnung	Mirapur 9521 ³	Miracol 6360	Purbond HB 110 ⁴	Purweld 665	Placol 4506 ²
<i>Kürzel</i>	PUR 1	PVAc	PUR 2	PUR 3	UF
<i>Hersteller</i>	Geistlich	Geistlich	Purbond	Purbond	Geistlich
<i>Art</i>	1K-PUR	PVAc	1K-PUR	1K-PUR	UF
<i>Auftragsmenge</i>	150-300 g/m ²	120-200 g/m ²	200-300 g/m ²	150-300 g/m ²	80-120 g/m ²
<i>Offene Wartezeit</i>	max. 1 h	15 min	1 h	1 h	max. 15 min. [23/50]
<i>Pressdruck</i>	0.1-0.8 N/mm ²	0.25 N/mm ²	0.6-0.8 N/mm ²	0.6-0.8 N/mm ²	0.25 N/mm ²
<i>Mindestpresszeit</i>	10-30 °C: 3-6 h	20 °C: mind. 10 min. 35 °C: 5-8 min. 80 °C: 1.5-2 min.	[20/65]: 3h	[20/65]: 3h	60 °C: 20 min 70 °C: 12 min. 80 °C: 6min. 90 °C: 4 min. 110 °C: 1.5 min. ¹
<i>Aushärtezeit</i>	3-6 h	1-10 h	3 h	3 h	direkt nach dem Pressen
<i>Endfestigkeit</i>	7 Tage	7 Tage	24 h	24 h	7 Tage
<i>Viskosität</i>	pastös	5500-8000 mPa.s	3000 mPa.s	8000 mPa.s	pulverform
<i>Holzfeuchte</i>	6-18 %	6-12 %	[20/65] 12%	[20/65] 12%	7-12%; optimal 8-9%

1) Bei mehr als 1 mm Holzdicke muss die Presszeit pro zusätzlichen mm um 1-2 min. verlängert werden.

2) Mischverhältnis: 5/3; Placol 4506/Wasser (20 °C)

3) Primern möglich (Mirafles Primer 9509)

4) Für tragende Holzbauteile geeignet (nach DIN 68141 / EN 301)

4.4.2.2 Methode

Da nur wenige Erfahrungen mit Verklebungen aus thermisch behandeltem Holz vorhanden sind, sollte diese Versuchsreihe die Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeit verschiedener Klebstoffe mit unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes näher untersuchen. Der am Besten geeignete Klebstoff wurde für Verklebungen in den weiteren Versuchen verwendet.

Es wurden Prüfkörper mit unterschiedlichen Aufbauten aus thermisch behandeltem und thermisch unbehandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe III) aus dem mittleren Stammabschnitt der einem Klimawechsel ausgesetzt. Für die Verklebung der Prüfkörper standen drei Klebstoffe der Firma Geistlich und zwei Klebstoffe der Firma Purbond zur Verfügung (Tabelle 11). Die Festigkeit des Klebstoffes wurde mit Hilfe der Zugscherprüfung nach DIN EN-205 [13] und der Formel 8 ermittelt.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Formel 8: Klebstofffestigkeit

T: Festigkeit [N/mm²]

F: Kraft [N]

A: Fläche [mm²]

Aus dem thermisch behandelten und unbehandelten Buchenholz wurden Bretter von 550mm Länge, 100-150mm Breite und 7mm Dicke zugeschnitten. Die zugeschnittenen Bretter lagerten bei den Verklebeklima [20/65] und [20/35]. Nach Erreichen der Massenkonstanz wurden die Bretter auf eine Enddicke von 5mm gehobelt und anschliessend verklebt. Die Verklebung der Bretter erfolgt nach den Parametern der Tabelle 12. Dabei ist zu beachten, dass die Bretter die im Verklebeklima [20/35] lagerten und mit einem 1-K PUR Klebstoff appliziert wurden, eine beidseitige Vorbehandlung mit 50g/m² Leitungswasser erhielten. Diese Vorbehandlung führte man durch, da 1-K PUR zur Aushärtung Feuchtigkeit und eine Mindestholzfeuchte von etwa 8% benötigt (KÄGIE [19]). Die Gleichgewichtsfeuchte des wärmebehandelten Holzes lag im unteren Bereich bei 5%.

Tabelle 12: Parameter bei der Verklebung der Zugscherproben

Bezeichnung	Mirapur 9521 (1-K PUR)	Miracol 6360 (PVAc)	Purbond HB 110 (1-K PUR)	Purweld 665 (1-K PUR)	Placol 4506 (Harnstoffharz)
Kürzel	PUR 1	PVAc	PUR 2	PUR 3	UF
Auftragsmenge (einseitig)	200 g/m ²	200 g/m ²	200 g/m ²	200 g/m ²	100 g/m ²
Pressdruck	0.8 N/mm ²	0.25 N/mm ²	0.8 N/mm ²	0.8 N/mm ²	0.25 N/mm ²
Presszeit	3h bei 30°C	10 min.	3h	3h	15 min bei 80 °C

Die Verpressung der Bretter geschah in der Zschokke Laborpresse (siehe Kap. 4.2.2). Nach der Verklebung lagerten die Bretter erneut für 7 Tagen in ihrem jeweiligen Verklebeklima. Beim Erreichen der Endfestigkeit des Klebstoffes wurden die verklebten Bretter anhand der DIN EN 205 [13] zu Prüfkörpern geschnitten (Abbildung 22). Anschliessend lagerten je 12 Prüfkörper pro Verklebeklima und Prüfkörperaufbau in den Prüfklimaten [20/35], [20/65] und [20/85]. Erreichten die Prüfkörper ihre Massenkonstanz wurden die Bruchflächen vermessen und anschliessend in der Universalprüfmaschine (siehe Kap. 4.2.3) auf ihre Zugscherfestigkeit geprüft.

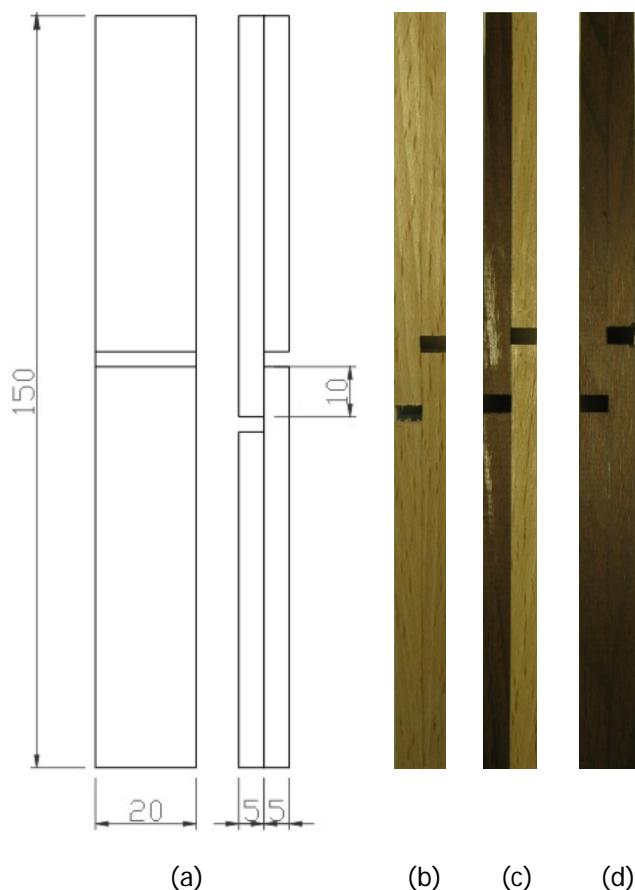


Abbildung 22: (a) Geometrie der Zugscherprobe nach DIN 205 und die drei Probenaufbauten (b) unbeschichtetes/unbeschichtetes Buchenholz; (c) unbeschichtetes/thermisch behandeltes (Stufe III); (d) thermisch behandeltes (Stufe III)/thermisch behandeltes (Stufe III).

4.5 Herstellung der Dreischichtplatten und Fensterprofile

4.5.1 Herstellung Fensterprofile

Aus den angelieferten Brettern wurden markgetrennte Streifen von 1.2m Länge und 70mm Breite zugeschnitten. Anschliessend lagerten sie im Normalklima [20/65] bis zum Erreichen der Massenkostanz. Zur Herstellung der Fensterprofile benötigte man Rohlinge mit der Abmessung von ca. 1200/70/68mm (Länge/Breite/Dicke). Die angelieferten Bretter waren unterschiedlich dick. Das unbehandelte Buchenholz hatte eine Dicke von 25mm und die thermisch behandelten Bretter eine Dicke von 30mm. Somit wurden aus den unbehandelten Buchenbrettern Lamellen mit einer Dicke von 17mm und aus den thermisch behandelten Buchenbrettern Lamellen mit einer Dicke von 23mm oder 17mm gehobelt. Der Verwendungsort der unterschiedlichen Dicken und Behandlungsstufen der Lamellen ist in der Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Schichtaufbau der hergestellten Fensterprofile. Die Lamellen der Profile wurden mit Purbond HB 110 der Firma Purbond, ein faserverstärkter 1-K PUR Klebstoff (Einkomponenten Polyurethan), verklebt.

Aufbau	Schicht			Material	Dicke	anatomische Richtung
	[DS: Deckschicht] [MS: Mittelschicht]				[in mm]	
	DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz			17	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz			2 x 17	zufällig
	DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz			17	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II			23	zufällig
	MS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II			23	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II			23	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III			23	zufällig
	MS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III			23	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III			23	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II			17	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz			2 x 17	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II			17	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III			17	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz			2 x 17	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III			17	zufällig

Die Verklebung der Lamellen zu Rohlingen erfolgte mit Purbond HB 110 der Firma Purbond. Purbond HB 110 ist ein faserverstärkter 1K-PUR Klebstoff. Der Klebstoff wurde mit einer Dosierung von 200 g/m² einseitig auf die Lamellen aufgetragen. Anschliessend verpresste man den Rohling mit Schraubzwingen während 3h (Abbildung 23). Nach dem Pressen lagerten die Rohlinge für mindestens 7 Tagen zur Aushärtung im Normalklima [20/65].

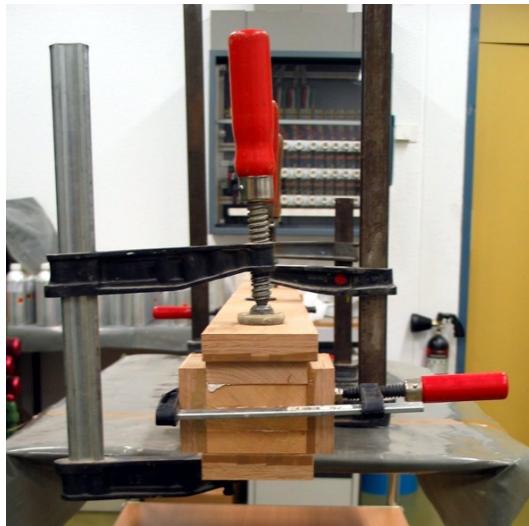


Abbildung 23: Verklebung der Rohlinge zur Herstellung der Fenster

Nach der Aushärtung fertigte die Fensterfabrik Albisrieden AG aus den Rohlingen Fensterflügel mit den Aussenabmessungen 535/485mm. Pro Profilaufbau wurden zwei Flügel hergestellt. Die Fensterflügel Fensterflügel wurden mit der Fensterfabrik der Fensterfabrik Albisrieden AG üblichen Herstellungstechnik gefertigt. Die Verklebung der Eckverbindungen wurde mit dem Klebstoff Miracol 8F1 der Firma Geistlich einem wasserfesten PVAc-Klebstoff durchgeführt. Nach der Fertigung der Fensterflügel schnitt man diese in einzelne Fensterecken mit einer Schenkellänge von 230mm auf.

Von jedem Profilaufbau wurde die Hälfte der Fensterecken in der Fensterfabrik Albisrieden oberflächenversiegelt. Mittels Tauchen applizierte man die Grundierung Induline GW-204 der Firma Remmers. Nach einem Zwischenschliff wurde durch Spritzen der Decklack Induline DW-604 der Firma Remmers aufgetragen. Der Decklack beruhte auf einer Wasserbasis und beinhaltet Bindemittel aus speziellen Acrylatpolymeren. Die Pigmentierung bestand aus Titandioxid.

4.5.2 Herstellung der Platten

Aus den angelieferten Parallelbrettern wurden markgetrennte Bretter von 620mm Länge und 105mm Breite zugeschnitten. Anschliessend wurden die Bretter auf eine Dicke von 14mm gehobelt. Danach lagerten die Hälfte der Bretter in einem Klima von [20/35] und die andere Hälfte im Normalklima [20/65]. Nach Erreichen der Massenkonstanz wurden die Bretter an der Hobelmaschine gefügt. Anschliessend verklebte man sie mit PURBOND HB 110 zu Platten von 620/620mm. Der verwendete Klebstoff war ein faserverstärkter 1-K PUR der Firma Purbond. Dabei ist zu beachten, dass die Bretter die im Klima [20/35] lagerten, eine Vorbehandlung der Schmalflächen mit 50g/m² Leitungswasser erhielten (siehe auch Kap.: 4.4.2). Nach einer Aushärtungspause von 7 Tagen wurden die Platten zu einer Enddicke von 10mm ausgehobelt. Somit erhielt man die Einzelschichten der Dreischichtplatten. Direkt nach dem Aushobeln der Platten wurden die Einzelschichten in der Laborpresse Zschokke (siehe Kap.: 4.2.2) verklebt. Dabei wurden fünf unterschiedliche Plattenaufbauten hergestellt, die in der Tabelle 14 aufgelistet sind. Pro Klima wurde je eine Dreischichtplatte gefertigt. Es wurde auf parallelen Faserverlauf zwischen oberer und unterer Deckschicht geachtet und dass der Faserverlauf der Mittelschicht senkrecht dazu stand. Die Verklebung selber erfolgte mit Purbond HB 110. Die Einzelschichten, die im Klima [20/35] eingelagert waren, erhielten eine Vorbehandlung mit 50g/m² Leitungswasser. Der Klebstoff wurde mit einer Dosierung von 200 g/m² einseitig aufgetragen. Anschliessend verpresste man die Dreischichtplatten mit einem Pressdruck von 0.8 N/mm² über einen Zeitraum von 3h. Nach dem Pressen wurden die Platten für mindestens 7 Tagen in ihr jeweiliges Klima zur Aushärtung eingelagert.

Tabelle 14: Schichtaufbau der hergestellten Dreischichtplatten. Die Einzelschichten der Platte wurden mit Purbond HB 110 der Firma Purbond, ein faserverstärkter 1-K PUR Klebstoff (Einkomponenten Polyurethan Klebstoff), verklebt.

Aufbau	Schicht		Material	Dicke	anatomische Richtung
	[DS: Deckschicht]	[MS: Mittelschicht]		[in mm]	
	DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz		10	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz		10	zufällig
	DS	thermisch unbehandeltes Buchenholz		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II		10	zufällig
	MS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III		10	zufällig
	MS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II		10	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe II		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III		10	zufällig
	MS	thermisch unbehandeltes Buchenholz		10	zufällig
	DS	thermisch behandeltes Buchenholz Stufe III		10	zufällig

Nach Erreichen der Endfestigkeit des Klebstoffes schnitt man aus jeder Platte, die im Klima [20/65] eingelagert war, zwei Prüfkörper mit einer Seitenlänge von 300/300mm für den Plattenverzug. Aus den Platten, die im Klima [20/35] eingelagert waren, wurden von jedem Plattenaufbau zwei Prüfkörper von 250/250mm für die freie Quellung und ein Prüfkörper von 200/200mm für die behinderte Quellung zugeschnitten.

4.6 Hauptversuche

4.6.1 Bestimmung des Verhaltens von Fensterprofilen bei natürlicher und künstlicher Bewitterung

Die Bestimmung des Verhaltens von Fensterprofilen bei natürlicher und künstlicher Bewitterung soll die Alterung der Profile simulieren. Dabei beeinflussen Bestrahlung, Temperatur und Feuchtigkeit den Alterungsprozess. In dieser Versuchsreihe sollen unterschiedliche Aufbauten von Fensterprofilen aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes (Behandlungsstufen II und III) auf ihre Alterungsbeständigkeit geprüft werden.

Für die Bewitterung wurden nach Kapitel 4.5.1 versiegelte und unversiegelte Fensterecken mit einer Schenkelänge von 230mm hergestellt. Die unterschiedlichen Aufbauten der Fensterprofile sind in der Tabelle 13 Seite 39 aufgeführt. Pro Profilaufbau wurde je eine versiegelte und eine unversiegelte Fensterecke geprüft. Dazu wurden eine natürliche und eine künstliche Bewitterung durchgeführt.

4.6.1.1 Natürliche Bewitterung

Die Freibewitterung wurde auf einem Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes an der ETH Zürich durchgeführt. Der Bewitterungsstand (Abbildung 24) bestand aus Metallrohren, die zu einem Gestell zusammengeschraubt waren. Dieses Gestell bildete eine ca. 45° geneigte Fläche, die mit einem Metallgitter überzogen war. An diesem Gitter wurden die Fensterecken mittels zweier Hackenschrauben befestigt worden. Die Fläche des Gitters betrug 2/1m. Der Versuch lief über einen Zeitraum von 53 Tage (21.11.06 bis 12.2.07).



Abbildung 24: Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes der ETH Zürich.

4.6.1.2 Künstliche Bewitterung

Die künstliche Bewitterung versucht die natürliche Bewitterung nachzustellen. Dabei gilt, dass ein Monat künstliche Bewitterung drei Monate natürliche Bewitterung simulieren kann. Eine allgemein gültige Korrelation zwischen künstlicher Bewitterung und natürlicher Bewitterung kann aber nicht erwartet werden. Da eine grosse Anzahl von Einflussfaktoren bei einer natürlichen Bewitterung vorhanden sind, die in einer künstlichen Bewitterung nicht nachgestellt werden können. Dennoch ist es sinnvoll eine künstliche Bewitterung durchzuführen. Im Gegensatz zur natürlichen Bewitterung können die Prüfresultate auf definierte Parameter zurückgeführt werden und sind so besser reproduzierbar. [14]

Die künstliche Bewitterung wurde an der AHB in Biel im Bewitterungsschrank Q-SUN 3100 Xenon Tast Chamber der Firma Q-Panel LAB Products durchgeführt. Die Bewitterungsdauer und der Bewitterungszyklus (Tabelle 15) wurden an die Norm DIN EN 927-7 [14] angelehnt. Die Gesamtdauer der künstlichen Bewitterung soll nach Norm 2016 Stunden (=12 Wochen) betragen. Das bedeutet, dass insgesamt 12 Bewitterungszyklen gefahren werden müssen, da ein Zyklus 168 Stunden (=1 Woche) dauert.

Tabelle 15: Bewitterungszyklus für die künstliche Bewitterung von versiegelten und unversiegelten Fensterecken. Die Fensterprofile besaßen unterschiedlichen Aufbau aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mit den Behandlungsstufen II und III.

Stufe	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingungen
1	Kondensation	(45±3) °C	24h	
2	Unterzyklus A und B		144h bestehend aus 48 Zyklen von je 3h der Stufen A und B	
A	UV-Bestrahlung	(60±3) °C	2.5h	Bestrahlungsstärke: 0.89 W/(m ² nm) bei 340 nm
B	Besprühung		0.5h	6-7 l/min keine UV-Strahlung

4.6.2 Plattenverzug

Der Plattenverzug ist die Eigenschaft einer Platte, bei gleichzeitiger Einwirkung von zwei unterschiedlichen Klimaten auf den beiden Plattenseiten ihre ursprüngliche Form beizubehalten [32]. In dieser Versuchsreihe soll der Plattenverzug von unterschiedlichen Plattenaufbauten mit unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) des mittleren Stammabschnittes der ermittelt werden.

Die Messung des Plattenverzuges fand im Differenzklima statt. Dabei herrschte auf der Aussenseite der Platte ein Klima von [20/65] und auf der Innenseite ein Klima von [20/100]. Die Prüfung wurde in Anlehnung an die ehemalige Norm TGL 4413 [32] durchgeführt. Die Prüfeinrichtung (Abbildung 25) wurde im Normalklima [20/65] aufgebaut.

Vor dem Versuchsbeginn wurde vollständig entsalztes Wasser in den Versuchsbehälter gefüllt, bis sich der Wasserspiegel 50mm unter der Prüfkörperunterseite befand. Damit kein Wasser während des durch die an den Schmalflächen der Prüfkörper diffundieren konnte, wurden diese dreimal mit Kunstharz-Lack moosgrün Hochglanz, im Abstand von 24 Stunden bestrichen (Abbildung 26). Der Prüfkörper wurde erst auf die Dreipunktauflage gelegt und der Deckel geschlossen als das Wasser eine Temperatur von 20°C erreicht hatte. Der Raum zwischen Prüfkörperrand und Behälterdeckel schloss luftdicht mit einer Gummidichtung ab. Um einen optimalen Anpressdruck der Gummidichtung an den Prüfkörper zu erreichen, wurden beidseitig des Deckelausschnittes Metallgewichte von ca. 2.8kg Gewicht aufgelegt.

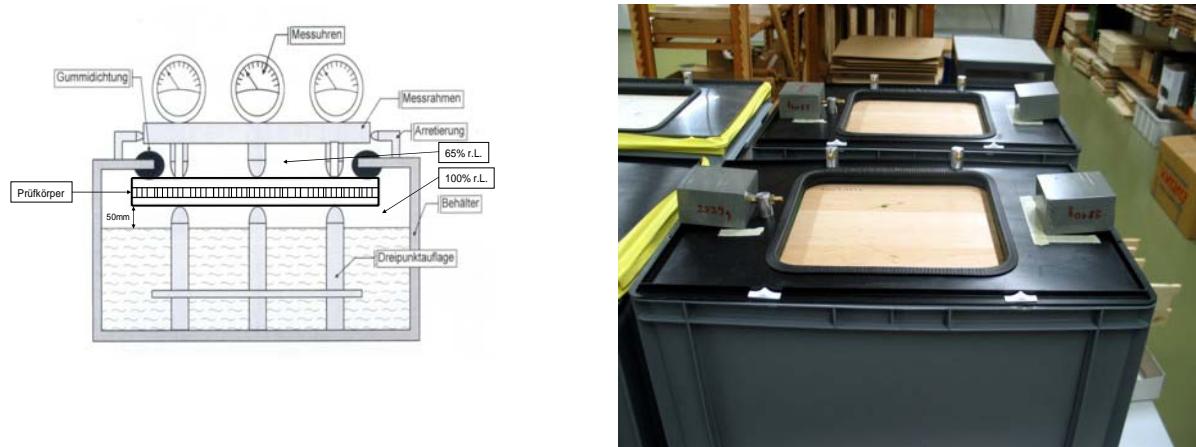


Abbildung 25: Prüfeinrichtung zur Bestimmung des Plattenverzuges nach der Norm TGL 4413 [32].



Abbildung 26: Diffusionsverhinderung über die Schmalfläche der Prüfkörper mittels Kunstharzlack.



Abbildung 27: Dreibeingestell im Versuchsbehälter, der mit vollständig entsalztem Wasser gefüllt ist.

Das Dreipunktgestell (Abbildung 27) wurde so im Versuchbehälter positioniert, dass die drei Auflagepunkte A, C und H des Messrahmens mit den Messuhren (Abbildung 28) nach dem Ausrichten an den drei Anschlagsmarkierungen direkt übereinander zu liegen kamen. Die Anschlagsmarkierungen sorgten dafür, dass der Messrahmen bei jeder Messung immer in die gleiche Position gebracht werden konnte. Somit war gewährleistet, dass jede Messuhr immer wieder auf den gleichen Messpunkt (B, D, E, F, G, K) zu liegen kam, bei denen eine unbehinderte Verformung ein unbehinderter Verzug möglich war. Die Punktachse A-B-C wurde parallel zur Faser der Deckschicht gewählt. Die Ablesegenauigkeit der Messuhren beträgt 0.01mm.

Pro Plattenaufbau prüfte man je zwei Prüfkörper. Die Messung der Verformung erfolgte unmittelbar nach dem Einlegen der Prüfkörper und in den Zeitabständen von 24 Stunden, 48 Stunden, 4, 7, 10, 14 und 21 Tagen. Die Messuhren wurden vor jeder Messung auf ihre Nullposition geeicht.

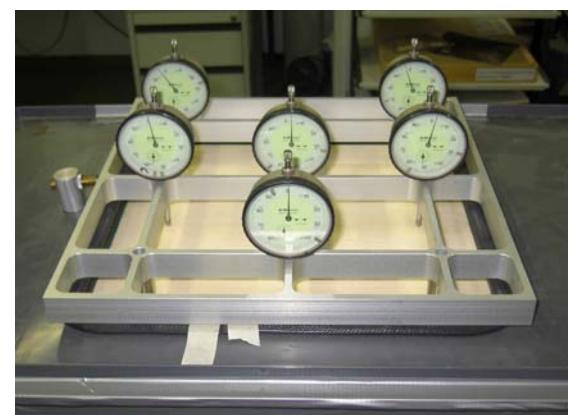
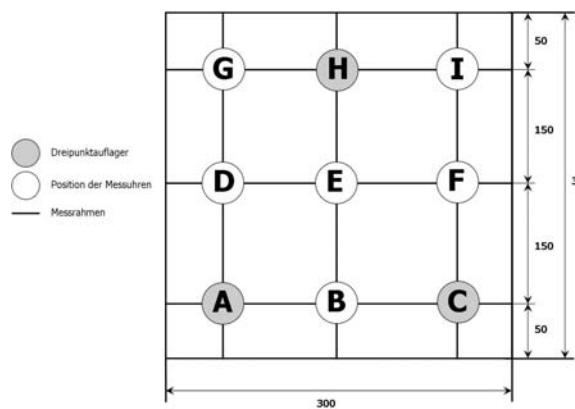


Abbildung 28: Links: Anordnung der Messpunkte (B, D, E, F, G, I) und der Dreipunktauflagen (A, C, H). Rechts: Messrahmen mit den Messuhren und den drei Auflagepunkten (vorne links A; vorne rechts B; hinten mitten H). Links in der Abbildung ist eine Anschlagsmarkierung zu sehen.

4.6.3 Freie Quellung bei Dreischichtplatten

Wird Holz einer erhöhten relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, beginnt es zu quellen. Dies heisst, es beginnt sich auszudehnen. Diese Versuchsreihe sollte aufzeigen, ob ein unterschiedlicher Aufbau von massiven Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz aus dem mittleren Stammabschnitt mit der Behandlungsstufen II und III einen Einfluss auf die freie Quellung der Platte hat.

Die fünf geprüften Plattenaufbauten sind in der Tabelle 14 aufgelistet und ihre Herstellung im Kapitel 4.5.2 beschrieben. Die Platten hatten die Abmessung 250/250/30mm (Länge/Breite/Dicke). Dabei betrug die Einzelschichtdicke 10mm. Die Platten wurden im Klima [20/35] bis zur Massenkonstanz klimatisiert.

Anschliessend erhielten sie parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht im Abstand von 200mm M6 Schrauben mit einem aussensechskant Schraubenkopf, die als Anschlüsse für die induktiven Wegaufnehmer dienen (Abbildung 29). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Strecken zwischen den Schrauben senkrecht zueinander lagen. Der Abstand der Schrauben zum Plattenrand betrug 25mm. Dieser Abstand wählte man, um den Randeinfluss (Abbildung 30) der Platte zu eliminieren. So konnte eine freie Quellung wie bei einer unendlich grossen Dreischichtplatte simuliert werden.

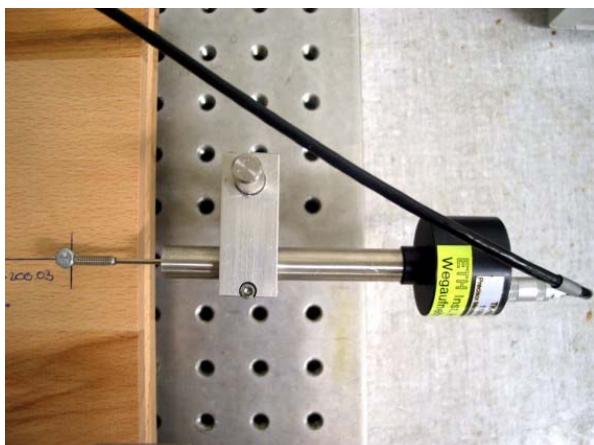


Abbildung 29: Induktiver Wegaufnehmer mit Befestigung und der M6 Schraube, die als Messanschlag dient.

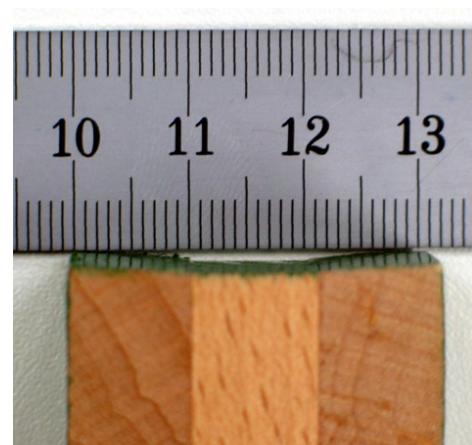


Abbildung 30: Randeinfluss einer Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz.

Für die fortlaufende Messung der Quellung der Platten wurde eine Versuchseinrichtung auf einer Trägerplatte (700/500mm) aufgebaut. Der Versuch wurde im Klima [20/85] durchgeführt. Die Trägerplatte besass Gewindebohrungen mit einer Rasterung von 25/25mm. In diese Gewindebohrungen konnten Stativstäbe eingeschraubt werden, an denen die induktiven Wegaufnehmer der Firma Precisor Messtechnik oder andere Anschlüsse befestigt werden konnten. Es wurden zwei Platten parallel nebeneinander gemessen. Dabei lagerten die Platten auf drei Punkten in einem Abstand von 20mm von der Trägerplatte. Pro Platte wurden drei Wegaufnehmer positioniert, einer zur Messung der Quellung parallel zur Faser der Deckschicht, einer zur Messung der Quellung senkrecht zur Faser der Deckschicht und einer zur Messung der Dickenquellung (Abbildung 31).

Die induktiven Wegaufnehmer geben ein analoges Signal ab. Diese analogen Signale wurden an eine Verteilerbox weitergeleitet und dort mit einem Multiplexer abgetastet. Anschliessend digitalisiert ein A/D-Wandler die Signale und übertrug es an den Computer. Die Messdaten der Wegaufnehmer wurden in einem Intervall von 5 Minuten zum Computer gesendet und dort über die Software BenchLink Data Logger abgespeichert. Zusätzlich zeichnete der Computer die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur auf. Der Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von 14 Tagen. Nach dem Beenden der Messung wurden die Messwerte von der Software BenchLink Data Logger in eine Excel-Tabelle überspielt und mit Hilfe der Formel 9 die relative freie Quellung der Platte in den entsprechenden Quellrichtungen berechnet.

$$Q = \frac{x_0 - x_t}{l_0} \bullet 100\%$$

Formel 9: relative freie Quellung

Q : relative freie Quellung [%]

l_0 : Anfangslänge oder -dicke (Strecke zwischen den Schraube oder Plattendicke vor Beginn der Quellung) [mm]

x_0 : Anfangsposition des Wegaufnehmers [mm]

x_t : Position des Wegaufnehmers im Zeitpunkt t [mm]

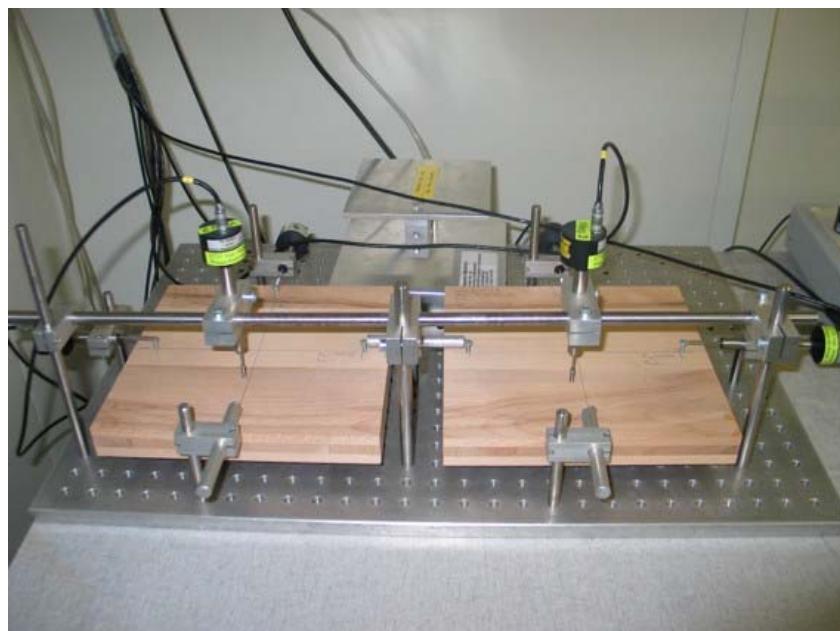


Abbildung 31: Messapparatur für die Messung der freien Quellung.

4.6.4 Behinderte Quellung bei Dreischichtplatten (Quelldruck)

Wird Holz durch äussere Kräfte an seiner freien Quellung gehindert, entsteht ein Quelldruck. Übersteigt der Quelldruck die Elastizitätsgrenze des Holzes, entsteht eine bleibende, plastische Verformung des Zellgefüges. In dieser Versuchsreihe wurde evaluiert, ob ein unterschiedlicher Aufbau von dreischichtigen Massivholzplatten aus thermisch behandeltem und unbehandeltem Buchenholz aus dem mittlern Stammabschnitt mit der Behandlungsstufen II und III einen Einfluss auf den Quelldruck hat.

Die fünf geprüften Plattenaufbauten sind in der Tabelle 14 und ihre Herstellung im Kapitel 4.5.2 ersichtlich. Die Platten hatten eine Abmessung von 200/200/30mm (Länge/Breite/Dicke). Dabei betrug die Einzelschichtdicke 10mm. Die Platten wurden vor Beginn des Versuches im Klima [20/35] bis zur Massenkonstanz klimatisiert.

4.6.4.1 Bestimmung der Quellkraft

Die Ermittlung des Quelldruckes erfolgte über eine Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Quellkraft. Die Quellkraft wurde im Klima [20/85] gemessen. Die Prüfvorrichtung ermöglicht es, die Quellkraft in allen drei Plattenebenen zu bestimmen. Gemessen wurden jedoch nur die Quellkräfte parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht. Die Platten umschlossen massive Metallanschläge, die eine freie Quellung der Platte verhinderten. Dabei waren die Anschlüsse auf einer Seite fest montiert und auf der anderen Seite verschiebbar gelagert. Die Übertragung der Kraft von den zwei verschiebbaren Anschlägen auf die Zug/Druckkraft-Sensoren mit einer maximalen Kraftaufnahme von 5kN erfolgte über eine Gewindestange. Um ein auftretendes Spiel zwischen Platte und Anschlag zu vermeiden, wurde anfangs der Messung eine leichte Vorkraft von 0.2-0.3 kN aufgebracht. Eine genauere Justierung der Vorkraft war wegen der groben Gewinde der Gewindestange nicht möglich. Durch Bohrungen in der Prüfvorrichtung konnte gewährleistet werden, dass die feuchte Luft auch die untere Plattenfläche erreichen konnte.

Die in einem Intervall von 5 Minuten abgelesenen Messwerte wurden anschliessend automatisch in eine Access-Datenbank abgespeichert. Zusätzlich wurde die Änderung der Holzfeuchte mittels einer Widerstandsholzmessung aufgezeichnet. Der Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von 14 Tagen.

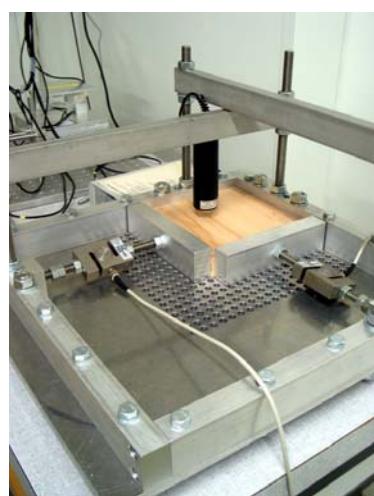


Abbildung 32: Quellkraftprüfvorrichtung

4.6.4.2 Bestimmung der Gleitreibungskoeffizienten

Bewegen sich zwei Körper relativ zueinander, wird ein Teil der Bewegungskraft für das Überwinden der Reibung eingesetzt. Um den Anteil der Reibung zu ermitteln, wurden pro Plattenaufbau die zwei wirkenden Gleitreibungskräfte (F_R) parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht gemessen. Zur Ermittlung der Gleitreibungskräfte legte man die Platten in die Quellkraftprüfvorrichtung ein und spannte die Platten einseitig mit einer definierten Normalkraft (F_N) vor. Senkrecht dazu setzte man eine kontinuierlich steigende Kraft an, bis ein Maximum erreicht wurde. Nach Erreichen des Maximums konnte am Datenlogger Aimemo 2890-9 der Firma Ahlborn die Gleitreibkraft und die Normalkraft abgelesen werden. Für die Berechnung des Quelldruckes wurde der Gleitreibungskoeffizient nach der Formel 10 parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bestimmt.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

Formel 10: Gleitreibungskoeffizient

- μ : Gleitreibungskoeffizient [-]
- F_R : Gleitreibungskraft [N]
- F_N : Normalkraft [N]



Abbildung 33: Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Gleitreibungskoeffizienten von Dreischichtplatten aus unbehandelten und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mit den thermischen Behandlungsstufen II und III.

4.6.4.3 Berechnung des Quelldruckes

Die Quellkräfte (F_Q), die sich bei der behinderten Quellung ergaben, liessen sich mit der Formel 11 in den zwei Quellrichtungen parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht berechnen. Der daraus resultierende Quelldruck (p_Q) berechnet sich nach der Formel 12.

$$F_{Q \text{ par.}} = F_{M \text{ par.}} + \mu_{\text{par.}} \bullet F_{M \text{ senk.}}$$

$$F_{Q \text{ senk.}} = F_{M \text{ senk.}} + \mu_{\text{senk.}} \bullet F_{M \text{ par.}}$$

Formel 11: Quellkraft

F_Q : Quellkraft [N]

F_M : gemessene Quellkraft [N]

μ : Gleitreibungskoeffizient

Indizes:

par. : parallel zur Faser der Deckschicht

senk. : senkrecht zur Faser der Deckschicht

$$p_Q = \frac{F_Q}{A}$$

Formel 12: Quelldruck

p_Q : Quelldruck [N/mm²]

F_Q : Quellkraft [N]

A : Fläche auf die eine Quellkraft wirkt [mm²]

4.6.5 Eigenspannungen in Dreischichtplatten

Eigenspannungen in Dreischichtplatten entstehen zum Teil bei einer Quellung durch die gegenseitige Behinderung der kreuzweise verklebten Einzelschichten. Diese Behinderung entsteht durch das unterschiedliche Quellmass der drei anatomischen Richtungen des Holzes. Sie entstehen aber auch bei parallel verklebten Lagen durch Feuchte oder Quellungsdifferenzen zwischen den Lamellen.

Bei Verklebungen aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz ist dieser Effekt noch stärker. Da durch die thermische Holzmodifikation der Unterschied zwischen den Quellmassen von unbehandeltem und behandeltem Holz noch ausgeprägter ist (siehe Kap. 2.4.1.3). Zusätzlich kommen die wachstumsbedingten Eigenspannungen des Buchenholzes des mittleren Stammabschnittes dazu (siehe Kap. 2.3).

Das Ziel dieser Versuchsreihe bestand darin, auftretende Eigenspannungen zwischen den Plattschichten zu untersuchen. Dazu mussten die Dehnung (ε) und der Elastizitätsmodul (E) ermittelt werden. Die Bestimmung der Dehnung erfolgte durch die Freischnitt-Methode und der Elastizitätsmodul wurde mittels Ultraschall ermittelt. Mit Hilfe dieser zwei Werte und dem Hookschen Gesetz ($\sigma = \varepsilon * E$) konnten die Spannungen berechnet werden.

Die Eigenspannungen wurden an Dreischichtplatten der Versuchsreihen Plattenverzug, behinderter und freier Quellung untersucht. Die beeinflussenden Parameter waren dabei der Plattenaufbau, das Klima bzw. die Klimaänderung dem die Prüfkörper ausgesetzt waren und die Anordnung der einzelnen Versuchsreihen. Die Platten des Plattenverzugs waren einem Differenzklima ausgesetzt. Dabei herrschte auf der einen Seite der Platten ein Klima von [20/65] und auf der anderen Seite ein Klima von [20/100]. Bei den Versuchsreihen der behinderten und freien Quellung wechselten die Platten vom Ausgangsklima [20/35] zum Prüfklima [20/85]. Detaillierter Angaben zur Herstellung, zum Plattenaufbau und den -abmessungen sowie die Anordnung der Versuchsreihen sind in den jeweiligen Kapiteln näher erläutert.

Die Platten wurden nach dem Schema der Abbildung 34 zu Streifen von 19mm Breite geschnitten. Dabei verlief die Längskante der Streifen immer parallel zur Faser der Deckschicht. So ergaben sich bei den Platten des Plattenverzugs mit einer Abmessung von 270/270mm zwölf Streifen und bei den Platten der Versuchsreihen der behinderten und freien Quellung mit einer Abmessung von 200/200mm neun Streifen.

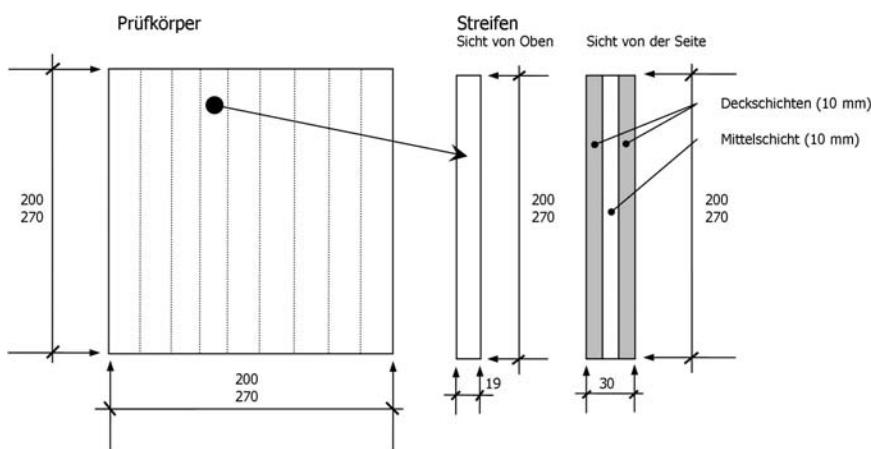


Abbildung 34: Schematische Darstellung zum Aufschneiden der Prüfkörperplatten zu Streifen



Abbildung 35: Linearmessgerät der Firma Mitutoyo zur Bestimmung der Längenänderung der aufgetrennten Plattschichten.

Anschiessend wurden die einzelnen Anfangslängen (l_0) der Mittel- und Deckschichten der Streifen mit einem Linearmesser der Firma Mitutoyo (Abbildung 35) bestimmt. Danach wurden die Plattschichten nach dem Schema der Abbildung 36 voneinander getrennt. Dabei entspannten sich die einzelnen Schichten und man konnte die Endlängen (l) bestimmen. Mit der Formel 13 und durch die ermittelten Anfangs- und Endlängen konnte die Dehnung der aufgetrennten Schichten berechnet werden. Bei unter Zug gestandenen Plattschichten zogen sich diese nach dem Auftrennen zusammen. Bei unter Druck gestandenen Schichten dehnte sie sich aus. Zugspannungen wurden entsprechend der allgemein üblichen Terminologie als positiv, Druckspannungen als negativ definiert.

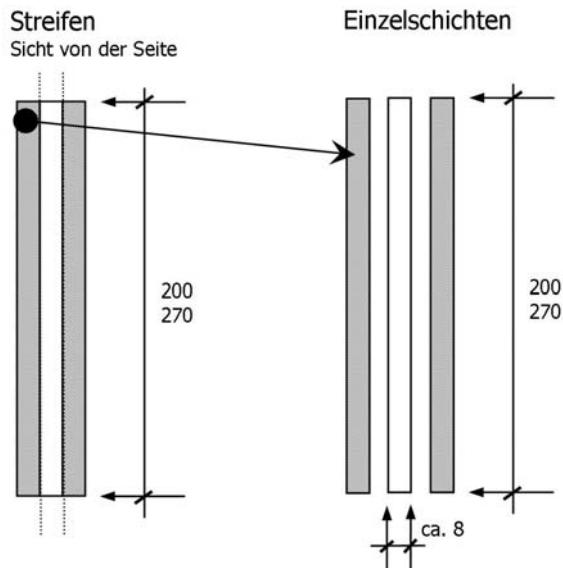


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Auftrennens der einzelnen Schichten einer Dreischichtplatte

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \cdot 100\%$$

Formel 13: Dehnung

ε : Dehnung [%]

Δl : Längenänderung [mm]

l : Endlänge (Länge nach dem Auftrennen) [mm]

l_0 : Anfangslänge (Länge vor dem Auftrennen) [mm]

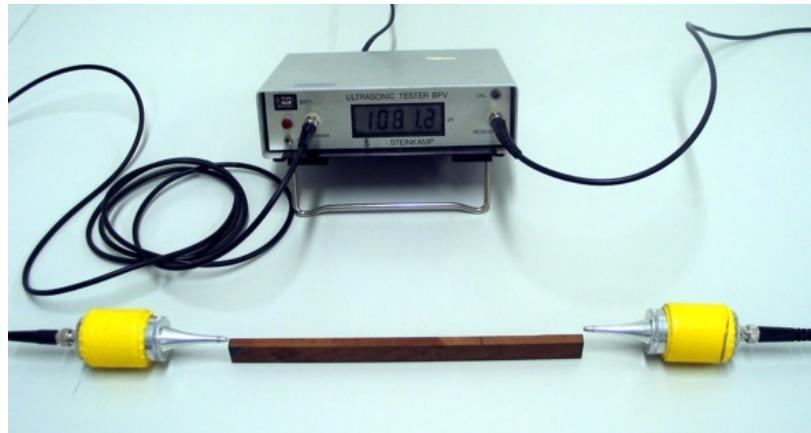


Abbildung 37: Ultraschallgerät Ultrasonic Tester BPV der Firma Steinkamp zur Ermittlung des E-Moduls.

Der Elastizitätsmodul wird durch die Formel 14 berechnet. Dabei wurde die benötigte Schallgeschwindigkeit (c) mit dem Ultraschallprüfgeräts Ultrasonic Tester BPV (Frequenz 50kHz) der Firma Steinkamp ermittelt (Abbildung 37). Zuletzt konnten mit der Formel 15 die entstehenden Eigenspannungen (σ) zwischen den Schichten der Platte berechnet werden.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ also } E = \rho \bullet c^2$$

Formel 14: Elastizitätsmodul

- c : Schallgeschwindigkeit [m/s]
- E : Elastizitätsmodul [N/mm²]
- ρ : Dichte [kg/m³]

$$\sigma = \varepsilon \bullet E$$

Formel 15: Spannung

- σ : Spannung [N/mm²]
- ε : Dehnung [%]
- E : Elastizitätsmodul [N/mm²]

Delaminierungseffekt bei Wechselklimalagerung

In dieser Versuchsreihe untersuchte man den Einfluss einer Delaminierung auf die Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeit von Klebstoff nach dem Einwirken von Wechselklima. Delaminierungen können bei langzeitigem Klimawechsel insbesondere im Bereich niedriger Luftfeuchten entstehen. Dabei wird die Scherspannung in der Klebfuge überschritten. Dazu wurden Zugscherproben mit unterschiedlichen Aufbauten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz aus dem mittleren Stammabschnitt mit den Behandlungsstufen II und III einem Wechselklima unterzogen. Die Festigkeit des Klebstoffes wurde mit der Zugscherprüfung nach DIN EN-205 [13] ermittelt. Diese Versuchsreihe sollte die Auswirkungen der unterschiedlichen Quell- und Schwindmasse der verwendeten Behandlungsstufen auf die Klebstofffuge zeigen.

Aus dem thermisch behandelten und unbehandelten Buchenholz der Behandlungsstufe II und III wurden Bretter von 550mm Länge, 100-150mm Breite und 7mm Dicke zugeschnitten. Die zugeschnittenen Bretter lagerten bei einem Klima von [20/65]. Nach Erreichen der Massenkonstanz hobelte man die Bretter auf eine Enddicke von 5mm und verklebte sie anschliessend. Die Verklebung der Bretter erfolgt mit Purbond HB 110 der Firma Purbond einem faserverstärktem 1-K PUR Klebstoff. Der Klebstoff wurde einseitig mit einer Menge von 200 g/m² aufgetragen und anschliessend mit einem Pressdruck von 0.8 N/mm² über eine Zeit von 3h gepresst. Die Verpressung der Bretter geschah in der Laborpresse Zschokke (siehe Kap. 4.2.2). Anschliessend lagerten die Bretter für mindestens 7 Tage im Klima [20/65] zur Aushärtung. Nach dem Erreichen der Endfestigkeit des Klebstoffes wurden die verklebten Bretter anhand der DIN 205 [13] zu Prüfkörpern geschnitten (Abbildung 38).

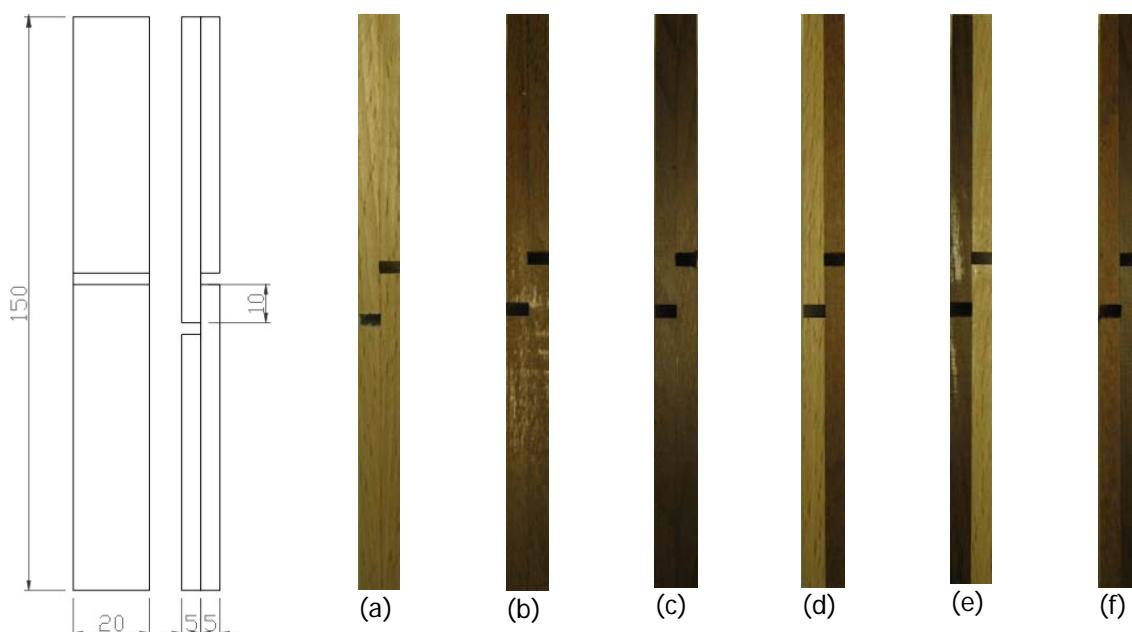


Abbildung 38: Links: Geometrie der Zugscherprobe nach DIN 205 [13]. Rechts: Probeaufbauten; (a) unbefestigtes / unbefestigtes Buchenholz; (b) behandeltes Stufe II Buchenholz / behandeltes Stufe II Buchenholz; (c) behandeltes Stufe III / behandeltes Stufe III Buchenholz; (d) unbefestigtes / behandeltes Stufe II Buchenholz; (e) unbefestigtes / behandeltes Stufe III Buchenholz; (f) behandeltes Stufe II Buchenholz / behandeltes Stufe III Buchenholz;

Insgesamt untersuchte man sechs Prüfkörperaufbauten, die in der Abbildung 38 aufgelistet sind. Aus den sechs Prüfkörperaufbauten erstellte man drei Entnahmeserien (A, B und C) an je 15 Prüfkörpern, die zu unterschiedlichen Zeiten dem Wechselklima entnommen wurden. Das Wechselklima erfolgte nach den Parametern der Tabelle 16. Die Proben der Entnahmeserie A waren keinem Wechselklima ausgesetzt und dienten als Referenzproben. Die Entnahmeserie Entnahmeserie B entnahm man nach 4 feucht-trocken Wechselklimazyklen (32 Tage) und die Entnahmeserie C nach den 8. Wechselklimazyklen (64 Tage). Anschliessend an die Entnahme aus dem Klimaschrank wurden die Prüfkörper bei einem Klima von [20/65] rückklimatisiert. Bei Massenkonstanz bestimmte man die Bruchflächen der Prüfkörper und prüfte sie in der Universalprüfmaschine (siehe Kap. 4.2.3) auf ihre Zugscherfestigkeit.

Tabelle 16: Programm für das Wechselklima der Versuchsreihe Delaminierung.

Behandlung	Parameter	Grösse	Dauer
	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 65%	bis zur Erreichung der Massenkonstanz
4x/8x	1. Klima Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 95%	96h
	2. Klima Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 35%	96 h
	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 65%	bis zur Erreichung der Massenkonstanz

Anzahl der Zyklen¹ 4 bzw. 8

1) Ein Zyklus besteht aus einem vollständigen Durchgang der Klima 1-2

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Spannungen im unbehandelten Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mittels Untersuchung der Verformung

5.1.1 Verformung beim Einschnitt eines Buchenstammes

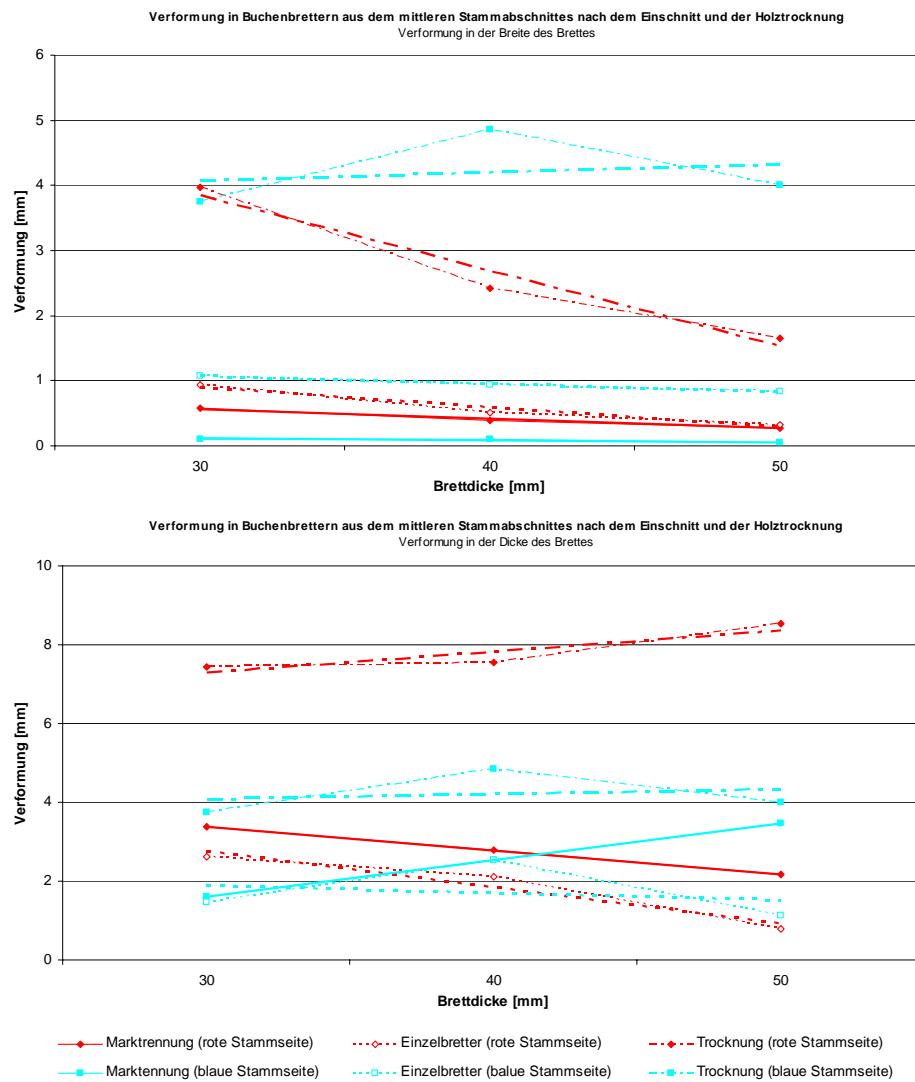


Diagramm 3: Verformungen der Bretter beim Einschnitt von Buchenbrettern aus dem mittleren Stammabschnitt. Der Stamm wurde in zwei Seiten unterteilt, in ein rote und eine blaue. Bei der roten Stammseite war das dünne Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dicke im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünne Brett im Stammzentrum und das dicke an der Peripherie des Stammes. Im linken Diagramm sind die Spannungen in der Breite des Brettes zu sehen und im rechten Diagramm die Spannungen in der Dicke.

Im Diagramm 3 sind die Verformungen von Brettern beim Einschnitt eines Buchenstammes des mittleren Stammabschnittes aufgezeigt. Dabei sind die auftretenden Verformungen ein Indikator für die vorhandenen Spannungen im Buchenstamm. Im oben Diagramm sind die Verformungen in der Breite des Brettes zu sehen und im unten Diagramm die Verformungen in der Dicke.

Bei der Marktrennung sind leichte Verformungen in der Breite der Bretter auf der roten wie auf der blauen Stammseite (siehe Abbildung 19) erkennbar. Die Verformungen in der Dicke nehmen bei einer Marktrennung auf der roten Stammseite ab und auf der blauen Seite zu. Hierbei ist zu beachten, dass die Verformungen in der Dicke und der Breite der Bretter nur eine Tendenz darstellt, da die einzelnen Bretter bei der Marktrennung noch nicht vorlagen.

Beim Einschnitt der Einzelbretter ist in der Breite wie in der Dicke der Bretter eine kleine Abnahme der Verformungen bei einer Abnahme der Brettdicken zu erkennen. Die Verformungen in der Breite des Brettes nehmen dabei von der blauen zur roten Stammseite um 61% zu, verglichen mit der blauen Stammseite. In der Dicke der Bretter nehmen die Verformungen um 7% von der roten zur blauen Seite ab, verglichen mit der roten Seite.

Deutlich zu erkennen ist die starke Verformung der Bretter nach ihrer Trocknung. In der Breite der Bretter auf der roten Stammseite nehmen die Verformungen mit zunehmender Brettdicke ab und auf der bauen Seite leicht zu. Bei den Verformungen in der Dicke des Brettes zeigt sich bei beiden Stammseiten eine leichte Zunahme.

5.1.2 Verformung beim Auftrennen von Buchenbrettern

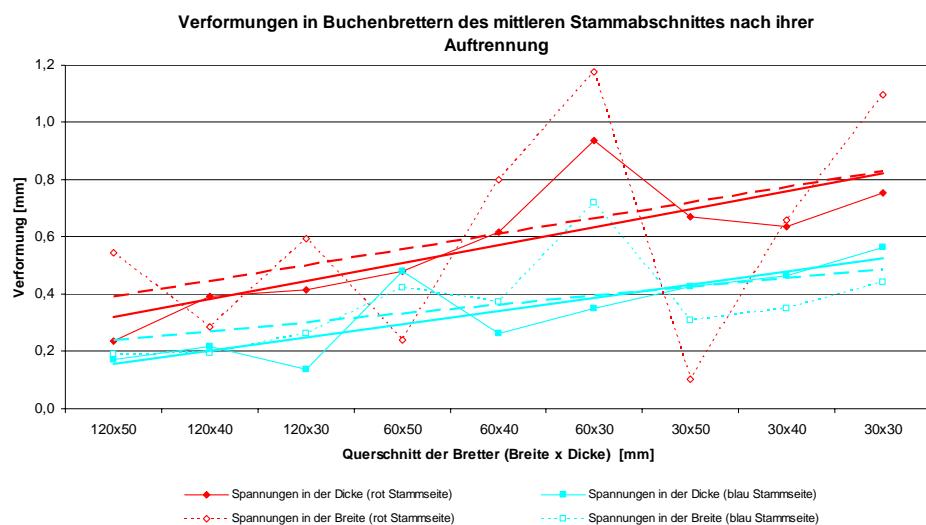


Diagramm 4: Verformungen in Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach ihrer Auftrennung. Der Stamm wurde dabei in zwei Seiten unterteilt, in ein rote und eine blaue. Bei der roten Stammseite war das dünne Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dicke im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünne Brett im Stammzentrum und das dicke an der Peripherie des Stammes.

Im Diagramm 4 sind die Verformungen von Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach ihrer Auftrennung aufgezeigt. Dabei sind die auftretenden Verformungen ein Indikator für die vorhandenen Spannungen im den Buchenbrettern.

Es ist deutlich eine Zunahme der Verformung und somit auch eine Zunahme der Spannungen in den Brettern bei einem abnehmenden Bretterquerschnitt zu erkennen. Die geringste Verformung erreichen die Bretter aus der blauen Stammseite (siehe Abbildung 19). Dabei ist die Verformung in der Breite und in der Dicke der Bretter etwa gleich gross.

Bei den Verformungen in der Breite der Bretter sind die Werte der Standardabweichung bei den Brettern der roten Stammseite etwas grösser, im Gegensatz zu den Brettern der blauen

Stammseite. Im Durchschnitt liegt die Verformung der Bretter der blauen Stammseite bei 40% unter der der roten Seite im Vergleich mit den Brettern der roten Seite.

Bei den Verformungen in der Dicke sind die Standardabweichungen der Bretter der roten und blauen Stammseite etwa gleich. Die Verformung in der Breite beträgt im Durchschnitt gleich viel, wie in der Dicke der Bretter. Auch hier liegen die Werte der Bretter der blauen Stammseite ca. 40% unter der der roten Seite im Vergleich mit den Brettern der roten Seite.

5.1.3 Verformung von Buchenbrettern nach einer Quellung im Feuchtklima

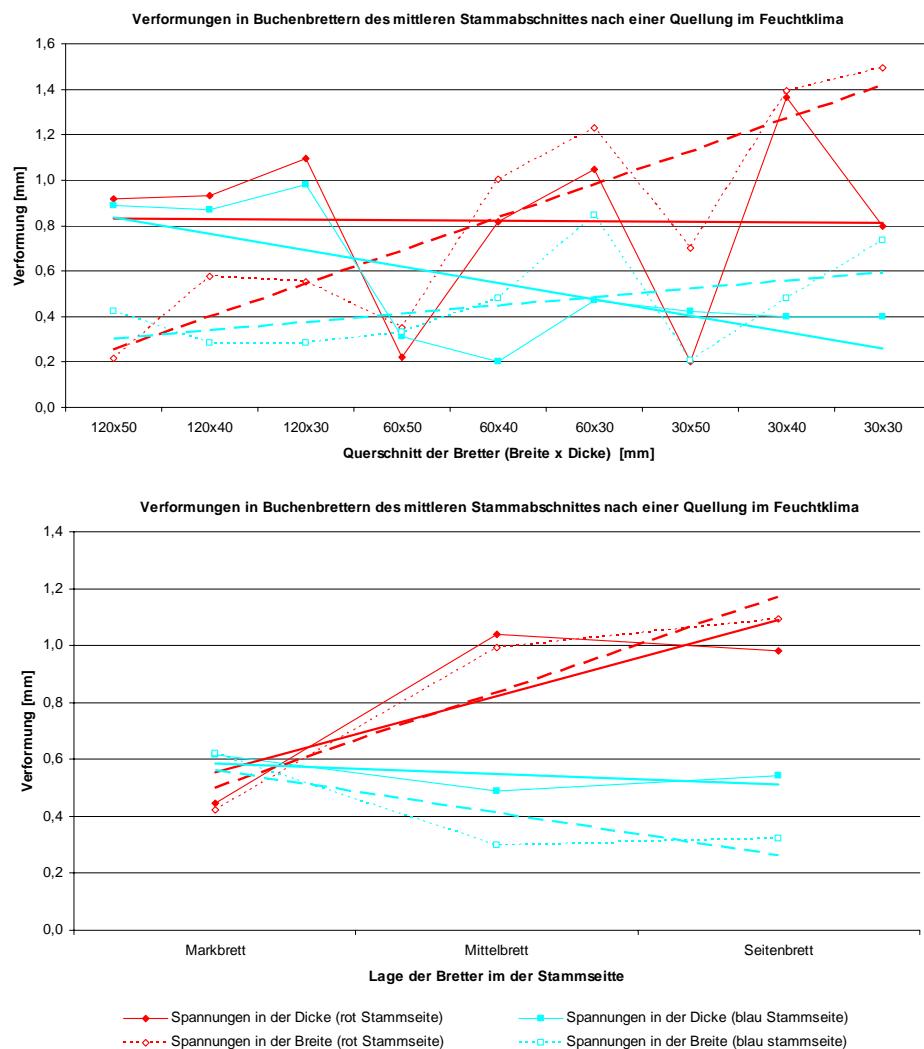


Diagramm 5: Verformungen in Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach einer Quellung im Feuchtklima. Der Stamm wurde in zwei Seiten unterteilt, in ein rot und eine blau. Bei der roten Stammseite war das dünnste Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dickste im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünnste Brett im Stammzentrum und das dickste an der Peripherie des Stammes. Das obere Diagramm stellt die Verformung in Abhängigkeit des abnehmenden Querschnittes der Bretter dar. Das untere Diagramm zeigt die Verformung in Abhängigkeit der Lage des Brettes im Stamm.

Im Diagramm 5 sind die Verformungen von Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach einer Quellung im Feuchtklima aufgezeigt. Das obere Diagramm stellt die Verformung in Abhängigkeit des abnehmenden Bretterquerschnittes dar. Das untere Diagramm zeigt die Verformung in Abhängigkeit der Lage des Brettes im Stamm.

Im oberen Diagramm erkennt man eine leichte Abnahme der Verformungen in der Dicke des Brettes auf der roten Stammseite und eine starke Abnahme auf der blauen Seite (siehe Abbildung 19), verbunden mit einem abnehmenden Bretterquerschnitt. Ein gegenläufiger Trend zeigt sich bei den Verformungen in der Breite des Brettes. Hier nimmt die Verformung bei einer Abnahme des Bretterquerschnittes zu. Bei den Brettern auf der roten Stammseite ist eine starke Zunahme ersichtlich und auf der blauen Seite nur eine geringe.

Da im oberen Diagramm abweichende Resultate entstehen als bei der Auftrennung der Bretter, wurde im unteren Diagramm eine Unterteilung der Bretter in ihren Lagen im Stamm vorgenommen. Deutlich zu sehen ist die Abnahme der Verformungen bei einer Abnahme der Bretterdicke. Hier ist zu beachten, dass auf der roten Stammseite das Markbrett eine Dicke von 50mm hatte und auf der blauen Seite 30mm. Im Fall der Seitenbretter ist es umgekehrt. Dort besitzt das Seitenbrett auf der roten Stammseite eine Dicke von 30mm und das blaue eine von 50mm dick. Vergleicht man nun die gleichen Brettdicken, aber mit einer unterschiedlichen Lage im Stamm, ergibt sich bei den 50mm dicken Brettern eine Abnahme der Verformung von 1% von der roten Stammseite zur blauen Seite hin, verglichen mit den Brettern aus der roten Seite. Bei den 30mm dicken Brettern ist die Verformung mit einer Zunahme von 43% noch markanter.

Weitere Angaben zum Einschnitt und Auf trennen von Buchenholz des mittleren Stammabschnittes befinden sich im Anhang A.

5.1.4 Zusammenfassung

Beim Einschnitt der Bretter aus einem Buchenstamm des mittleren Stammabschnittes zeigt sich ein im Durchschnitt leichter Trend zur Abnahme der Verformung der Brett bei einer Verkleinerung des Bretterdicke. Mit einer Zunahme der Verformung von 74% bei der Trocknung der Einzelbretter verglichen mit dem Werten vor der Trocknung, zeigt sich der grosse Einfluss der Schnittholztrocknung auf die Formstabilität in Buchenholz des mittleren Stammabschnittes.

Beim anschliessenden Auf trennen der Buchenbretter zeigt sich ein gegenläufiger Trend. Die Verformungen nehmen mit einem kleineren Querschnitt der Bretter zu. Die Verformungen nach der Lagerung der Bretter in einem Feuchtklima zeigen, dass bei einer Quellung die Querschnittsänderung eher einen geringen Einfluss auf die Formstabilität hat als die Lage der Bretter im Stamm. Das bedeutet, dass bei einer Quellung der Verlauf der Jahrringe im Brett eine grössere Rolle spielt.

Der Unterschied zwischen den Stammseiten (siehe Abbildung 19) ist stark ausgeprägt. Meist erreichen die Bretter aus der roten Stammseite eine stärkere Verformung als die Bretter aus der blauen Stammseite.

5.1.5 Diskussion

Durch die Verkleinerung des Querschnittes von Buchenbrettern werden die Verformungen im Buchenholz des mittleren Stammabschnittes nicht verringert. Durch die Verkleinerung der Abmessungen verringert sich die Steifigkeit der Bretter. Das bedeutet, je weniger Material sich den wirkenden Spannungen entgegen setzen kann, desto stärker verformt es sich. Dies kann den Grund haben, dass bei Querschnittsfläche von 30/30mm immer noch inhomogene Spannungsfelder vorliegen, die zu einer Verformung führen können. Man

müsste das Buchenholz des mittleren Stammabschnittes noch mehr auftrennen, eventuell bis zur Grösse eines Spanes, um die Spannungsfelder im Holz zu bestimmen.

Durch diese Gegebenheit ist eine thermische Vorbehandlung des Buchenholzes des mittleren Stammabschnittes ein möglicher Ansatz für den Abbau der wuchsbedingten Eigenspannungen im Buchenholz (siehe auch Kap 2.3.3) für die Herstellung von verklebten Produkten.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse von einem einzigen Stamm abgeleitet wurden, der aus einem Wald in Hanglage stammt. Wie gross der Faktor von Reaktionsholz ist, lässt sich auf Grund dieser Untersuchungen nicht mit Sicherheit ableiten. Nach NIEMZ [24] bildet Laubhölzern Zugholz, das sich beim Auftrennen verkürzt und so zu Deformationen führen kann. Somit ist es möglich, dass die rote Seite Zugholz beinhaltete und deshalb zu einer grösseren Verformung neigte.

5.2 Scherfestigkeit der Klebfuge

(Klebstoffauswahl für die weiteren Versuchsreihen)

5.2.1 Scherfestigkeit der Klebfugen nach der Verklebung bei 20°C/35% und Variation des Prüfklimas

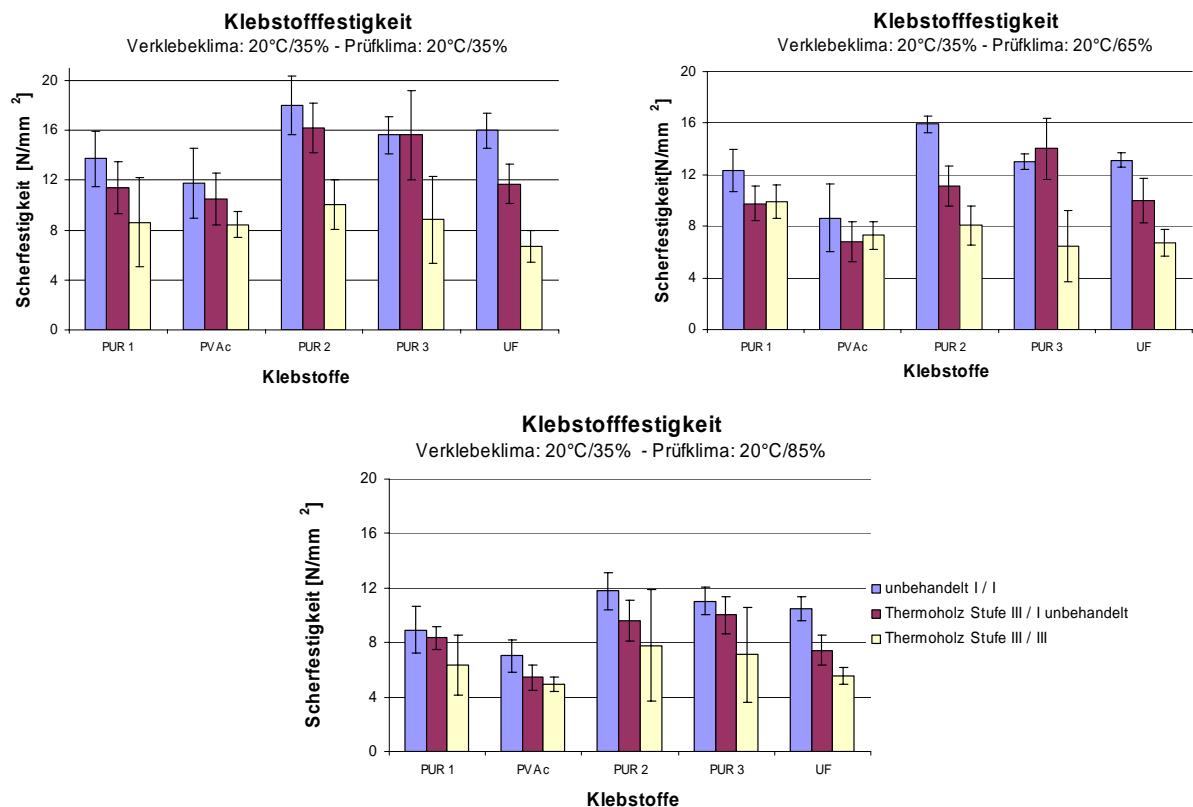


Diagramm 6: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III nach einem Verklebeklima von 20°C/35% und den Prüfklimaten von 20°C/35%, 20°C/65% und 20°C/85%.

Bei den Verklebungen, die im Trockenklima hergestellt wurden, bilden die Prüfkörper im Prüfklima mit einer r.L. (relativen Luftfeuchtigkeit) von 35% die Referenz. Durch die Erhöhung der r.L. bei den Prüfklimaten von 35% auf 65% bzw. 85% wirken Quellkräfte auf die Klebfugen.

Bei den Diagrammen zeigt sich eine generelle Abnahme der Klebstofffestigkeit bei einer Zunahme der r.L. der Luftfeuchte. Die Ausnahmen sind die Festigkeiten beim Prüfkörperaufbau III/III. Dort nehmen die Klebstofffestigkeiten beim PUR 1 und UF bei 65% r.L. leicht zu. Bei 65% r.L. beträgt die durchschnittliche Abnahme der Festigkeit 16% bezogen auf die Referenzproben bzw. bei 85% r.L. 19%. Die grösste Festigkeitsminderung erreicht bei 65% r.L. der PVAc Klebstoff mit 25% und bei 85% r.L. PUR 1 mit 26%. Die geringsten Verluste der Festigkeiten erzielen bei 65% r.L. PUR 1 mit 3% und bei 85% r.L. PUR 2 mit 11%. Bei 85% rel. Luftfeuchte ist allerdings auch ein Festigkeitsverlust des Holzes zu berücksichtigen, da die Scherfestigkeit bei Erhöhung der Holzfeuchte sinkt.

Bei den Referenzproben erreicht PUR 2 bei allen Prüfkörperaufbauten die höchsten Klebstofffestigkeiten. Bei 65% r.L. erlangt PUR 2 beim Prüfkörperaufbau I/I die besten

Festigkeiten, PUR 3 beim Prüfkörperaufbau III/I und PUR 1 beim Prüfkörperaufbau III/III. Im Prüfklima mit 85% r.L. erhält auch PUR 2 bei den Prüfkörperaufbauten I/I und III/III die besten Werte und PUR 3 bei III/I.

Ein Trend, der bei verschiedenem Prüfkörperaufbau festzustellen ist, ist die Abnahme der Klebstofffestigkeit von I/I über den Aufbau III/I hin zu III/III. Abweichungen trifft man beim Prüfklima mit einer r.L. von 65% an. Dort schlägt der Prüfkörperaufbau III/I bei den Klebstoffen PUR 1, PUR 3 und beim PVAc etwas aus der Reihe, im Vergleich mit den anderen Prüfkörperaufbauten desselben Klebstoffes. Bei den übrigen Prüfkörperaufbauten ist die durchschnittliche Festigkeitsreduktion von I/I zu III/I 19% und von I/I zu III/I 38%.

5.2.2 Scherfestigkeit der Klebfugen nach der Verklebung bei 20°C/65% und Variation des Prüfklimas

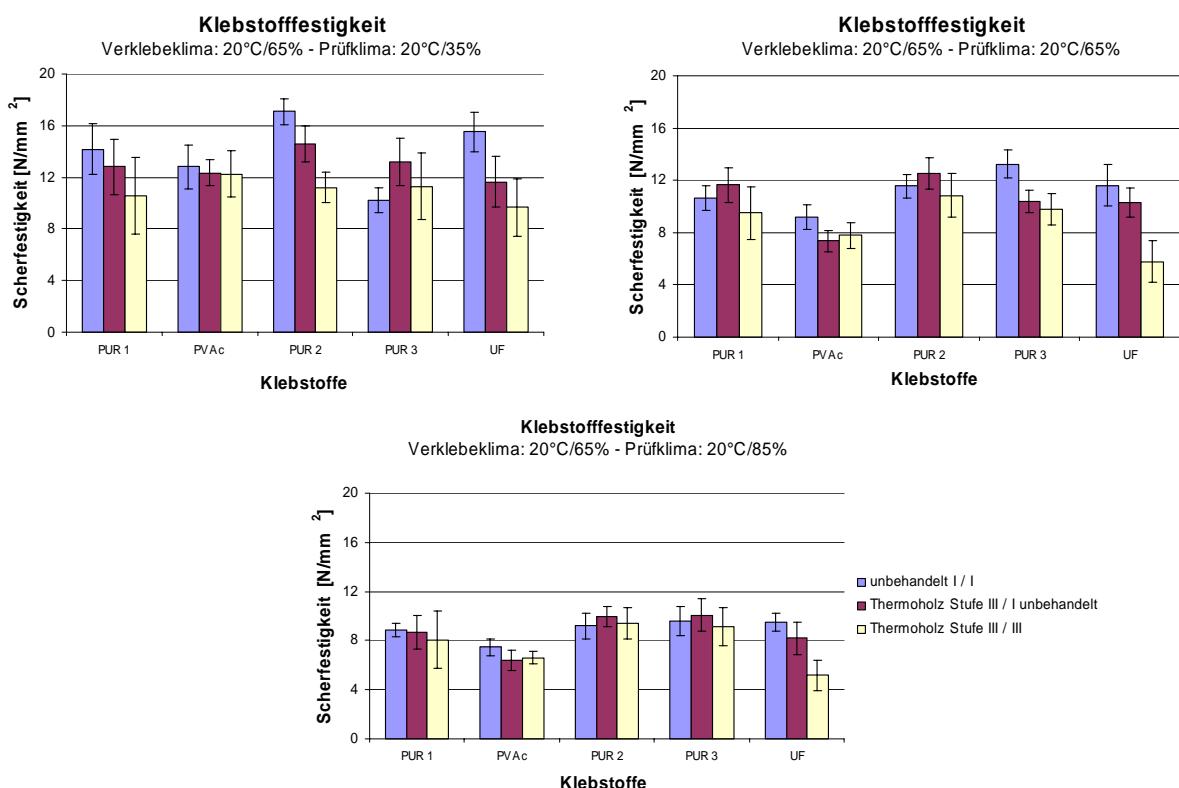


Diagramm 7: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III nach einem Verklebeklima von 20°C/65% und den Prüfklimaten von 20°C/35%, 20°C/65% und 20°C/85%.

Bei der Verklebung im Normalklima bilden die Prüfkörper, die im Prüfklima mit einer r.L. (relative Luftfeuchtigkeit) von 65% geprüft wurden die Referenz. Abweichend zum oberen Versuch wirken hier bei den Proben im Prüfklima mit 35% r.L. Schwindkräfte bzw. bei 85% r.L. Quellkräfte auf die Klebfuge.

Deutlich zu sehen ist die Zunahme der Klebstofffestigkeit der Referenzproben gegenüber den Prüfkörpern bei 35% r.L. um 28% bzw. eine Abnahme der Festigkeit um 16% bei 85% r.L., verglichen mit den Referenzproben. Die grösste Zunahme der Festigkeit erreicht bei 25% r.L. der PVAc Klebstoff mit 55% und die geringste der Klebstoff PUR 3 mit 6%. Die kleinste Abnahme bei 85% r.L. erzielte PUR 3 mit 12% und die geringste PUR 2 mit 18%.

Die höchsten Klebstofffestigkeiten bei den Proben in 35% r.L. erreicht der Klebstoff PUR 2 bei den Prüfkörperaufbauten I/I und III/I und beim Prüfkörperaufbau III/III der PVAc

Klebstoff. Bei den Referenzproben erzielt PUR 2 bei den Prüfkörperaufbauten III/I und III/III die besten Werte und PUR 3 bei I/I. Im Prüfklima mit 85% r.L. erreicht PUR 2 beim Prüfkörperaufbau III/III und PUR 3 bei I/I und III/I die besten Werte.

Ein gleicher Trend wie bei den oberen Ergebnissen ist auch hier bei den Prüfkörperaufbauten festzustellen. Die Abnahme der Klebstofffestigkeit läuft vom Prüfkörperaufbau I/I über III/I hin zu III/III. Die Ausnahmen hier trifft man beim Prüfkörperaufbau III/I. Dieser erreicht ein Festigkeitsmaximum beim Klebstoff PUR 3 bei einer r.L. von 35%, bei den Klebstoffen PUR 1 und 2 bei den Referenzproben und bei PUR 2 und 3 bei 85% r.L. Vergleich mit den anderen Prüfkörperaufbauten desselben Klebstoffes. Im Referenzklima und bei einer r.L. von 85% erreicht der PVAc Klebstoff beim Prüfkörperaufbau III/I sein Festigkeitsminimum im Vergleich mit den anderen Prüfkörperaufbauten desselben Klebstoffes. Bei PUR 3 im Prüfklima 35% und 85% schlagen die Prüfkörperaufbauten ganz aus der Reihe. Bei den übrigen Prüfkörperaufbauten ist die durchschnittliche Festigkeitsreduktion von I/I zu III/I 12% und vom Prüfkörperaufbau I/I zu III/I 22%.

Detaillierte Angaben zu den einzelnen Klebstofffestigkeiten der Proben und zum Holzfaserbelag befinden sich im Anhang B.

5.2.3 Zusammenfassung

Eine klare Tendenz ist bei der Abnahme der Klebfugenfestigkeit bei den verschiedenen Prüfkörperaufbauten ersichtlich. Dabei nimmt die Festigkeit vom Aufbau I/I über III/I zu III/III ab. Ebenso ist eine deutliche Abnahme der Festigkeit der Klebfuge bei einer Quellung der Prüfkörper zu erkennen. Eine Schwindung hingegen erhöht die Festigkeit der Klebfuge. Der Klebstoff PUR 2 zeigt eine hervorragende Klebfugenfestigkeit bei seiner Anwendung an unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes. Mit einer durchschnittlichen Festigkeit von 13.92 N/mm^2 hat PUR 2 den besten Wert, dicht gefolgt von UF mit 12.7 N/mm^2 . Das schlechteste Resultat ergab der PVAc mit 9.48 N/mm^2 .

Mittels dieser Ergebnisse wurde entschieden, dass der Klebstoff PUR 2 für die Verklebungen in den Hauptversuchen verwendet wird. PUR 2 (HB 110) stammt von der Firma Purbond. Es ist ein faserverstärkter Einkomponenten Polyurethan Klebstoff. Es ist ein faserverstärkter Einkomponenten Polyurethan und einer Vorbehandlung der thermisch behandelten Fügeteiloberflächen mit Wasser, kann die um 50% verkleinerte Holzfeuchtigkeit des thermisch behandelten Buchenholzes ausgeglichen werden. 1-K PUR Klebstoff benötigt Feuchtigkeit, um aushärten zu können. Diese Feuchtigkeit nimmt er aus der Luft oder dem Holz. Dabei kann er mit den OH-Gruppen im Holz kovalente Bindungen eingehen, die eine sehr gute Adhäsionsfestigkeit der Fügeteile ergibt.

5.2.4 Diskussion

Bei der Verklebung mit 1-K PUR Klebstoffen und einer Vorbehandlung der thermisch behandelten Fügeteiloberflächen mit Wasser, kann die um 50% verkleinerte Holzfeuchtigkeit des thermisch behandelten Buchenholzes ausgeglichen werden. 1-K PUR Klebstoff benötigt Feuchtigkeit um aushärten zu können. Diese Feuchtigkeit nimmt er aus der Luft oder dem Holz. Dabei kann er mit den OH-Gruppen im Holz kovalente Bindungen eingehen, die eine sehr gute Adhäsionsfestigkeit der Fügeteile ergibt.

5.3 Verhalten von Fensterprofilen bei künstlicher und natürlicher Bewitterung

In den Abbildung 39 bis Abbildung 42 ist die Alterung an Fensterecken durch das Einwirken einer natürlichen Bewitterung aufgezeigt. Dabei besaßen die Fensterecken verschiedene Profilaufbauten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Die Hälfte der Fensterecken besaß eine Versiegelung aus der Grundierung Induline GW-204 und dem Decklack Induline DW-604 der Firma Remmers mit speziellen Acrylatpolymeren mit einer Titandioxid Pigmentierung. Es wurde eine optische Beurteilung der Alterungserscheinungen an den Fensterecken durchgeführt. Die natürliche Bewitterung erstreckte sich über einen Zeitraum von 52 Tagen (21.12.2006 - 12.2.2007).

5.3.1 Natürliche Bewitterung

Für die Darstellung des Alterungsprozesses an den Fensterecken wurden nur die extremen Beispiele in die Ergebnisse integriert. Die in diesem Kapitel fehlenden Fensterecken sind Zwischenstufen der gezeigten Fensterecken und befinden sich im Anhang C.

5.3.1.1 Unversiegelte Fensterecken

Fensterecke aus unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes (I-I-I):



Fensterecke aus thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III aus dem mittleren Stammabschnittes (III-III-III):



Abbildung 39: Die Abbildungen zeigen Fensterecken nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Dabei sind die obere Fensterecken aus unbehandeltem Buchenholz und die unteren aus thermisch behandeltem Buchenholz mit der Behandlungsstufe III. Beide Fensterecken bestehen aus Buchenholz des mittleren Stammabschnittes. Die vier linken Abbildungen zeigen die bewitterten Flächen der Fensterecken mit der Fugenbildung des Konterprofils. Die vier Abbildungen auf der rechten Seite zeigen die Verbindungen der Fenstervise vor und nach der natürlichen Bewitterung.

Deutlich zu sehen ist die starke Fugenöffnung auf der Fläche der Fensterecke I-I-I im Vergleich mit der Fensterecke III-III-III. Die Fensterecke III-III-III zeigt außer einer

leichten Vergrauung des Holzes keine Fugenöffnungen. Der Unterschied zwischen der Fensterecke I-I-I und III-III-III ist am deutlichsten bei den Eckverbindungen zu erkennen. Die Fensterecke I-I-I zeigt starke Fugenöffnungen und Delaminierungserscheinungen. Ebenfalls in dieser Abbildung und vergrößert in der Abbildung 40, ist die Ablösung der obersten Lamelle des Fensterprofils zu sehen. Die Fensterecke III-III-III zeigt keine dieser Erscheinungen. Es ist praktisch kein Unterschied zwischen der bewitterten und unbewitterten Fensterecke festzustellen.



Abbildung 40: Delaminierung einer Lamelle eines Fensterprofils aus unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Das Fensterprofil wurde mit einem 1-K PUR Klebstoff verklebt (Sicht auf die Stirnseite des Fensterprofils).

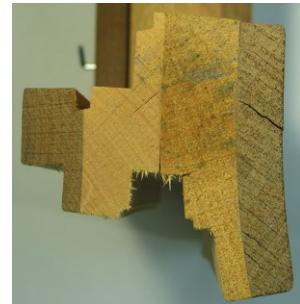
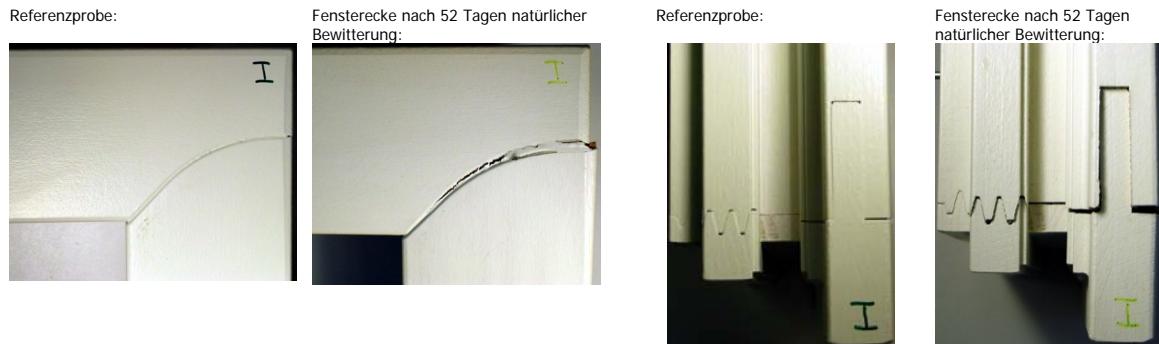


Abbildung 41: Verformung des Fensterprofils (II-I-II) aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II) des mittleren Stammabschnittes, nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung..

In der Abbildung 41 ist die Verformung des Fensterprofils II-I-II zu sehen. Durch die stärkere Quellung der unbehandelten Mittelschichten, im Gegensatz zu den schwächer quellenden Deckschichten aus thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe II, entstand die Krümmung des Profils und eine beginnende Delaminierung der mittleren Klebfuge.

5.3.1.2 Versiegelte Fensterecken

Versiegelte Fensterecke aus unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes (I-I-I):



Versiegelte Fensterecke aus thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III aus dem mittleren Stammabschnitt (III-III-III):

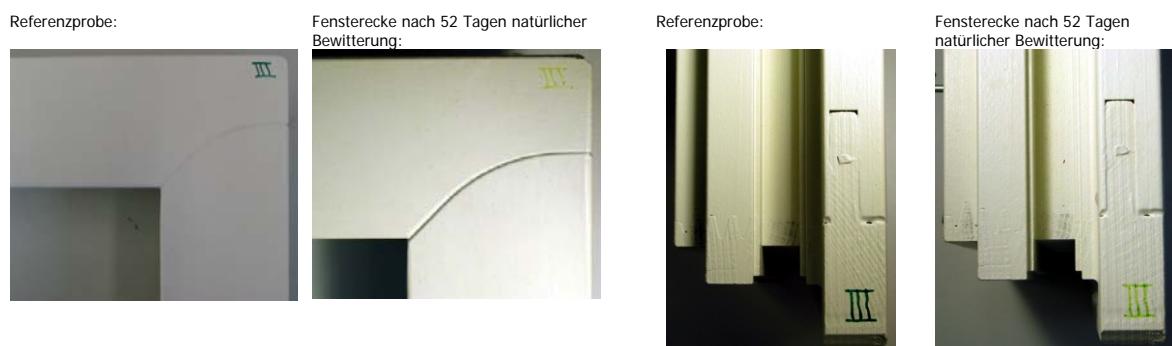


Abbildung 42: Die Abbildungen zeigen versiegelte Fensterecken nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Dabei sind die obere Fensterecke aus unbehandeltem Buchenholz und die untere aus thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III. Beide Fensterecken bestehen aus Buchenholz des mittleren Stammabschnittes und sind mit einem Decklack auf Wasserbasis mit einem Bindemittel aus speziellem Acrylpolymeren versiegelt. Die vier linken Abbildungen zeigen die bewitterten Flächen der Fensterecken mit der Fugenbildung des Konterprofils. Die vier Abbildungen auf der rechten Seite zeigen die Verbindungen der Fensterfriese vor und nach der natürlichen Bewitterung.

Deutlich zu sehen ist die starke Fugenöffnung und die Zerstörung der Versiegelung auf der Fläche der Fensterecke I-I-I, im Vergleich mit der Fensterecke III-III-III. Der Unterschied zwischen der Fensterecke I-I-I und III-III-III ist am besten erkennbar bei den beiden Eckverbindungen. Die Fensterecke I-I-I zeigt starke Fugenöffnungen und somit eine Zerstörung der Versiegelung. Die Fensterecke III-III-III hingegen zeigt keinerlei Veränderungen zwischen der bewitterten und unbewitterten Eckverbindung.

5.3.2 Künstliche Bewitterung

Wegen einiger Probleme bei der künstlichen Bewitterung existieren im Augenblick noch keine aussagekräftigen Resultate. Die Ergebnisse der künstlichen Bewitterung werden in einem späteren Zeitpunkt folgen.

5.3.3 Zusammenfassung

Deutlich erkennbar ist die starke Alterung der thermisch unbehandelten Fensterecken bei den versiegelten und unversiegelten. Die Alterung der Fensterecke charakterisiert sich mit Fugenöffnungen bei den Eckverbindungen und Delaminierungen der Lamellen der Profile. Die thermisch behandelten Fensterecken zeigen hingegen keine oder nur sehr geringe Alterungerscheinungen.

5.3.4 Diskussion

Durch die verringerte Ausgleichsfeuchte und die reduzierte Quellung/Schwindung des thermisch behandelten Buchenholzes reduzierte sich die Fugenöffnung und die Verformung deutlich. Deckverbindungen aus dem wärmebehandelten Holz zeigten eine deutlich verbesserte Formbeständigkeit. Auch die Oberflächenbehandlung wirkte sich deutlich aus.

5.4 Plattenverzug

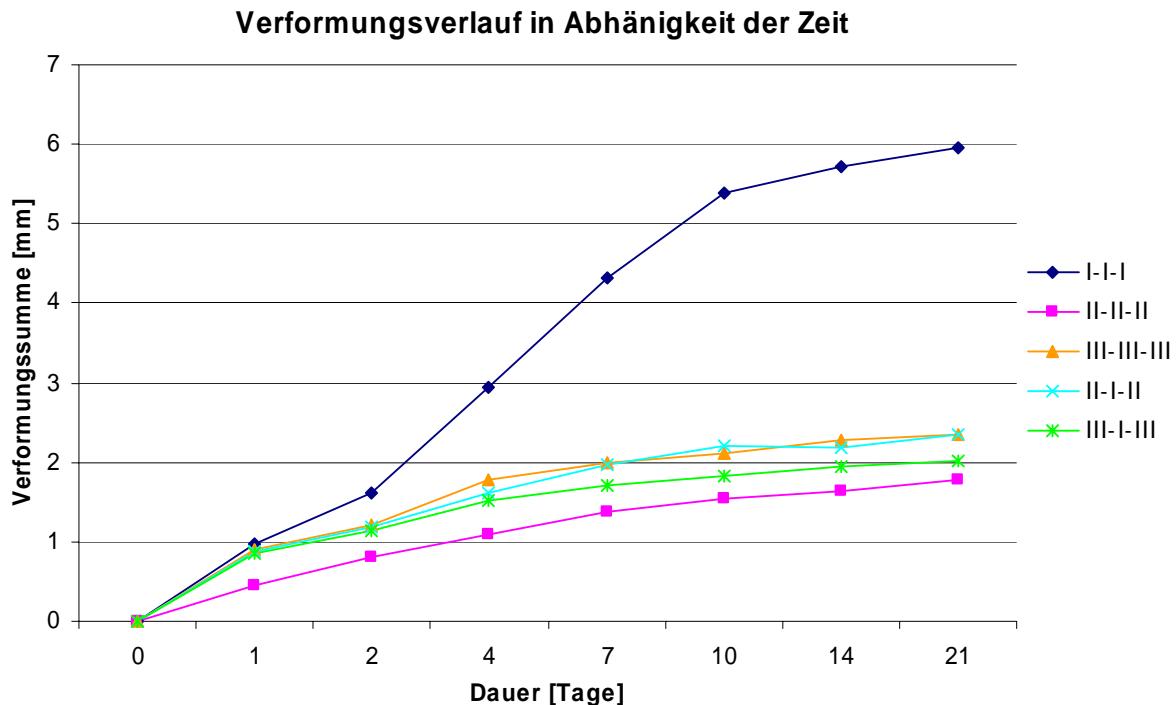


Diagramm 8: Zeitlicher Verlauf des Plattenverzuges von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt in einem Differenzklima von 20°C/65% zu 20°C/100%.

Im Diagramm 8 ist der zeitliche Verlauf der Verformungssummen verschiedener Aufbauten von dreischichtigen Platten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz aus dem mittleren Stammabschnitt aufgezeigt. Dabei herrschte auf der Oberseite der Platte ein Klima von [20/65] und auf der Unterseite ein Klima von [20/100]. Als Referenzplatte dient die unbehandelte Buchenplatte I-I-I.

Deutlich ersichtlich ist, dass die Verformung bei allen Plattenaufbauten ihr Maximum nach 21 Tagen noch nicht erreicht hatte. Das bedeutet, dass die Verformung noch nicht stabilisiert war. Die Verformungskurven verlaufen in einer logarithmischen Kurve. Die Verformungszunahme ist so am Anfang der Messung am grössten und wurde mit der Zeit schwächer. Im Durchschnitt haben die Platten, die aus thermisch behandeltem Buchenholz aufgebaut sind (II-II-II, III-III-III, II-I-II, III-I-III) eine um 64% kleinere Verformungssumme als die Referenzplatte. Dabei sinkt die Verformungssumme bei den Platten III-III-III und II-I-II um 61%, bei III-I-III um 66% und bei II-II-II um 70% verglichen mit der Referenzplatte. Bis zum 2. Tag verlaufen die Platten III-III-III, II-I-II und III-I-III gleich. Ab diesem Tag spaltet sich die Platte III-I-III ab und bildet etwa das Mittel der Verformungssummen der vier Platten aus thermisch behandeltem Buchenholz. Die beiden anderen Platten verlaufen gleich weiter bis zum Ende der Versuchsdauer.

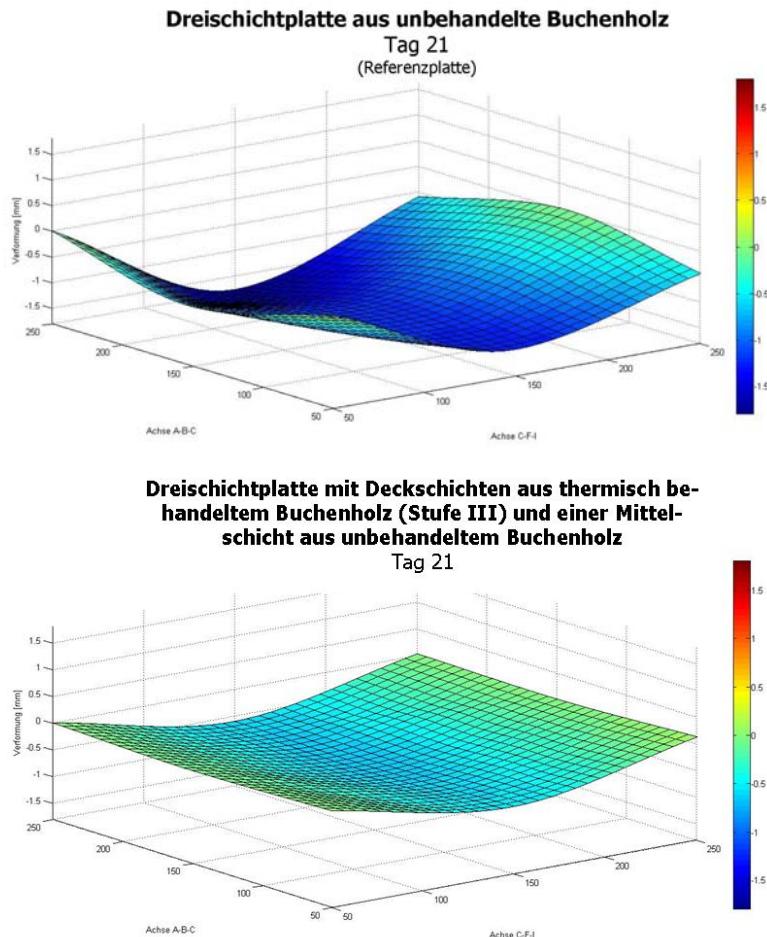


Diagramm 9: Flächendiagramme des Plattenverzuges von Dreischichtplatten aus unbehandeltem Buchenholz (oben) und unbehandelten Buchenholz als Mittelschicht und thermisch behandeltem Buchenholz der Stufe III als Deckschicht (unten). Dabei herrschte auf der Oberseite der Platte ein Klima von 20°C/65% und auf der Unterseite ein Klima von 20°C/100%.

Um die Verformungen der Platten besser zu analysieren, wurden Flächendiagramme der einzelnen Platten an den verschiedenen Tagen erstellt. Die Auflagerpunkte A und C befinden sich im Diagramm vorne rechts und links. Der Auflagerpunkt H hinten in der Mitte. Die Faser der Deckschicht verläuft parallel zur Achse A-B-C.

Das Flächendiagramm oben zeigt die Referenzplatte und das Diagramm unten die Platte III-I-III. Sie zeigt das Mittel der vier Platten, die aus thermisch behandeltem Buchenholz aufgebaut sind. Beide Flächendiagramme zeigen die Platten nach dem 21. Versuchstag. Dabei erreicht die Platte III-I-III eine um 49% kleinere maximale Verformung gegenüber der Referenzplatte.

Detailliertere Angaben zu den einzelnen Verformungen der verschiedenen Platten und weitere Flächendiagramme, aufgelistet nach Plattenaufbau und den einzelnen Tagen, befinden sich im Anhang D.

5.4.1 Zusammenfassung

Deutlich erkennbar ist ein durchschnittlich 64% kleinerer Plattenverzug bei den Platten aus thermisch behandeltem Buchenholz (II-II-II, III-III-III, II-I-II und III-I-III) verglichen mit der Platte aus unbehandeltem Buchenholz (I-I-I). Die geprüften Platten hatten nach der Beendigung des Versuches noch keinen stabilen Zustand erreicht. Die abflachenden Verformungskurven wiesen aber darauf hin, dass die Platten aus thermisch behandeltem Buchenholz einen stabilen Plattenverzug in Kürze erreicht hätten. Die Platte aus unbehandeltem Buchenholz hingegen zeigte noch einen starken Anstieg der Verformungskurve.

5.4.2 Diskussion

Durch die herabgesetzte Holzfeuchte bei thermisch behandeltem Buchenholz ergibt sich eine geringere Quellung und geringerer Feuchtegradient im Querschnitt der Platte. Dadurch kommt es zum vermindernten Plattenverzug. Die thermische Behandlung bewirkt also eine deutliche Erhöhung der Formstabilität.

5.5 Freie Quellung bei Dreischichtplatten

Tabelle 17: Maximale relative Quellung von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) des mittleren Stammabschnittes in allen drei Plattenebenen. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Plattenaufbau der geprüften Dreischichtplatten	Freie Quellung		Dickenquellung [%]
	Quellung parallel zur Faser der DS [%]	Quellung senkrecht zur Faser der DS [%]	
I-I-I	0.072	0.085	1.734
II-II-II	0.054	0.131	0.599
III-III-III	0.046	0.107	0.560
II-I-II	0.073	0.076	1.239
III-I-III	0.030	0.033	0.523

In der Tabelle 17 sind die maximalen Werte, die bei der relativ freien Quellung von Dreischichtplatten nach der Beendigung des Versuches erreicht wurden, ersichtlich. Der Plattenaufbau kann in zwei Kategorien unterteilt werden. In die Kategorie der homogenen Plattenaufbauten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) und in die Kategorie der inhomogenen Plattenaufbauten (II-I-II und III-I-III). Für die Dickenquellung und die Quellung parallel zur Faser der Deckschicht sind die Werte der Platte I-I-I als Referenz anzusehen. Bei der Quellung senkrecht zur Faserrichtung der Deckschicht wird die Platte II-II-II als Referenz angesehen. Die normalerweise verwendete Referenzplatte I-I-I kann hier nicht eingesetzt werden, da sie eine abnormale Abweichung gegenüber den übrigen Werten aufweist. Bei der Quellung parallel zur Faser der Deckschicht ist bei den homogenen sowie bei den inhomogenen Plattenaufbauten eine deutliche Abnahme der Quellung mit zunehmender Intensität der Wärmebehandlung zu erkennen. Das bedeutet eine Abnahme von 25% der Platte II-II-II bzw. 36% der Platte III-III-III verglichen mit der Referenzplatte (I-I-I). Bei den inhomogenen Plattenaufbauten beträgt die Abnahme 59% von der Platte II-I-II hin zur Platte III-I-III, verglichen mit der Platte II-I-II. Bei der Quellung senkrecht zur Faser der Deckschicht zeigt sich der gleiche Trend wie bei der Quellung parallel zur Faser. Das bedeutet eine Abnahme von 18% der Platte II-II-II zur Platte III-III-III verglichen mit der Referenzplatte (II-II-II). Bei den inhomogenen Plattenaufbauten beträgt die Abnahme 57% von der Platte II-I-II hin zur Platte III-I-III, verglichen mit der Platte II-I-II. Bei der Dickenquellung ist die Abnahme der freien Quellung gleich wie in den anderen zwei Plattenrichtungen. Das bedeutet eine Abnahme von 65% der Platte II-II-II bzw. 68% der Platte III-III-III verglichen mit der Referenzplatte. Bei den inhomogenen Plattenaufbauten ist ebenfalls eine Abnahme der freien Quellung in Dickrichtung hin zum intensiver behandelten Buchenholz zu erkennen. Dabei beträgt die Abnahme 58% von der Platte II-I-II hin zur Platte III-I-III, verglichen mit der Platte II-I-II.

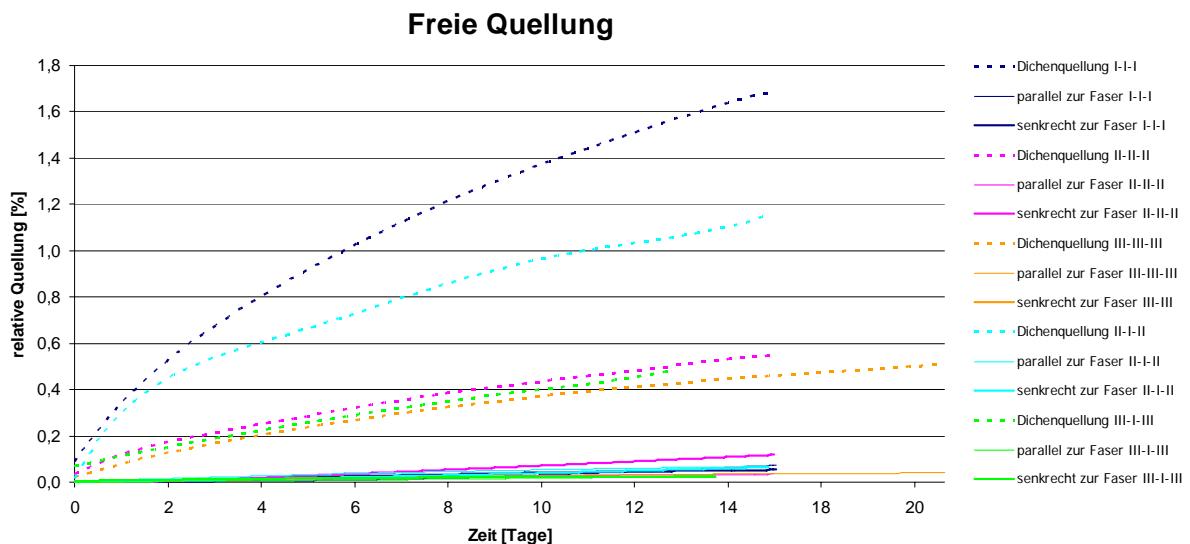


Diagramm 10: Zeitlicher Verlauf der relativen freien Quellung von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt in allen drei Plattenebenen. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichen die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Im Diagramm 10 ist der zeitliche Verlauf der relativen freien Quellung von Dreischichtplatten in alle der Plattenrichtungen aufgezeigt. Um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten, wurden polynomische Trendlinien des 6. Grades als Trendbestimmung für die Einzelwerte der verschiedenen Quellungen eingefügt.

Gut zu erkennen ist, dass die Quellung senkrecht zur Plattenebene nach dem Beenden der Messung noch nicht vollständig abgeschlossen war. Die Trendlinie der Quellungen steigt in den ersten paar Tagen stark an und flacht mit der Zeit ab. Die stärkste Dickenquellung entstand bei der Platte I-I-I gefolgt von den Platten II-I-II, II-II-II und III-I-III bis zur Platte III-III-III mit der kleinsten Dickenquellung. Dabei liegen die Platten II-II-II, III-I-III und III-III-III dicht beieinander im unteren Quellungsbereich.

Auch deutlich zu erkennen ist der um 92% geringere Wert der Quellung parallel und auch senkrecht zu Faser der Deckschicht gegenüber der Dickenquellung üblichen. Diese Tatsache ist aber bekannt und physikalisch logisch, da die Dickenquellung wesentlich höher ist als die Längenquellung des Holzes.

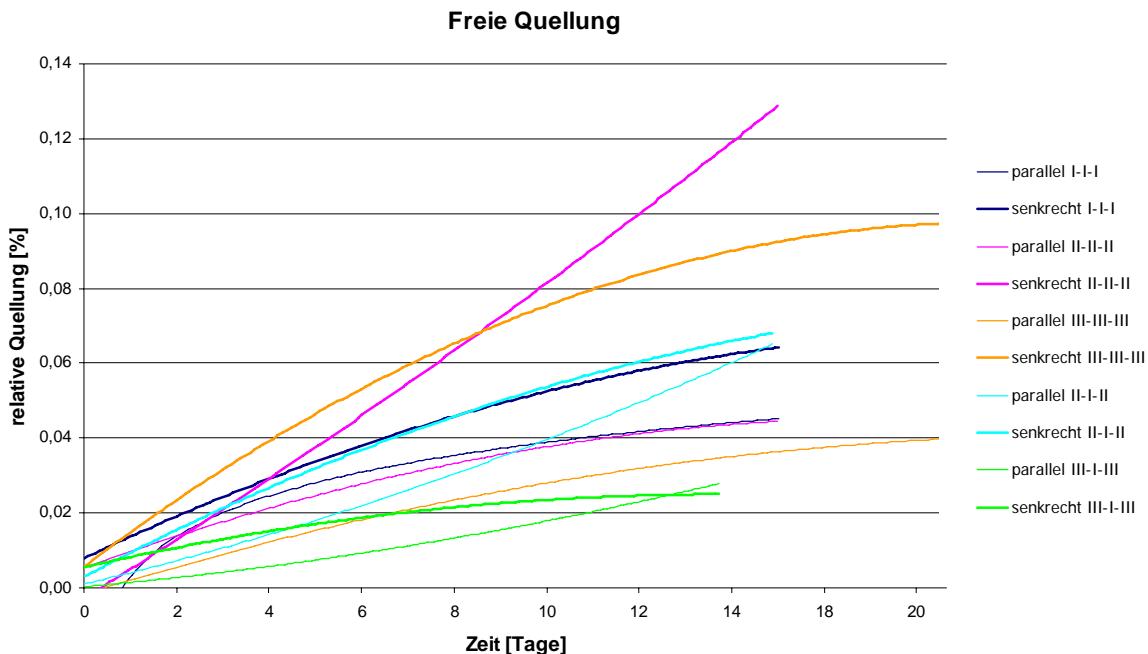


Diagramm 11: Zeitlicher Verlauf der relativen Quellung parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%.%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Im Diagramm 11 ist der zeitliche Verlauf der relativen freien Quellung von Dreischichtplatten parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht aufgezeigt. Um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten, wurden polynomische Trendlinien des 2. Grades als Trendbestimmung für die Einzelwerte der verschiedenen Quellungen eingefügt.

Auch hier ist gut zu erkennen, dass die Quellung der Platte nach dem Beenden der Messung noch nicht vollständig abgeschlossen war. Ein eindeutiger Kurvenverlauf ist nicht zu erkennen. Es sind verschiedene Kurvenverläufe wie linearer, logarithmischer und exponentieller vorhanden.

Die Quellkurven der Quellung parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht befinden sich bei den Platten III-III-III, II-I-II und I-I-I relativ dicht beieinander. Die Platten nehmen dabei die kleinsten Werte ein. Zu beachten in diesem Diagramm ist die Quellungskurve der Platte I-I-I senkrecht zur Faser der Deckschicht. Diese sollte eigentlich den höchsten Wert im Diagramm erreichen, deshalb ist sie in diesem Diagramm mit Vorsicht zu betrachten.

Weitere Daten zur freien Quellung befinden sich im Anhang E.

5.5.1 Zusammenfassung

Deutlich erkennbar ist eine Abnahme der freien Quellung der Dreischichtplatten mit zunehmender Intensität der thermischen Behandlung des Buchenholzes. Die Quellung sinkt dabei parallel zur Faser von der unbehandelten Platte hin zu den behandelten Platten im Durchschnitt um 31% parallel zur Faser der Deckschicht und um 67% in der Dicke der Platte. Die Platte III-I-III erzielte dabei die kleinste Quellung, obwohl sie eine Mittellage aus unbehandeltem Buchenholz besitzt.

Die Quellungskurven zeigen einen abflachenden Verlauf. Die Kurven steigen jedoch an den Versuchenden immer noch leicht an. Das bedeutet, dass die Quellung der Platten nach 14 Tagen nicht vollständig abgeschlossen war.

5.5.2 Diskussion

Durch die verringerte Feuchteaufnahme von thermisch behandeltem Buchenholz ist auch die Holzfeuchte ca. 50% kleiner als die von unbehandeltem Buchenholz. Durch die kleinere Feuchteaufnahme lagern sich auch weniger Wassermoleküle in die intermizellaren und interfibriären Hohlräume ein. Somit dehnen sich die Zellwände weniger aus. Daraus resultiert ein geringeres Quellen und Schwinden. Diese verringerte Quellung ist auch bei den geprüften Dreischichtplatten festzustellen.

Bei der Verwendung von unbehandeltem Buchenholz als Kern mit einer Beplankung aus thermisch behandeltem Buchenholz, zeigt sich die verstifende Wirkung des behandelten Holzes auf eine Dreischichtplatte.

5.6 Behinderte Quellung bei Dreischichtplatten (Quelldruck)

5.6.1 Maximaler Quelldruck nach der Beendigung der Versuchsreihe

Tabelle 18: Maximaler Quelldruck nach der Beendigung des Versuches. Quelldruck parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Behinderte Quellung

Plattenaufbau der Dreischichtplatten	Quelldruck parallel zur Faser der Deckschicht [N/mm ²]	Quelldruck senkrecht zur Faser der Deckschicht [N/mm ²]
I-I-I	0.808	0.880
II-II-II	0.286	0.356
III-III-III	0.211	0.333
II-I-II	0.347	0.498
III-I-III	0.237	0.248

In der Tabelle 18 sind die maximalen Quelldrücke, die bei der behinderten Quellung von Dreischichtplatten erreicht wurden, ersichtlich. Dabei herrschte bei der Verklebung der Platten ein Klima von [20/35]. Anschliessend wurden die Platten in einem Klima von [20/85] auf ihren Quelldruck hin geprüft. Als Referenzplatte diente die Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz (I-I-I).

Der Plattenaufbau kann in zwei Kategorien unterteilt werden. In die Kategorie der homogenen Plattenaufbauten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) und in die Kategorie der inhomogenen Plattenaufbauten (II-I-II und III-I-III). Generell nimmt der Quelldruck von den homogenen zu den inhomogenen Plattenaufbauten um 33% parallel zur Faser der Deckschicht und um 29% senkrecht zur Faser der Deckschicht ab.

Beim Quelldruck parallel zur Faser der Deckschicht ist bei den homogenen, sowie bei den inhomogenen Plattenaufbauten eine deutliche Abnahme des Quelldruckes hin zum intensiver behandelten Buchenholz erkennbar. Das bedeutet eine Abnahme von 65% der Platte II-II-II bzw. 74% der Platte III-III-III verglichen mit der Referenzplatte. Bei den inhomogenen Plattenaufbauten beträgt die Abnahme 32% von der Platte II-I-II hin zur Platte III-I-III, verglichen mit der Platte II-I-II.

Beim Quelldruck senkrecht zur Faser der Deckschicht zeigt sich ein gleicher Trend, wie bei der Quellung parallel zur Faser. Das bedeutet eine Abnahme von 60% der Platte II-II-II bzw. 62 % bei der Platte III-III-III verglichen mit der Referenzplatte. Bei den inhomogenen Plattenaufbauten beträgt die Abnahme 50% von der Platte II-I-II hin zur Platte III-I-III, verglichen mit der Platte II-I-II.

Vergleicht man die Quelldrücke parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht innerhalb

des gleichen Plattenaufbaus, so ist eine Abnahme des Quelldruckes von der senkrechten zur parallelen Richtung festzustellen. Die Abnahme beträgt bei der Platte I-I-I 8%, bei II-II-II 20%, bei III-III-III 37%, bei II-I-II 30% und bei der Platte III-I-III 4% verglichen mit dem Quelldruck senkrecht zur Faser der Deckschicht.

5.6.2 Quelldruck in Abhängigkeit der Zeit

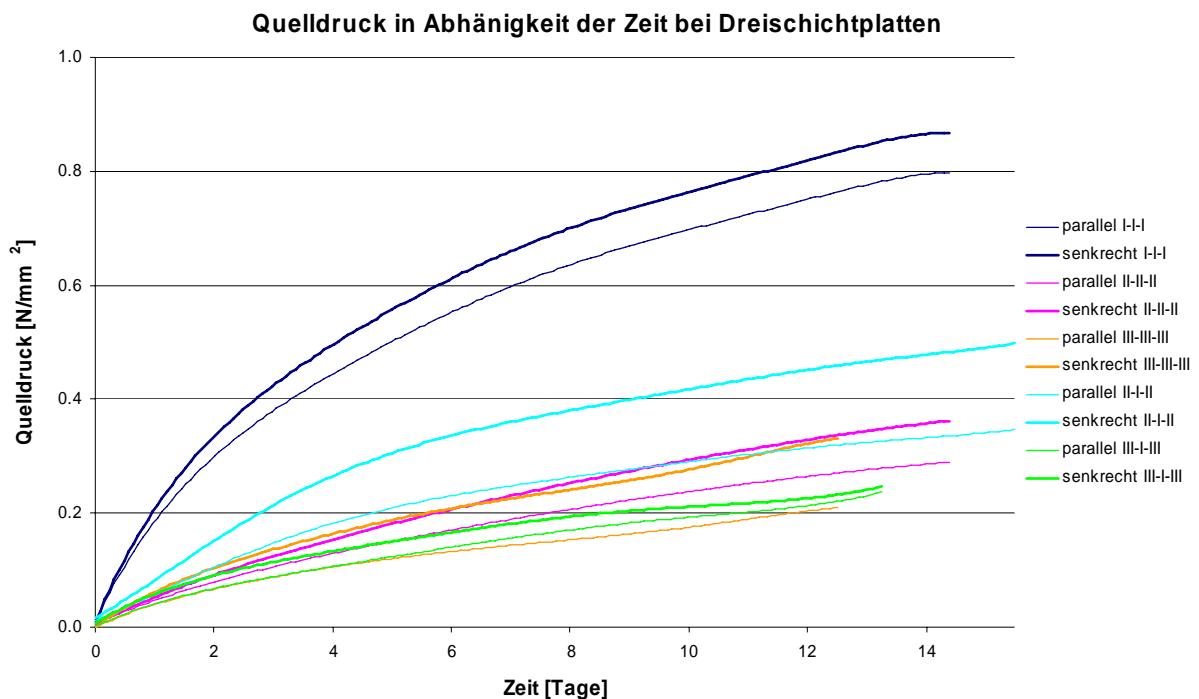


Diagramm 12: Zeitlicher Verlauf des Quelldruckes nach einem Klimawechsel von 20°C/35% zu 20°C/85%. Es wurden die Quelldrücke parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt bestimmt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Im Diagramm 12 ist der zeitliche Verlauf des Quelldruckes bei einer behinderten Quellung von Dreischichtplatten parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht aufgezeigt. Um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten, wurden polynomische Trendlinien des 6. Grades als Trendbestimmung für die Einzelwerte der verschiedenen Quelldrücke eingefügt.

Deutlich zu sehen ist, dass die Quelldrücke in beiden Richtungen der Platte nach dem Abbruch der Messung noch nicht vollständig abgeschlossen waren. Die Trendlinien der Quelldrücke steigen in den ersten paar Tagen stark an und flachen mit der Zeit ab. Die stärksten Drücke besitzt die Platte I-I-I und die kleinsten Quelldrücke die Platte III-III-III. Der Abstand zwischen den Kurven des Quelldrucks parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht gibt die Anisotropie der einzelnen Platten an. Je grösser der Abstand desto anisotroper ist die Platte. Somit ist gut zu sehen, dass die Platte III-III-III am anisotropsten ist und die Platte III-I-III sehr isotrop ist.

5.6.3 Quelldruck in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit

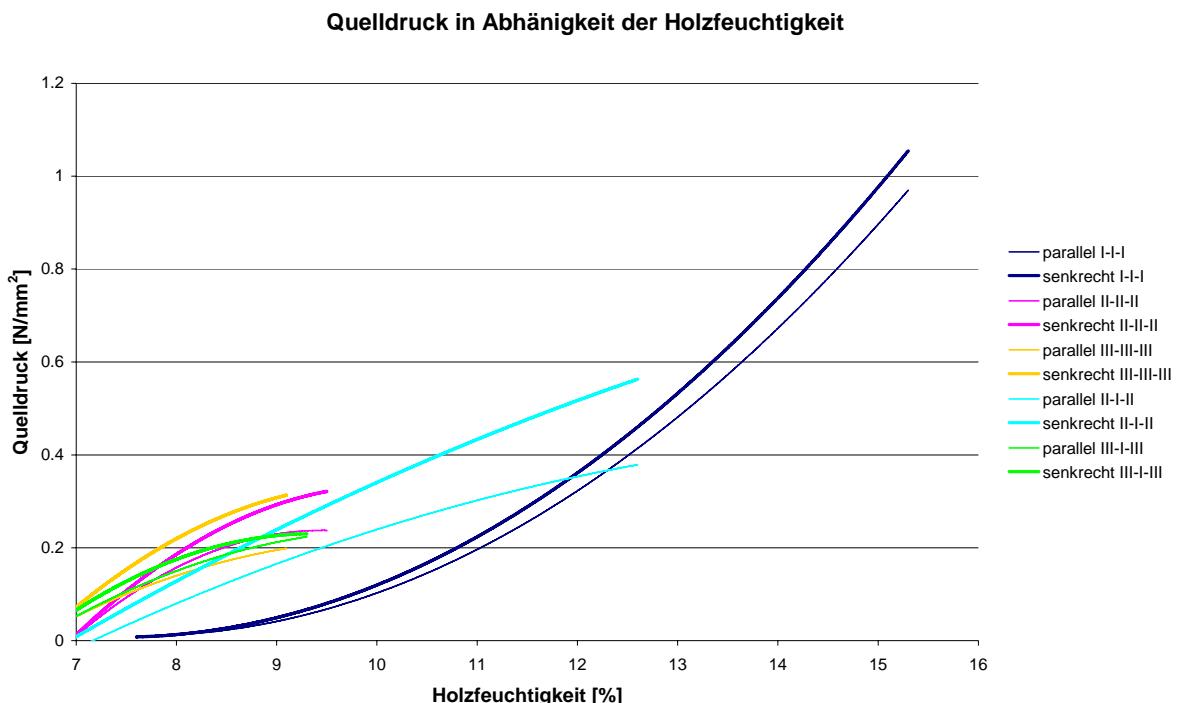


Diagramm 13: Quelldruck parallel und senkrecht zur Faserrichtung der Deckschicht in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammanschnitt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Im Diagramm 13 ist der Quelldruck in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit von Dreischichtplatten parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht aufgezeigt. Um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten, wurden polynomische Trendlinien des 2. Grades als Trendbestimmung für die Einzelwerte der verschiedenen Quelldrücke eingefügt.

Bei der Platte I-I-I ist ein exponentieller Verlauf der Kurve zu erkennen und bei den übrigen Platten ein logarithmischer. Auch hier ist ersichtlich, dass nach der Beendigung der Messung die Quellung der Platten und somit der Quelldruck sein Maximum noch nicht erreicht hatte. Die Platte I-I-I erreicht eine von 15%, die Platte II-I-II eine von 12.5% und die übrigen Platten eine durchschnittliche Endfeuchtigkeit von ca. 9%. Mit der gleichen Tendenz wie die durchschnittliche Feuchtigkeit der Platten abnimmt, nehmen auch die Quelldrücke ab. Das bedeutet, dass die Platte I-I-I den grössten Quelldruck erreichte, gefolgt von den Platten II-I-II, II-II-II, III-I-III und die Platte III-III-III erreichte die kleinsten Quelldrücke.

5.6.4 Quelldruck in Abhängigkeit der freien Quellung

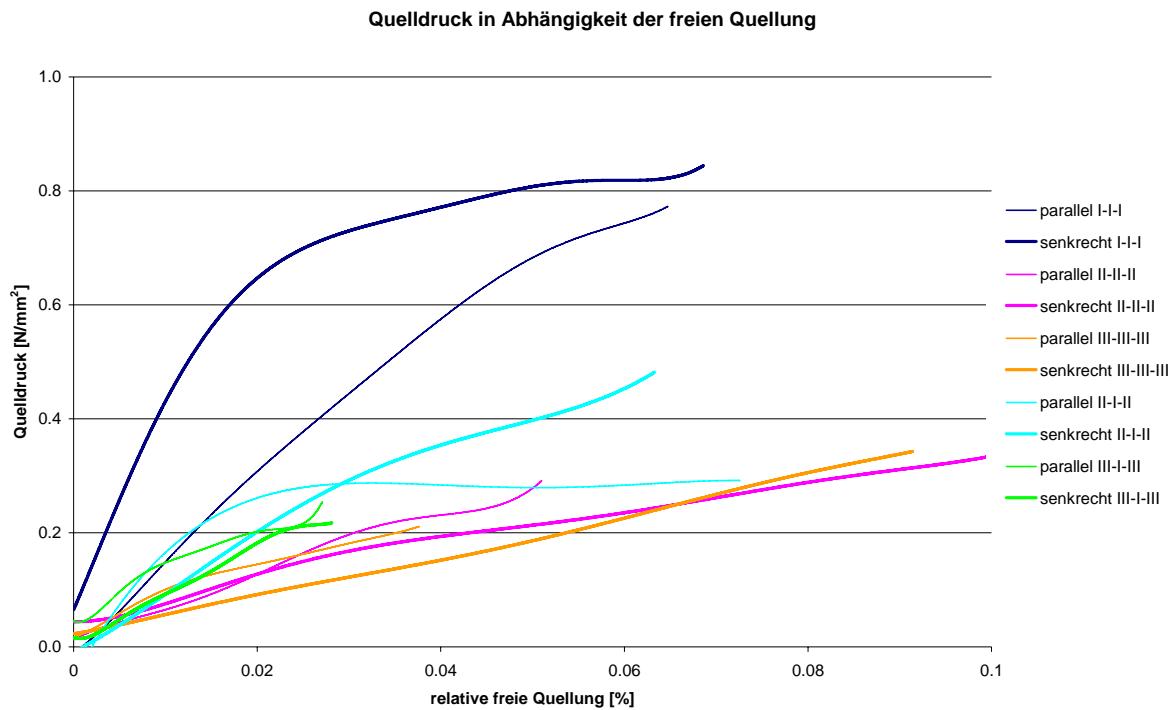


Diagramm 14: Quelldruck parallel und senkrecht zur Faserrichtung der Deckschicht in Abhängigkeit der relativen freien Quellung bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.

Im Diagramm 14 ist der Quelldruck in Abhängigkeit der relativen freien Quellung von Dreischichtplatten parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht aufgezeigt. Um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten, wurden polynomische Trendlinien des 6. Grades als Trendbestimmung für die Einzelwerte der verschiedenen Quelldrücke eingefügt. Auch hier ist zu beachten, dass nach der Beendigung der Messung die freie Quellung und der Quelldruck ihre Maxima noch nicht erreicht hatten.

Der Kurvenverlauf der Platten III-III-III und II-II-II ist mit Vorsicht zu interpretieren. Wie bei den Ergebnissen im Kapitel 5.5 schon erwähnt, sind die Werte der freien Quellung senkrecht zur Faser der Deckschicht bei der Platte I-I-I zu tief.

Gut zu sehen ist aber die klare Unterteilung der Plattenaufbauten. Die homogenen Platten aus thermisch behandeltem Buchenholz (II-II-II und III-III-III) haben die kleinsten Quelldrücke bei einer jedoch hohen relativen Quellung. Die homogene Platte I-I-I nimmt von allen Plattenaufbauten die höchsten Quelldrücke an, bei einer mittleren relativen Quellung. Die inhomogenen Platten (II-I-II und III-I-III) liegen in der Mitte der Werte. Dabei erreicht die Platte II-I-II eine gleiche freie Quellung wie die Platte I-I-I, aber mit einem deutlich geringeren Quelldruck. Die inhomogene Platte III-I-III erreicht von allen Platten bei der freien Quellung, wie auch beim Quelldruck die kleinsten Werte.

Weitere Daten zur behinderten Quellung befinden sich im Anhang F.

5.6.5 Zusammenfassung

Auch hier ist ein Trend der Abnahme des Quelldruckes bei einer Zunahme der Intensität der thermischen Behandlung festzustellen. Die Platte I-I-I erreicht den grössten Quelldruck und die Platte III-I-III den kleinsten. Dabei reduzieren sich die Drücke bei den Platten, die thermisch behandelte Buchenlagen besitzen, um 33% parallel zur Faser der Deckschicht und um 29% senkrecht zur Faser gegenüber der Platte I-I-I. Die Abnahme der Quelldrücke vom senkrechten Verlauf der Faser hin zum parallelen Verlauf der Faser der Deckschicht beträgt 18% verglichen mit den Drücken senkrecht zur Faser. Nach der Beendigung des Quellversuches hatten auch hier die Platten ihren maximalen Quelldruck noch nicht erreicht.

Beim Vergleich des Quelldruckes mit der durchschnittlichen Holzfeuchtigkeit der Platten erreicht die Platte I-I-I eine Feuchtigkeit von 15%, die Platte II-I-II eine von 12.5% und die übrigen Platten (II-II-II, III-I-III, III-III-III) eine von 9%. Mit der gleichen Tendenz wie die Plattenfeuchtigkeit abnimmt, nehmen auch die Quelldrücke ab. Das bedeutet, dass die Platte I-I-I den grössten Quelldruck erreicht, gefolgt von den Platten II-I-II, II-II-II, III-I-III und die Platte III-III-III erreicht die kleinsten Quelldrücke. Je höher also die Feuchteaufnahme ist, desto ein stärker entwickelt sich ein Quelldruck.

Beim Vergleich des Quelldruckes mit der relativen freien Quellung der Platten, erreicht die Platte III-I-III von allen Platten bei der freien Quellung wie auch beim Quelldruck die kleinsten Werte. Die Platte I-I-I erreicht den höchsten Quelldruck bei einem mittleren relativen Quellwert. Da die Platte I-I-I senkrecht zu Faser der Deckschicht eine Abweichung gegenüber den anderen Quellungen der Platten in der gleichen Richtung ergibt, sollten die Werte der freien Quellung senkrecht zur Faser der Deckschicht mit Vorsicht interpretiert werden.

5.6.6 Diskussion

Die bis zu 50% geringere Quellung von thermisch behandeltem Buchenholz im Vergleich zu unbehandeltem Buchenholz spiegelt sich auch bei der behinderten Quellung von Dreischichtplatten wieder. Es entsteht eine durchschnittliche Abnahme des Quelldrucks von 60% parallel zur Faser der Deckschicht und von 67% senkrecht zur Faser verglichen mit der Platte aus unbehandeltem Buchenholz.

Der Zusammenhang von Holzfeuchte und Quelldruck ist deutlich erkennbar. Je kleiner die durchschnittliche Holzfeuchte der Platte ist, umso kleineren Quelldruck weist die Platte auf. Durch die geringere Feuchteaufnahme dehnen sich die Zellwände weniger aus. Diese kleinere Dehnung bewirkt einen kleineren Quelldruck. Einen weiteren Einfluss auf den verringerten Quelldruck könnten die Risse zwischen den Zellwänden haben, die bei der thermischen Behandlung entstehen. Diese werden bei einer Ausdehnung der Zellwände geschlossen und bilden so einen Puffer.

Auch beim Quelldruck in Abhängigkeit der freien Quellung, ist der Zusammenhang der verringerten Quellung von thermisch behandeltem Buchenholz zu sehen. Die verminderte Feuchteaufnahme und somit die kleinere Ausdehnung der Zellwände zeigt auch hier die Verkleinerung des Quelldruckes. Die Werte des Quelldruckes senkrecht zur Faser der Deckschicht werden hier nicht diskutiert, da bei den Werten der freien Quellung ein Messfehler vorliegt.

5.7 Eigenspannungen in Dreischichtplatten

5.7.1 Vorhandene Eigenspannungen nach dem Plattenverzug

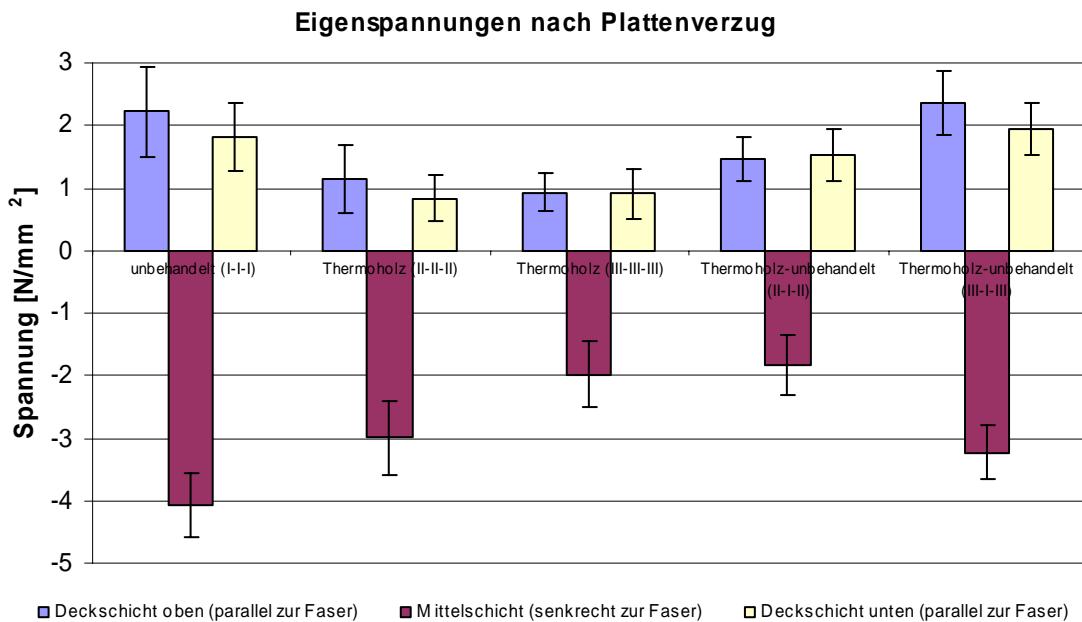


Diagramm 15: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe Plattenverzug. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen)

Das Diagramm 15 zeigt die Eigenspannungen zwischen den Schichten einer Dreischichtplatte nach einem Differenzklima. Dabei herrschte auf der Oberseite der Platte ein Klima von [20/65] und auf der Unterseite ein Klima von [20/100]. Als Referenzplatte dient die Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz (I-I-I).

Das Diagramm ist in zwei Kategorien zu unterteilen, in die Kategorie mit den homogenen Plattenaufbauten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) und in die inhomogenen Aufbauten (II-I-II und III-I-III). Die durchschnittliche Abnahme der Eigenspannungen der oberen Deckschichten der homogenen Plattenaufbauten gegenüber den inhomogenen Platten beträgt 25%, verglichen mit den inhomogenen Aufbauten. Bei den unteren Deckschichten beträgt die Abnahme 32% und bei den Mittelschichten besteht eine Zunahme von 19%. Fasst man die Werte der oberen und unteren Deckschichten zusammen, erhält man eine Abnahme von 28% von den homogenen zu den inhomogenen Plattenaufbauten hin. Generell entsteht eine Abnahme der Eigenspannungen in den Deckschichten der homogenen Plattenaufbauten von der Referenzplatte hin zur stärksten behandelten Platte (III-III-III). Bei den inhomogenen Platten ist ein gegenläufiger Trend festzustellen. Dort nehmen die Eigenspannungen vom schwächer behandelten zum intensiver behandelten Material zu. Bei den Mittelschichten der homogenen und inhomogenen Plattenaufbauten ist der gleiche Trend zu erkennen. Dabei nimmt die Eigenspannung der Mittelschicht bei den homogenen Plattenaufbauten von der Referenzplatte zum Aufbau II-II-II hin um 27% ab, bezogen auf die Mittelschicht der Referenzplatte. Die Eigenspannung von der Platte II-II-II zur III-III-III senkt sich um 34%, im Vergleich zur Platte II-II-II und von der Referenzplatte zur Platte III-III-III ergibt sich eine Reduktion der Eigenspannung von 51% in Bezug auf die

Referenzplatte. Bei den inhomogenen Platten nimmt die Eigenspannung in der Mittelschicht bei der Platte II-II-II zu III-I-III 43% zu, verglichen mit den Werten der Platte III-I-III. Wird die obere und untere Deckschicht innerhalb der Platte untersucht, ergibt sich eine Abnahme von der unteren zur oberen Deckschicht von 18% beim Plattenbau I-I-I, 27% bei II-II-II, 3% bei III-III-III und 18% bei III-I-III verglichen mit dem Wert der oberen Deckschicht. Eine Ausnahme bildet der Plattenbau II-I-II. Hier erfolgt eine Zunahme von 5%.

5.7.2 Vorhandene Eigenspannungen nach der freien Quellung

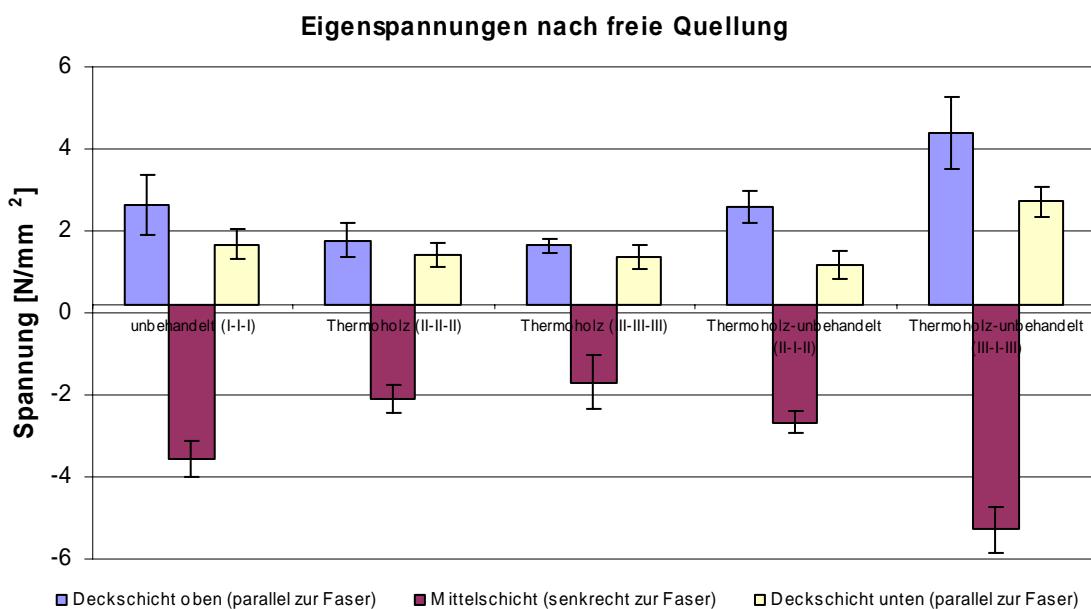


Diagramm 16: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe freie Quellung. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen)

Das Diagramm 16 zeigt die Eigenspannungen zwischen den Schichten einer Dreischichtplatte nach einem Klimawechsel. Dabei herrschte bei der Verklebung der Platten ein Klima von [20/35]. Anschliessend wurden die Platten in einem Klima von [20/85] auf ihre freie Quellung hin geprüft. Als Referenzplatte dient die Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz (I-I-I).

Das Diagramm ist in zwei Kategorien zu unterteilen. In die Kategorie mit den homogenen Plattenbauarten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) und in die inhomogenen Bauarten (II-I-II und III-I-III). Die durchschnittliche Abnahme der Eigenspannungen der oberen Deckschichten der homogenen Plattenbauarten gegenüber den inhomogenen Platten beträgt 45%, verglichen mit den inhomogenen Bauarten. Bei den unteren Deckschichten beträgt die Abnahme 27% und bei den Mittelschichten 36%. Fasst man die Werte der oberen und unteren Deckschichten zusammen, erhält man eine Abnahme von 38% von den homogenen zu den inhomogenen Plattenbauarten hin.

Generell entsteht eine Abnahme der Eigenspannungen in den Deckschichten der homogenen Plattenbauarten von der Referenzplatte hin zur stärksten behandelten Platte (III-III-III). Bei den inhomogenen Platten ist ein gegenläufiger Trend festzustellen. Dort nehmen die

Eigenspannungen vom schwächer behandelten zum intensiver behandelten Material zu. Bei den Mittelschichten der homogenen und inhomogenen Plattenaufbauten ist der gleiche Trend zu erkennen. Dabei nimmt die Eigenspannung der Mittelschicht bei den homogenen Plattenaufbauten von der Referenzplatte zum Aufbau II-II-II hin um 39% ab, bezogen auf die Mittelschicht der Referenzplatte. Die Eigenspannung von der Platte II-II-II zur III-III-III senkt sich um 17%, im Vergleich zur Platte II-II-II und von der Referenzplatte zur Platte III-III-III ergibt sich eine Reduktion der Eigenspannung von 50% in Bezug auf die Referenzplatte. Bei den inhomogenen Platten nimmt die Eigenspannung in der Mittelschicht bei der Platte II-I-II zu III-I-III um 48% zu, verglichen mit den Werten der Platte III-I-III. Wird die obere und untere Deckschicht innerhalb der Platte untersucht, ergibt sich eine Abnahme von der unteren zur oberen Deckschicht von 39% beim Plattenbau I-I-I, 24% bei II-II-II, 20% bei III-III-III, 59% bei II-I-II und 40% bei III-I-III verglichen mit dem Wert der oberen Deckschicht.

5.7.3 Vorhandene Eigenspannungen nach der behinderten Quellung

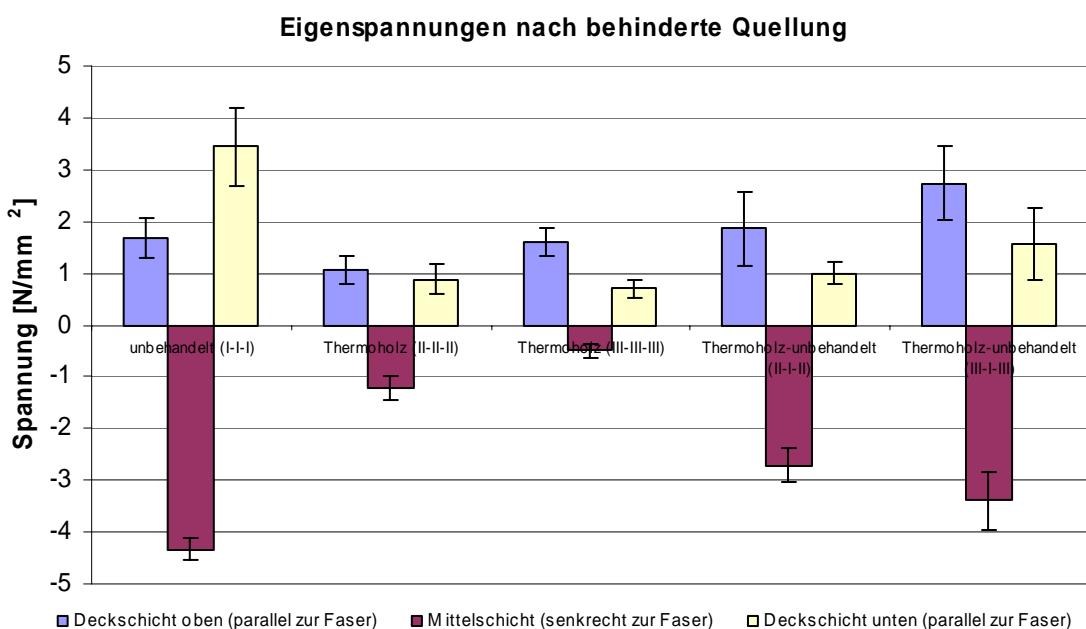


Diagramm 17: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe behinderte Quellung. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen)

Das Diagramm 17 zeigt die Eigenspannungen zwischen den den Schichten einer Dreischichtplatte nach einem Klimawechsel. Dabei herrschte bei der Verklebung der Platten ein Klima von [20/35]. Anschliessend wurden die Platten in einem Klima von [20/85] auf ihre freie Quellung hin geprüft. Als Referenzplatte dient die Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz (I-I-I).

Das Diagramm ist in zwei Kategorien zu unterteilen. In die Kategorie mit den homogenen Plattenaufbauten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) und in die inhomogenen Aufbauten (II-I-II und III-I-III). Die durchschnittliche Abnahme der Eigenspannungen der oberen Deckschichten der homogenen Plattenaufbauten gegenüber den inhomogenen Platten beträgt 37%, verglichen mit den inhomogenen Aufbauten. Bei den unteren Deckschichten

ergibt sich eine Zunahme von 30% und bei den Mittelschichten eine Abnahme von 34%. Fasst man die Werte der oberen und unteren Deckschichten zusammen, erhält man eine Abnahme von 13% von den homogenen zu den inhomogenen Plattenaufbauten hin. Generell entsteht eine Abnahme der Eigenspannungen in den Deckschichten der homogenen Plattenaufbauten von der Referenzplatte hin zur stärksten behandelten Platte (III-III-III). Bei den inhomogenen Platten ist ein gegenläufiger Trend festzustellen. Dort nehmen die Eigenspannungen vom schwächer behandelten zum intensiver behandeltem Material zu. Bei den Mittelschichten der homogenen und inhomogenen Plattenaufbauten ist der gleiche Trend zu erkennen. Dabei nimmt die Eigenspannung der Mittelschicht bei den homogenen Plattenaufbauten von der Referenzplatte zum Aufbau II-II-II hin um 72% ab, bezogen auf die Mittelschicht der Referenzplatte. Die Eigenspannung von der Platte II-II-II zur III-III-III senkt sich um 59%, im Vergleich zur Platte II-II-II und von der Referenzplatte zur Platte III-III-III ergibt sich eine Reduktion der Eigenspannung von 89% in Bezug auf die Referenzplatte. Bei den inhomogenen Platten nimmt die Eigenspannung in der Mittelschicht bei der Platte II-I-II zu III-I-III um 20% zu, verglichen mit den Werten der Platte III-I-III. Wird die obere und untere Deckschicht innerhalb der Platte untersucht, ergibt sich eine Abnahme von der unteren zur oberen Deckschicht von 18% beim Plattenaufbau II-II-II, 56% bei III-III-III, 46% bei II-I-II und 43% bei III-I-III verglichen mit dem Wert der oberen Deckschicht. Eine Ausnahme bildet der Plattenaufbau I-I-I. Hier erfolgt eine Zunahme von 106% verglichen mit der oberen Deckschicht.

Weitere Angaben und Daten zur Eigenspannung befinden sich im Anhang G.

5.7.4 Zusammenfassung

Bei den Eigenspannungen, die nach den Versuchsreihen Plattenverzug, freie und behinderte Quellung zwischen den Lagen der Dreischichtplatten entstanden, ist ein eindeutiger Trend festzustellen. Die Mittelschichten bei den homogenen Plattenaufbauten (I-I-I, II-II-II und III-III-III) zeigen eine deutliche Eigenspannungsabnahme von durchschnittlich 63% von der unbehandelten zu den thermisch intensiver behandelten Schichten hin, verglichen mit der unbehandelten Platte. Bei den Mittelschichten der inhomogenen Plattenaufbauten (II-I-II und III-I-III) ist ein gegenläufiger Trend zu erkennen. Hier nehmen die Eigenspannungen von der Platte mit weniger intensiv behandelten Deckschichten zu den intensiver behandelten Deckschichten hin um 37% zu.

Die erreichten Eigenspannungen in der Mittelschicht bei den homogenen Plattenaufbauten betragen bei der Versuchsreihe Plattenverzug 3 N/mm^2 gefolgt von der freien Quellung mit 2.7 N/mm^2 und der behinderten Quellung mit 2 N/mm^2 . Bei den inhomogenen Plattenaufbauten erreichte die freie Quellung die höchsten Eigenspannungen in der Mittelschicht mit 4.2 N/mm^2 , danach die behinderte Quellung mit 3.05 N/mm^2 und zum Schluss der Plattenverzug mit 3.02 N/mm^2 .

Bei den Deckschichten der Platten ist eine Abnahme der Eigenspannungen von der oberen zur unteren Schicht hin zu erkennen. Dabei ist die durchschnittliche Abnahme bei den homogenen Plattenaufbauten 27% und bei den inhomogenen 37%. Die Ausnahmen hier sind in der Platte II-I-II beim Plattenverzug und in der Platte I-I-I bei der behinderten Quellung zu finden. Dort nehmen die Eigenspannungen von der oberen zur unteren Deckschicht hin zu.

5.7.5 Diskussion

Durch die verringerte Holzfeuchte und somit die kleinere Quellung des thermisch behandelten Buchenholzes ergeben sich auch kleinere Ausdehnungen der einzelnen Plattschichten. Durch diese verringerte Ausdehnung entstehen zwischen den Plattenlagen in den Klebfugen auch kleinere Eigenspannungen. Die Holzfeuchte sinkt mit der intensiveren Behandlung des Buchenholzes und somit auch die auftretenden Eigenspannungen. Die Dehnungen und somit auch die wirkenden Kräfte in den Klebfugen sind bei einem Plattenaufbau aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz am stärksten.

Bei der Messung der Eigenspannungen wurde der Einfluss der unterschiedlichen Beanspruchungen der Versuchsreihen auf die Klebfuge nicht berücksichtigt.

5.8 Testung des Delaminierungseffektes bei Wechselklimalagerung

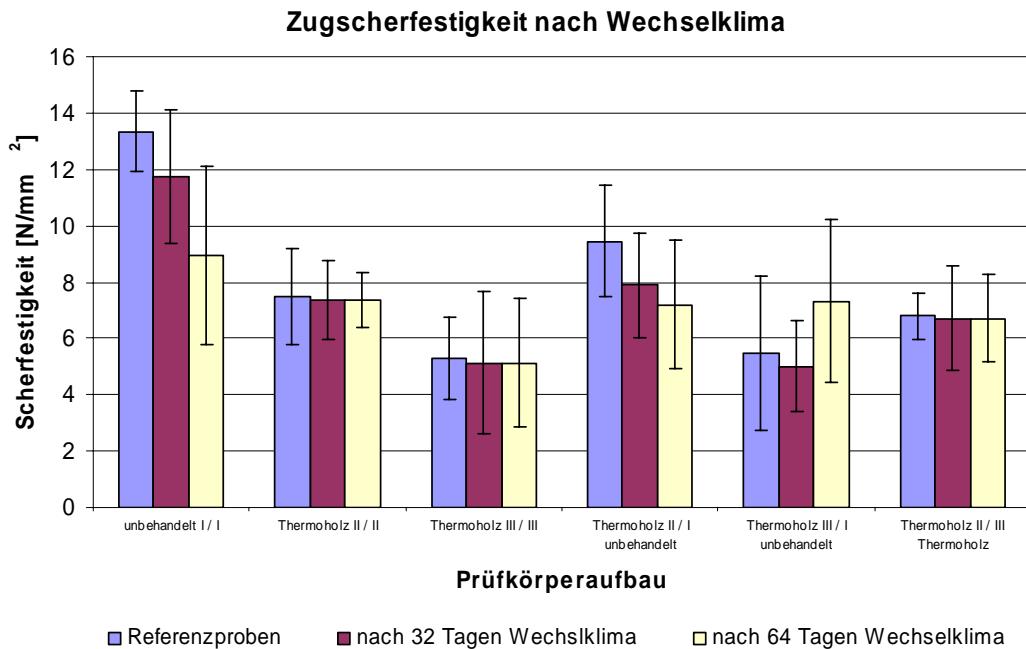


Diagramm 18: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach unterschiedlicher Dauer im Wechselklima.

Im Diagramm 18 ist die Veränderung der Scherfestigkeit der Klebfuge von Zugscherproben aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) des mittleren Stammabschnittes unter dem Einfluss eines Feucht-Trocken-Wechselklimas aufgezeigt. Die Referenzproben wurden keinem Wechselklima ausgesetzt.

Eine deutliche Reduktion der Klebfugenfestigkeit ist bei den Prüfkörperaufbauten mit unbehandeltem Buchenholz (I/I, II/I und III/I) ersichtlich. Dabei zeigt der Prüfkörperaufbau I/I die höchsten Festigkeitswerte. Bezogen auf die Referenzproben sinkt die Scherfestigkeit der Proben I/I nach 32 Tagen Wechselklima um 12% und nach 64 Tagen um 33%. Beim Prüfkörperaufbau II/I ergibt sich eine Senkung der Werte von 17% bei 32 Tagen und 24% bei 64 Tagen. Die Ergebnisse beim Prüfkörperaufbau III/I verlaufen nicht im gleichen Trend wie bei den Proben I/I und II/I. Dies ist die Folge eines hohen Probenausfalls von bis zu 80%. Dieser grosse Ausfall beim Prüfkörperaufbau III/I ist auf Brüche ausserhalb der Sollbruchstelle in der thermisch behandelten Buchenholzschicht durch dessen verringerte Festigkeit zurück zu führen, was die Abbildung 43 auch zeigt.

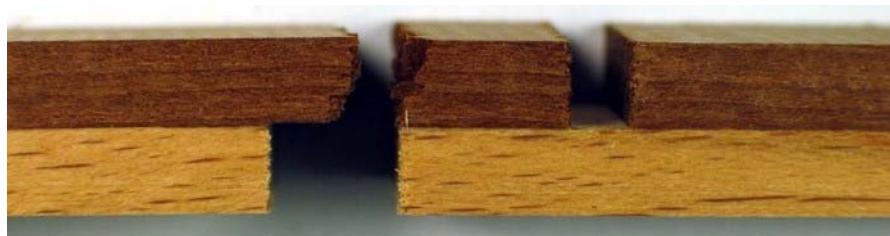


Abbildung 43: Ausfall von Zugscherproben durch Bruch bei Einschnitt in der thermisch behandelten Schicht des Buchenholzes.

Bei den Prüfkörperaufbauten aus nur thermisch behandeltem Buchenholz ist erkennbar, dass das Wechselklima nur einen sehr geringen Einfluss auf die Klebfugenfestigkeit hat. Die Scherfestigkeiten nach einer 32 oder 64 Tage dauernden Klimatisierung sind gleich. Ein leichter Anstieg ist nur bei den Referenzproben zu erkennen. Dabei steigt die Festigkeit beim Prüfkörperaufbau II/II um 1.7%, bei III/III um 3.2% und bei II/III um 1.3% an. Ein weiterer Trend der aus den Resultaten ersichtlich ist, ist die Abnahme der Festigkeit bei den homogenen Prüfkörperaufbauten (I/I, II/II und III/III) sowie bei den inhomogenen Aufbauten (II/I, III/I und III/II).

Detaillierte Angaben zu den einzelnen Klebfugenfestigkeiten der Proben und zum Holzfaserbelag sowie zur statistischen Auswertung befinden sich im Anhang H.

5.8.1 Zusammenfassung

Zu erkennen ist, dass Prüfkörperaufbauten mit unbehandeltem Buchenholz (I/I und II/I) eine grosse Abnahme der Klebfugenfestigkeit aufweisen. Dabei nimmt die Scherfestigkeit im Durchschnitt nach 32 Tagen Wechselklima um 15% ab und nach 64 Tagen 29%. Bei den Prüfkörperaufbauten aus thermisch behandeltem Buchenholz (II/II, III/III und III/II) zeichnet sich keine Festigkeitsminderung der Klebfugen durch die Einwirkung eines Wechselklimas ab.

5.8.2 Diskussion

Die geringe Abnahme der Scherfestigkeit bei den Proben, die einen Probenaufbau aus nur thermisch behandeltem Buchenholz haben, ist auf die verringerte Feuchteaufnahme und auch den verringerten E-Modul behandelten Holzes zurück zu führen. Durch die Reduzierung beider verringert sich die Spannungen. Damit wird die Leimfuge weniger belastet. Dadurch verkleinert sich auch die Dehnung bei einer Schwindung und Quellung um 50% verglichen mit unbehandeltem Holz. Somit wird die Klebfuge weniger durch mechanische Kräfte, die bei einer abwechselnden Quellung und Schwindung entstehen, geschädigt. Durch diesen kleineren Delaminierungseffekt verliert die Klebfuge nur einen kleinen Anteil ihrer Zugscherfestigkeit.

Was noch zu beachten ist, ist die verringerte Festigkeit des behandelten Holzes. Durch diese geringe Festigkeit, kann es versagen bevor die maximale Bruchkraft der Klebfuge erreicht wird.

6 Ausblick und Empfehlung für die praktische Anwendung der Ergebnisse

6.1 Ausblick für weiterführende Forschungsarbeiten

Die Resultate des Plattenverzugs ergaben, dass inhomogene Plattenaufbauten einen geringen Plattenverzug besitzen. Dabei bestanden die Mittelschichten der Platten aus unbehandeltem und die Deckschichten aus thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes. Wandelt man nun diese Dreischichtplatte in einen Brettschichtträger um und verwendet das unbehandelte Buchenholz nicht als Mittellamellen sondern als Decklamellen des Brettschichtträgers, könnte ein stabiler Träger entstehen. Durch einen Kern aus thermisch behandeltem Buchenholz ist der Träger sehr formstabil und durch eine Beplankung mit unbehandeltem Buchenholz könnte er eine gute statische Trageigenschaft aufweisen. Bei den gleichen inhomogenen Plattenaufbauten ergaben Messungen, bei einer freien Quellung, Eigenspannungen in den Klebstofffugen von über 5.5 N/mm^2 . Um also einen Brettschichtträger aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz herstellen zu können, muss ein geeigneter Klebstoff evaluiert werden. Dieser sollte eine hohe Elastizität aufweisen, da durch das unterschiedliche Quellmass des unbehandelten und thermisch behandelten Buchenholzes eine grosse Dehnung zwischen den Fügeteilen entsteht.

Es laufen verschiedene Projekte an der ETH Zürich, die sich mit der Thematik der Eigenspannungen in Massivholzplatten auseinander setzen. Eines dieser Projekte ist die Simulation von Eigenspannungen in Massivholzplatten und wird von Thomas Gereke (dipl. Ing.) als Dissertation bearbeitet.

- **Ziel:**

Testung verschiedener elastischer Klebstoffe, die eine Dehnung der stark unterschiedlich quellenden Fügeteile aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes aufnehmen kann.

Ein grosses Hindernis, das thermisch behandeltes Holz noch überwinden muss, ist die starke Geruchsbelastung die vom Holz ausgeht. Bei einem intensiv thermisch behandelten Buchenholzstück entsteht ein starker, rauchiger Geruch. Viele Personen die im Verlaufe der Diplomarbeit mit dem behandelten Buchenholz in Kontakt kamen, empfanden den Geruch als sehr unangenehm, manchmal sogar als störend. Auf die Frage hin, ob sie das thermisch behandelte Holz in ihrer Wohnung in Form eines Möbels oder eines Parkettbodens einsetzen würden, verneinten die meisten. Auch eine Versiegelung, wie bei den hergestellten Fensterecken, ergab nur eine geringe Verbesserung der Geruchsemmissionen, wie auch einige Mitarbeiter von der Fensterfabrik Albisrieden bestätigten.

- **Ziel:**

Minimierung der Geruchsemmissionen von thermisch intensiv behandeltem Holz

6.2 Praktische Anwendung der Ergebnisse

Für relativ formstabile Buchenbretter aus dem mittleren Stammabschnitt zu erhalten, ist auf folgende Regel zu achten:

- Holz aus der Nähe des Markes sollte zu dünnen Brettern eingeschnitten werden und Holz aus der Peripherie des Buchenstammes zu dickern.

Es sind jedoch noch weitere Versuche in diesem Gebiet durchzuführen, das sich die Ergebnisse der Verformung der Buchenbretter lediglich auf einen Stamm beschränkt.

Wie im Kapitel 6.1 schon erwähnt, ist die Anwendung von thermisch behandeltem Buchenholz im Innenbereich durch seinen starken rauchigen Geruch eher ungeeignet. Im Außenbereich lassen sich jedoch verschiedene Anwendungsbereiche finden.

- Die getesteten Fensterprofile aus thermisch behandeltem Buchenholz erzielten gute Ergebnisse nach einer natürlichen Bewitterung. Durch das geringere Schwinden und Quellen des thermisch behandelten Holzes, ergaben sich nur geringe Delaminierungserscheinungen bei den Fensterecken. Für die praktische Anwendung von thermisch behandelten Fensterprofilen muss jedoch zuerst die Geruchsemisionen des vergüteten Holzes reduziert werden, was noch weiter Untersuch benötigt. Ein Einsatzgebiet für thermisch behandelte Profile ist zum Beispiel in den Bereichen des Dach- und Wandbaus zu finden. Dort könnten sie im Dachaufbau als Konterlattungen oder im Wandaufbau als Lattung hinter der Aussenschalung eingesetzt werden.
- Durch die gute Formstabilität und die geringe Quellung der geprüften Dreischichtplatten, wären diese für den Einsatz in Wandelementen hervorragend geeignet. Durch das Einbringen von unbehandeltem Holz in den Deckschichten und thermisch behandeltem Holz in der Mittelschicht einer Dreischichtplatte, könnte eine statisch tragfähige und sehr formstabile Platte entstehen. Die Platten könnten als Versteifung zum Beispiel beim Wandsystemen in der Abbildung 44 als Austausch der Holzwerkstoffplatte verwendet werden. Hier ist jedoch noch zu beachten, dass die Platten nicht als Innenbeplankung verwendet werden, sondern im äusseren Bereich der Wand.



Abbildung 44: Wandaufbau einer Außenwand. Einsatzmöglichkeit von Dreischichtplatten aus thermisch behandelte Buchenholz des mittleren Stammabschnittes.

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungen

Abbildung 1: Kriterien zur Bestimmung der Qualitätsklasse von Buchenrundholz	4
Abbildung 2: Aufteilung der entstehenden Spannungen im Holz und in Holzwerkstoffen.	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung im Holz bei der Trocknung (nach Hoadley [17]).	7
Abbildung 4: Formänderung von asymmetrischen beschichteten Spannplattenstreifen in Abhängigkeit vom Klima (nach Böhme [8]).	7
Abbildung 5: Rissbildung in Rotbuche durch Eigenspannungen (Foto: Uni Freiburg)	9
Abbildung 6: REM-Aufnahmen eines thermisch behandelten Buchenholzquerschnittes. Die roten Pfeile bezeichnen Risse und die gelben Pfeile markieren Ablösungen der Zellen im Bereich der Mittellamelle (nach OELHAFEN [26]).....	10
Abbildung 7: Verformung von Holz nach Freischneiden in Schichten (links) (Aussenschichten unter Zug-, Innenschichten unter Druckspannungen) sowie Vorrichtung zum Freischneiden der Spannungen (rechts)	10
Abbildung 8: Schnittaufweitungsverfahren am Beispiel einer Stammscheibe.....	12
Abbildung 9: Schematische Darstellung zur Bestimmung von Trocknungsspannungen mittels Biegemoment-Methode	12
Abbildung 10: Die vier Abbildungen zeigen die neuen Anwendungsbereiche von thermisch behandeltem Holz: (von links nach rechts) im Aussenbereich bei Gartenmöbel; als Bodenbelag bei einem Swimmingpool; als Parkettboden im Badezimmer; als Lavabomöbel.....	14
Abbildung 11: Im Freilandversuch bewittertes Thermoholz (Fichte) der Fa. BALZ HOLZ AG [6] aus Langnau im Emmental. Die Bewitterung dauerte 230 Tage von Anfangs April bis Ende November 2003. Oben links: Fichte unbehandelt, nach 230 Tagen Bewitterung; unten rechts: Fichte thermisch behandelt, nach 230 Tagen Bewitterung. Der Bewitterungsversuch wurde von BÄCHLE [3] durchgeführt.	17
Abbildung 12: Die vier Phasen des Plato Veredelungsprozesses für Thermoholz	20
Abbildung 13: Heiss-Luft-Thermokammer der Firma Mühlböck	21
Abbildung 14: Der Autoklav der Fa. BALZ HOLZ AG [5] in Langnau im Emmental wird für die Herstellung von künstlichem Altholz (thermisch behandeltes Holz) verwendet. Die thermische Behandlung geschieht in einer Intergasatmosphäre aus Stickstoff unter Druck und bei einer Temperatur zwischen 150-200°C über mehrere Stunden.....	22
Abbildung 15: Künstliches Altholz (thermisch behandeltes Holz) wird häufig von Architekten und Bauherren im hochwertigen Innenausbau genutzt. Hauptsächlich wird thermisch behandeltes Holz in vom Tourismus geprägten Alpenregionen eingesetzt.	22
Abbildung 16: Zschokke Laborpresse 4000 kN mit beheizten Pressplatten.....	28

Abbildung 17: Universalprüfmaschine Zwick Z100	29
Abbildung 18: Krümmungslehre zur Bestimmung der Verformung von Brettern nach dem Einschnitt	34
Abbildung 19: Einteilung der Brettdicken und Position der Messpunkte	34
Abbildung 20: Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Verformung nach dem Auftrennen von Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes.	35
Abbildung 21: Messuhren der Firma Mitutoyo. Die rechte Messuhr (grüne) misst die Breitenverformung. Die linke (weisse) misst die Dickenverformung der Buchenbretter.	35
Abbildung 22: (a) Geometrie der Zugscherprobe nach DIN 205 und die drei Probenaufbauten (b) unbehandeltes/unbehandeltes Buchenholz; (c) unbehandeltes/thermisch behandeltes (Stufe III); (d) thermisch behandeltes (Stufe III)/thermisch behandeltes (Stufe III).	38
Abbildung 23: Verklebung der Rohlinge zur Herstellung der Fenster	40
Abbildung 24: Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes der ETH Zürich.	43
Abbildung 25: Prüfeinrichtung zur Bestimmung des Plattenverzuges nach der Norm TGL 4413 [32].	45
Abbildung 26: Diffusionsverhinderung über die Schmalfläche der Prüfkörper mittels Kunstharslack.	46
Abbildung 27: Dreibeingestell im Versuchsbehälter, der mit vollständig entsalztem Wasser gefüllt ist.	46
Abbildung 28: Links: Anordnung der Messpunkte (B, D, E, F, G, I) und der Dreipunktauflagen (A, C, H). Rechts: Messrahmen mit den Messuhren und den drei Auflagepunkten (vorne links A; vorne rechts B; hinten mittig H). Links in der Abbildung ist eine Anschlagsmarkierung zu sehen.	46
Abbildung 29: Induktiver Wegaufnehmer mit Befestigung und der M6 Schraube, die als Messanschlag dient.....	47
Abbildung 30: Randeinfluss einer Dreischichtplatte aus unbehandeltem Buchenholz.	47
Abbildung 31: Messapparatur für die Messung der freien Quellung.....	48
Abbildung 32: Quellkraftprüfvorrichtung	49
Abbildung 33: Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Gleitreibungskoeffizienten von Dreischichtplatten aus unbehandelten und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mit den thermischen Behandlungsstufen II und III.....	50
Abbildung 34: Schematische Darstellung zum Aufschneiden der Prüfkörperplatten zu Streifen	52
Abbildung 35: Linearmessgerät der Firma Mitutoyo zur Bestimmung der Längenänderung der aufgetrennten Plattenschichten.	53
Abbildung 36: Schematische Darstellung des Auftrennens der einzelnen Schichten einer Dreischichtplatte.....	53

Abbildung 37: Ultraschallgerät Ultrasonic Tester BPV der Firma Steinkamp zur Ermittlung des E-Moduls.....	54
Abbildung 38: Links: Geometrie der Zugscherprobe nach DIN 205 [13]. Rechts: Probeaufbauten; (a) unbehandeltes / unbehandeltes Buchenholz; (b) behandeltes Stufe II Buchenholz / behandeltes Stufe II Buchenholz; (c) behandeltes Stufe III / behandeltes Stufe III Buchenholz; (d) unbehandeltes / behandeltes Stufe II Buchenholz; (e) unbehandeltes / behandeltes Stufe III Buchenholz; (f) behandeltes Stufe II Buchenholz / behandeltes Stufe III Buchenholz;	55
Abbildung 39: Die Abbildungen zeigen Fensterecken nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Dabei sind die obere Fensterecken aus unbehandeltem Buchenholz und die unteren aus thermisch behandeltem Buchenholz mit der Behandlungsstufe III. Beide Fensterecken bestehen aus Buchenholz des mittlern Stammabschnittes. Die vier linken Abbildungen zeigen die bewitterten Flächen der Fensterecken mit der Fugenbildung des Konterprofils. Die vier Abbildungen auf der rechten Seite zeigen die Verbindungen der Fenstervrise vor und nach der natürlichen Bewitterung.....	65
Abbildung 40: Delaminierung einer Lamelle eines Fensterprofils aus unbehandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Das Fensterprofil wurde mit einem 1-K PUR Klebstoff verklebt (Sicht auf die Stirnseite des Fensterprofils).....	66
Abbildung 41: Verformung des Fensterprofils (II-I-II) aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II) des mittleren Stammabschnittes, nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung.....	66
Abbildung 42: Die Abbildungen zeigen versiegelte Fensterecken nach einer 52-tägigen natürlichen Bewitterung. Dabei sind die obere Fensterecke aus unbehandeltem Buchenholz und die untere aus thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III. Beide Fensterecken bestehen aus Buchenholz des mittlern Stammabschnittes und sind mit einem Decklack auf Wasserbasis mit einem Bindemittel aus speziellem Acrylpolymeren versiegelt. Die vier linken Abbildungen zeigen die bewitterten Flächen der Fensterecken mit der Fugenbildung des Konterprofils. Die vier Abbildungen auf der rechten Seite zeigen die Verbindungen der Fensterfriese vor und nach der natürlichen Bewitterung.	67
Abbildung 43: Ausfall von Zugscherproben durch Bruch bei Einschnitt in der thermisch behandelten Schicht des Buchenholzes.	86
Abbildung 44: Wandaufbau einer Aussenwand. Einsatzmöglichkeit von Dreischichtplatten aus thermisch behandelte Buchenholz des mittleren Stammabschnittes.	89
Abbildung 45: Grafische Darstellung eines Ausreissers.....	100
Abbildung 46: Chemische Struktur von Polyvinilacetat	104
Abbildung 47: Zellulosekette	106

7.2 Diagramme

- Diagramm 1: Verlauf der Holzfeuchtigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei steht die Bezeichnung Buche = unbehandelt, Buche 2 = Behandlungsstufe II und Buche 3 = Behandlungsstufe III. 15
- Diagramm 2: Änderung der Quellung nach einer thermischen Behandlung des Holzes nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung Buche = unbehandelt, Buche 2 = Behandlungsstufe II und Buche 3 = Behandlungsstufe III. 16
- Diagramm 3: Verformungen der Bretter beim Einschnitt von Buchenbrettern aus dem mittleren Stammabschnitt. Der Stamm wurde in zwei Seiten unterteilt, in ein rote und eine blaue. Bei der roten Stammseite war das dünne Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dicke im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünne Brett im Stammzentrum und das dicke an der Peripherie des Stammes. Im linken Diagramm sind die Spannungen in der Breite des Brettes zu sehen und im rechten Diagramm die Spannungen in der Dicke. 57
- Diagramm 4: Verformungen in Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach ihrer Auftrennung. Der Stamm wurde dabei in zwei Seiten unterteilt, in ein rote und eine blaue. Bei der roten Stammseite war das dünne Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dicke im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünne Brett im Stammzentrum und das dicke an der Peripherie des Stammes. 58
- Diagramm 5: Verformungen in Buchenbrettern des mittleren Stammabschnittes nach einer Quellung im Feuchtklima. Der Stamm wurde in zwei Seiten unterteilt, in ein rot und eine blau. Bei der roten Stammseite war das dünne Brett an der Peripherie des Stammes positioniert und das dicke im Stammzentrum. Bei der blauen Seite befanden sich das dünne Brett im Stammzentrum und das dicke an der Peripherie des Stammes. Das obere Diagramm stellt die Verformung in Abhängigkeit des abnehmenden Querschnittes der Bretter dar. Das untere Diagramm zeigt die Verformung in Abhängigkeit der Lage des Brettes im Stamm. 59
- Diagramm 6: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III nach einem Verklebeklima von 20°C/35% und den Prüfklimaten von 20°C/35%, 20°C/65% und 20°C/85%. 62
- Diagramm 7: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz der Behandlungsstufe III nach einem Verklebeklima von 20°C/65% und den Prüfklimaten von 20°C/35%, 20°C/65% und 20°C/85%. 63
- Diagramm 8: Zeitlicher Verlauf des Plattenverzuges von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt in einem Differenzklima von 20°C/65% zu 20°C/100%. 69
- Diagramm 9: Flächendiagramme des Plattenverzuges von Dreischichtplatten aus unbehandeltem Buchenholz (oben) und unbehandelten Buchenholz als Mittelschicht und thermisch behandeltem Buchenholz der Stufe III als Deckschicht (unten). Dabei herrschte auf der Oberseite der Platte ein Klima von 20°C/65% und auf der Unterseite ein Klima von 20°C/100%. 70

Diagramm 10: Zeitlicher Verlauf der relativen freien Quellung von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt in allen drei Plattenebenen. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichen die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%..... 73

Diagramm 11: Zeitlicher Verlauf der relativen Quellung parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%. 74

Diagramm 12: Zeitlicher Verlauf des Quelldruckes nach einem Klimawechsel von 20°C/35% zu 20°C/85%. Es wurden die Quelldrücke parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt bestimmt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%. 77

Diagramm 13: Quelldruck parallel und senkrecht zur Faserrichtung der Deckschicht in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%. 78

Diagramm 14: Quelldruck parallel und senkrecht zur Faserrichtung der Deckschicht in Abhängigkeit der relativen freien Quellung bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Dabei wurden die Platten in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche

Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.....	79
Diagramm 15: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe Plattenverzug. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen)	81
Diagramm 16: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe freie Quellung. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen)	82
Diagramm 17: Eigenspannung der Deckschichten und der Mittelschichten bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach der Versuchsreihe behinderte Quellung. (positive Werte = Zugspannungen; negative Werte = Druckspannungen).....	83
Diagramm 18: Klebstofffestigkeit von unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt nach unterschiedlicher Dauer im Wechselklima.	86

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Abnahme der Härte von industriell hergestelltem thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung unb.=unbehandelt, Stufe 2=Behandlungsstufe II und Stufe 3=Behandlungsstufe III. Index 0=Mittelwert und s=Standardabweichnug.	17
Tabelle 2: Abnahme der Brinell-Härte von industriell hergestelltem thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufe II und III) der Firma Balz nach BÄCHLE [4]. Dabei ist die Bezeichnung unb.=unbehandelt, Stufe 2=Behandlungsstufe II und Stufe 3=Behandlungsstufe III. Index 0=Mittelwert und s=Standardabweichnug.	18
Tabelle 3: Übersicht der Versuchsreihen mit ihren Prüfungen oder Verfahren.....	25
Tabelle 4: Variablen, Messgrößen und Einheiten der Versuchsreihen	26
Tabelle 5: Abkürzungen der verwendeten Behandlungsstufen von Buchenholz.....	27
Tabelle 6: Nummerierungssystem der verwendeten Fensterprofile.	30
Tabelle 7: Nummerierungssystem der verwendeten Dreischichtplatten.	31
Tabelle 8: Nummerierungssystem der verwendeten Zugscherproben.....	31
Tabelle 9: Abkürzungen der Klimate für die Probennummerierung und im Text	32
Tabelle 10: Abkürzungen der eingesetzten Klebstoffe	32
Tabelle 11: Verarbeitungsmerkmale der verwendeten Klebstoffe	36
Tabelle 12: Parameter bei der Verklebung der Zugscherproben.....	37
Tabelle 13: Schichtaufbau der hergestellten Fensterprofile. Die Lamellen der Profile wurden mit Purbond HB 110 der Firma Purbond, ein faserverstärkter 1-K PUR Klebstoff (Einkomponenten Polyurethan), verklebt.....	39
Tabelle 14: Schichtaufbau der hergestellten Dreischichtplatten. Die Einzelschichten der Platte wurden mit Purbond HB 110 der Firma Purbond, ein faserverstärkter 1-K PUR Klebstoff (Einomponenten Polyurethan Klebstoff), verklebt.....	41
Tabelle 15: Bewitterungszyklus für die künstliche Bewitterung von versiegelten und unversiegelten Fensterecken. Die Fensterprofile besassen unterschiedlichen Aufbau aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz des mittleren Stammabschnittes mit den Behandlungsstufen II und III.	44
Tabelle 16: Programm für das Wechselklima der Versuchsreihe Delaminierung.	56
Tabelle 17: Maximale relative Quellung von Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) des mittleren Stammabschnittes in allen drei Plattenebenen. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Dabei hatten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung der freien Quellung erfolgte im Klima 20°C/85%. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchte: Platte I-I-I 14.6%, II-II-II 8.2%, III-III-III 7.9%, II-I-II 9.2% und III-I-III 8.9%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 7.7% bei der Platte I-I-I, 3% bei II-II-II, 3.2% bei III-III-III, 3.5% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%.	72

Tabelle 18: Maximaler Quelldruck nach der Beendigung des Versuches. Quelldruck parallel und senkrecht zur Faser der Deckschicht bei Dreischichtplatten aus unbehandeltem und thermisch behandeltem Buchenholz (Behandlungsstufen II und III) aus dem mittleren Stammabschnitt. Die Platten wurden in einem Klima von 20°C/35% verklebt. Sie erhielten so eine durchschnittliche Holzfeuchte von: Platte I-I-I 6.9%, II-II-II 5.2%, III-III-III 4.7%, II-I-II 5.7% und III-I-III 5.4%. Die Bestimmung des Quelldruckes erfolgte im Klima 20°C/85%.. Dabei erreichten die Platten folgende durchschnittliche Holzfeuchten: Platte I-I-I 15.3%, II-II-II 10%, III-III-III 9.1%, II-I-II 12.6% und III-I-III 9.1%. Dies ergibt eine Feuchteänderung von 8.4% bei der Platte I-I-I, 4.8% bei II-II-II, 4.4% bei III-III-III, 6.9% bei II-I-II und bei III-I-III 3.7%. 76

7.4 Formeln

Formel 1: Spannung	5
Formel 2: Hooksche Gesetz der Spannung	11
Formel 3: Dehnung	11
Formel 4: Biegemoment	13
Formel 5: Spannungsverteilung	13
Formel 6: Berechnung der Dehnung	13
Formel 7: Verformung	34
Formel 8: Klebstofffestigkeit	37
Formel 9: relative freie Quellung	48
Formel 10: Gleitreibungskoeffizient	50
Formel 11: Quellkraft	51
Formel 12: Quelldruck	51
Formel 13: Dehnung	53
Formel 14: Elastizitätsmodul	54
Formel 15: Spannung	54
Formel 16: Dichte	100
Formel 17: Holzfeuchtigkeit	101
Formel 18: Maximum	102
Formel 19: Minimum	102
Formel 20: Mittelwert	103
Formel 21: lineares Quellmass	105
Formel 22: Spannweite	105
Formel 23: Standardabweichung	105
Formel 24: Variationskoeffizient	106

7.5 Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen und Symbolen

Symbol:	Begriff:	Einheit:
x	Mittelwert	-
ρ_0	Dardichte	g/cm^3
ρ_u	Rohdichte wobei $u = \text{Holzfeuchtigkeit}$	g/cm^3
$^{\circ}\text{C}$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
b	Breite	mm
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit eine Welle	m/s
d	Dicke (Schichtdicke)	mm
E	Elastizitätsmodul (E-Modul)	N/mm^2
f	Durchbiegung	mm
F	Kraft	N
F_R	Gleitreibungskraft	N
F_{\max}	maximale Kraft	N
Kap.	Kapitel	
l	Länge	mm
l_0	Anfangslänge	mm
l_n	End- oder n-länge	mm
m_0	Darrmasse	g
max.	grösster gemessener Wert	-
med.	Median- oder Zentralwert	-
min.	kleinster gemessener Wert	-
m_u	Masse feucht wobei $u=\text{Holzfeuchte}$	g
n	Anzahl Proben einer Serie	Stück
r	Radius	mm
R	Spannweite	-
r.L.	relative Luftfeuchtigkeit	%
F_N	Normalkraft	N
s	Standardabweichung	-
t	Zeit, Zeitspanne, Dauer	s
u	Holzfeuchtigkeit	%
v	Variationskoeffizient	%
V	Volumen, Rauminhalt	mm^3
F_Q	Quellkraft	N
F_M	Gemessene Kraft (Quellkraft)	
ϵ	Dehnung, relative Längenänderung	-
p_0	Quelldruck	N/mm^2
μ	Gleitreibungskoeffizient	-
σ	Normalspannung, Zug- oder Druckspannung	N/mm^2
τ	Festigkeit	N/mm^2
Δl	Längenänderung	mm
M	Biegemoment	N/mm^2
Q	Relative freie Quellung	%
HWS	Holzwerkstoff	-
MDF	Mitteldichte Faserplatte	-
HDF	Hochdichte Faserplatte	-
BSH	Brettschichtholz	-

Indizes

=	parallel zur Faserrichtung
\perp	quer zur Faserrichtung
0	Anfangswert
max	Maximum

7.6 Glossar

Anisotropie	Anisotropie bezeichnet die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft. Anisotropie ist das Gegenteil von Isotropie
Ausreisser	<p>Von einem Ausreisser spricht man in der Statistik, wenn ein Messwert nicht den Erwartungen entspricht die zu dieser Messreihe gehört. Die "Erwartung" wird meistens als Streubereich um den Erwartungswert herum definiert, in dem die meisten aller Messwerte zu liegen kommen. Werte ausserhalb dieses Erwartungsintervalls werden als Ausreisser bezeichnet.</p> <p>Faustregel für die Praxis ist: Werte ausserhalb der zwei- bis dreifachen Standardabweichung nennt man Ausreisser.</p> <p>Ausreisser können ein Hinweis auf grobe Fehler der Datenerfassung sein</p>

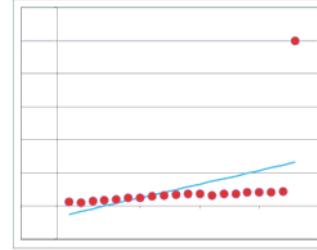


Abbildung 45: Grafische Darstellung eines Ausreissers

Autoklav	Ein Autoklav ist ein gasdicht verschliessbarer Druckbehälter. Vom Grundprinzip her ähnelt ein Autoklav einem Schnellkochtopf. Dabei kann in einem Autoklav Druck, Temperatur und Umgebungsatmosphäre künstlich variiert werden.
Darrtrocken d_{tr}	Als Darrtrocken bezeichnet man absolut trockenes Holz mit einer Holzfeuchte von 0 %.

Dichte [g/cm ³ ; kg/m ³]	Die Dichte ist das Verhältnis der Masse (m) eines Körpers zu seinem Volumen (V).
--	--

Formel 16: Dichte

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Enzyme	Ein Enzym ist ein Protein, welches eine chemische Reaktion katalysiert. Enzyme spielen eine tragende Rolle im Stoffwechsel aller lebenden Organismen. Fast sämtliche biochemische Reaktionen, von der Verdauung bis hin zum Kopieren der Erbinformation, werden von Enzymen katalysiert und gesteuert.
Geschlossene Wartezeit	Unter Geschlossener Wartezeit versteht man sowohl nach DIN 16920 als auch nach EN 923:1996 die Zeit nach dem Zusammenlegen der Fügeteile bis zum erreichen des erforderlichen Pressdruckes. Die Geschlossene Wartezeit ist Bestandteil der Offenen Zeit.
Gleichgewichtsfeuchtigkeit	Die Gleichgewichtsfeuchte ist als eine Bewegung der Feuchtigkeit vom Material zur Umgebung und umgekehrt zu verstehen. Diese Bewegung vollzieht sich solange, bis der Wasserdampfpartialdruck im Material und in der Umgebung gleich gross ist. Wenn dieser Zustand erreicht ist, kann der Feuchtigkeitswert eines Materials als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet werden.
Holzfeuchtigkeit u [%]	Als Holzfeuchte oder Holzfeuchtigkeit bezeichnet man den Anteil an Wasser im Holz in Bezug auf die Darrmasse des Holzes. Die Holzfeuchte wird in % angegeben.
Formel 17: Holzfeuchtigkeit	
$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \bullet 100[\%]$	
Homogenität	Homogenität bezeichnet die Gleichheit einer Eigenschaft über die Gesamtheit eines Systems oder anders gesagt die Gleichartigkeit von Objekten, Erscheinungen oder Elementen eines Systems. Homogenität ist das Gegenteil von Inhomogenität.
Hygroskopie	Die Hygroskopie bezeichnet die Eigenschaft Feuchtigkeit aus der Umgebung, meist in Form von Wasserdampf, aus der Luftfeuchtigkeit zu binden.

Inert (Inertgas)	Als inert bezeichnet man Substanzen, die bei einer chemischen Reaktion mit den anwesenden Reaktionspartnern nicht oder nur in verschwindend geringem Masse reagiert. Chemisch inerte Substanzen sind z. B. Edelgase, Stickstoff und viele Edelmetalle. Sie werden bei chemischen Reaktionen als Lösungsmittel oder Trägergase eingesetzt. Inertgase sind somit Gase, die sehr reaktionsträge sind und sich nur an wenigen chemischen Reaktionen beteiligen. Inertgase finden Verwendung, um bei bestimmten chemischen Reaktionen andere Gase, wie z.B. Luft, fernzuhalten. In der Regel dienen Inertgase dazu, den Sauerstoffanteil zu reduzieren oder ganz zu ersetzen, um unerwünschte Nebenreaktionen oder gefährliche Zustände zu vermeiden.
Lignin	Lignin ist ein phenolisches Makromolekül aus verschiedenen Monomerbausteinen. Er ist ein fester, farbloser Stoff. Lignin lagert sich in die Zellwand ein und bewirkt dort die Verholzung der Zelle (Lignifizierung). Lignin ist neben der Zellulose der häufigste organische Stoff der Erde.
Maximum <i>max.</i>	Das Maximum ist der grösste Wert aus einer vorgegebenen Datenreihe.
	Formel 18: Maximum Für reelle Zahlen a, b gilt: $\max(a, b) = \frac{a+b}{2} + \frac{ a-b }{2}$
Minimum <i>min.</i>	Das Minimum ist der kleinste Wert aus einer vorgegebenen Datenreihe.
	Formel 19: Minimum Für reelle Zahlen a, b gilt: $\min(a, b) = \frac{a+b}{2} - \frac{ a-b }{2}$

Mittelwert x	Das arithmetische Mittel, auch Durchschnitt genannt, ist der häufigste benutzte Mittelwert und wird deshalb auch als Standardmittelwert bezeichnet. Der Mittelwert ist der Quotient aus der Summe aller Einzelwerte (x_i) dividiert durch die Anzahl (n) der Messwerte.
	Formel 20: Mittelwert
	$\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$
Offene Zeit	Die Offene Zeit ist die Zeit vom Auftrag des Klebstoffes bis zum Einsetzen des Pressdrucks. Sie umfasst damit sowohl die Offene Wartezeit als auch die Geschlossene Wartezeit und ist abhängig von der Auftragsstärke, Saugfähigkeit der Fügeteile, Raum- und Fügeteiltemperatur sowie der Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit. Die Richtzeiten werden in den Datenblättern zu den einzelnen Produkten angegeben.
Polyaddition	Bei der Polyaddition verbinden sich niedrigmolekularen Monomere durch die Verschiebung von Atomen und Elektropaaren zu Makromoleküle (Polymere/Copolymere). Dabei entstehen keine Abspaltprodukte wie bei der Polykondensation.
Polykondensation	Eine Polykondensation ist eine Kondensationsreaktion, bei den niedrigmolekularen Monomerender niedrigmolekulare Monomere unter Abspaltung einfach gebauter Moleküle, meist Wasser, Makromoleküle (Polymere/Copolymere) bilden. Diese werden auch Polykondensate genannt.
Polymer	Ein Polymer ist eine lange Molekülkette, bestehend aus miteinander verbundenen Monomeren.
Polymerisation	Die Polymerisation lässt Monomere unter Auflösung ihrer Mehrfachbindung zu Polymeren reagieren ohne Abgabe eines Spaltproduktes an die Umwelt.
Prepolymer	Ein Prepolymer ist ein noch nicht ganz polymerisiertes Polymer. Es ist ein Zwischenprodukt vom Monomer zu einem Polymer.

PUR
(Polyurethan)

Polyurethane sind Kunststoffe oder Kunsthärze, die in der Holzindustrie als Klebstoffe eingesetzt werden. Charakteristisch für Polyurethane sind seine Urethan-Gruppen ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$). Polyurethane können, je nach Herstellung hart und spröde, aber auch weich und elastisch sein. In aufgeschäumter Form ist PUR als Schaumgummi oder als Bauschaum bekannt.

Polyurethan ist ein Polymer und wird durch eine Polyadditionreaktion von Diisocyanat mit Dialkohol synthetisiert.

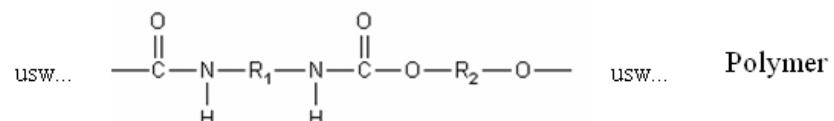


Abbildung 46: Polyurethan-Polymer

Zur Aushärtung benötigt Polyurethan Wasser, das in einer Nebenreaktion mit einigen Cyanatmolekülen reagiert, und dabei Kohlenstoffdioxid freisetzt. Dabei schäumt der noch weiche Klebstoff auf.



Abbildung 47: Aushärtungsreaktion von Polyurethan

PVAc
(Polyvinilacetat)

Polyvinylacetate sind thermoplastische Polymere, die durch eine Polymerisationsreaktion von Essigsäurevinylester gewonnen werden. Sie sind amorphe, geruch- und geschmacklose Produkte mit hoher Licht- u. Witterungsbeständigkeit und unlöslich in Wasser. Eingesetzt werden sie als Klebstoffkomponenten, Lackrohstoffe, Verpackungsfolien.

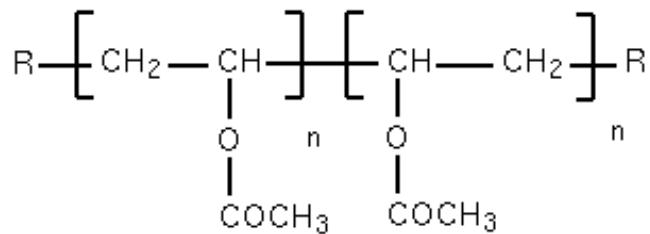


Abbildung 48: Chemische Struktur von Polyvinilacetat

UF
(Harnstoff-Formaldehyd)

Harnstoffharze sind Kondensationsprodukte aus Harnstoff und Formaldehyd. Harnstoff-Formaldehyd-Harze werden kurz als UF-Harze bezeichnet. UF-Klebstoffe binden durch Hitze ab.

Kovalent	Eine kovalente Bindung ist eine Atombindung. Auch Elektronenpaarbindung genannt. Kovalente Bindungen solchen bei chemischen Verbindungen für den festen Zusammenhalt der Atomen sorgen.
Quellmass α	Unter dem Quellmass versteht man die Massänderung ($l_2 - l_1$) bei einer Zunahme des Holzfeuchtigkeitsgehaltes, bezogen aus das Mass (l_{drt}) im darrtrockenen Zustand des Holzes. Formel 21: lineares Quellmass
	$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_{drt}} \cdot 100$
relative Luftfeuchtigkeit $r, L, [\%]$	Die relative Luftfeuchtigkeit ist das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Wasserdampfdruck und dem Sättigungswasserdampfdruck.
Sorption	Sorption ist der Oberbegriff für die Anreicherung eines Stoffes in einem Phasengrenzgebiet, die über die Konzentrationen innerhalb der Phasen hinausgeht. Sorption findet vorrangig an den Grenzflächen zwischen flüssiger und fester sowie zwischen gasförmiger und fester Phase statt, kommt aber auch an Grenzflächen zwischen flüssiger und Gasphase vor.
Spannweite R	Die Spannweite ist die Differenz zwischen dem Grösstwert und dem Kleinstwert einer Datenreihe. Formel 22: Spannweite
	$R = x_{\max} - x_{\min}$
Standardabweichung s	Die Standardabweichung ist ein Mass für die Streuung der Einzelwerte (x_i) um ihren Mittelwert (\bar{x}). Sie ist für eine Wert (x_i) definiert als die positive Quadratwurzel aus deren Varianz (v) und wird als s notiert. Formel 23: Standardabweichung

$$s = \sqrt{v^2}$$

Zellulose

Die Zellulose ist der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden und damit die häufigste organische Verbindung der Erde. Holz besitzt den grössten Massenanteil an Zellulose. Zellulose ist ein unverzweigtes Polysaccharid, das aus aneinander gereihten β -Glucose-Molekülen besteht. Je nach Herkunft werden Polymerisationsgrade von 1'000 bis 14'000 angegeben. Aufgrund der Kettenstruktur der Zellulose bildet sich eine kristalline Struktur. Die Zelluloseketten sind auch etwas gefaltet, so dass sich intramolekulare Wasserstoffbrücken bilden können. Somit ist die Zellulose sehr hochmolekular und in Wasser und den meisten organischen Lösungsmitteln unlöslich.

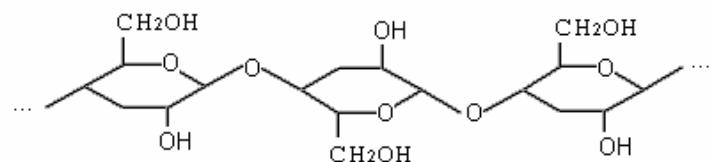


Abbildung 47: Zellulosekette

Variationskoeffizient

Der Variationskoeffizient ist definiert als die Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert. Das Problem an der Varianz ist, dass ein grosser Mittelwert einer Prüfserie im Allgemeinen auch eine grössere Varianz aufweist als eine Prüfserie mit einem kleinen Mittelwert. Der Variationskoeffizient stellt hingegen eine Art Normierung der Varianz dar. In der Regel wird der Variationskoeffizient in Prozent angegeben.

Formel 24: Variationskoeffizient

$$V = \frac{s}{x} \bullet 100\%$$

7.7 Schlagwortverzeichnis

A

Anisotropie	100
Ausreisser	100
Autoklav	100

B

Buchenholz	
<i>Mittlerer Stammabschnitt</i>	4
<i>Problematik</i>	3

D

Darrtrocken	100
Dichte	100

E

Enzyme	101
--------------	-----

G

Geschlossene Wartezeit	101
Gleichgewichtsfeuchtigkeit	101

H

Harnstoff-Formaldehyd	104
Hauptversuche	
<i>Bewitterung</i>	43
<i>Delaminierungseffekt</i>	55
<i>Eigenspannungen</i>	52
<i>Freie Quellung</i>	47
<i>Plattenverzug</i>	45
Herstellung	
<i>Dreischichtplatten</i>	41
<i>Fensterprofile</i>	39
Holzfeuchtigkeit	101
Holzwerkstoffe	
<i>Definition</i>	3
Homogenität	101
Hygroskopie	101

I

Inert (Inertgas)	102
------------------------	-----

K

Kovalent	105
----------------	-----

L

Lignin	102
--------------	-----

M

Maschinen	
<i>Presse</i>	28
<i>Universalprüfmaschine</i>	29
Material	
<i>Holz</i>	27
Maximum	102
Minimum	102
Mittelwert	103

N

Nassklebzeit	103
Nummerierungssystem	
<i>Dreischichtplatten</i>	31
<i>Fensterprofile</i>	30
<i>Klebstoffe</i>	32
<i>Klima</i>	32

P

Plato-Verfahren	23
Polyaddition	103
Polykondensation	103
Polymer	103
Polymerisation	103
Polyurethan	104
Polyvinilacetat	104
Prepolymer	103
Produzenten von Thermoholz	
<i>Balz Holz AG</i>	22
<i>Stellac Oy</i>	23
<i>Thermoholz austria</i>	23
<i>ThermoWood</i>	23
PUR	104
PVAc	104

Q

Quellmass	105
Quellung	49

R

relative Luftfeuchtigkeit	105
---------------------------------	-----

S

Sorption	105
Spannungen	
<i>Asymmetrische Feuchteeinwirkungen</i>	7
<i>Asymmetrische Oberflächenbeschichtung</i>	7
<i>Asymmetrischer Schichtaufbau</i>	8
<i>Ausbau</i>	10
<i>Definition</i>	5
<i>Entstehung und Auswirkungen</i>	5
<i>Frostrisse</i>	6

<i>Reaktionsholz</i>	8	<i>Physikalische Eigenschaften</i>	15
<i>Schnee- und Windlasten</i>	6	<i>Produktionsverfahren</i>	19
<i>Saugspannungen</i>	6	<i>Quellung</i>	16
<i>Trocknungsspannungen</i>	6	<i>Rohdichte</i>	17
<i>Wachstumsspannungen</i>	8	<i>Verklebung</i>	18
Spannungsmessung		<i>Wetterbeständigkeit</i>	17
<i>Biegemoment-Methode</i>	12		
<i>Bohrmethode</i>	11		
<i>FEM-Methode</i>	13		
<i>Freischnitt</i>	10		
<i>Schnittaufweitungsmethode</i>	11		
<i>Spannweite</i>	105		
<i>Standardabweichung</i>	105		
T			
Thermoholz			
<i>Bearbeitungeigenschaften</i>	18	<i>Variationskoeffizient</i>	106
<i>Biologische Haltbarkeit</i>	16	<i>Vorversuche</i>	
<i>Brinell-Härte</i>	18	<i>Klebfugenfestigkeit</i>	36
<i>Festigkeit</i>	18	<i>Spannungen im Buchenholz</i>	33
<i>Holzfeuchtigkeit</i>	15		
<i>Industrie und Handel</i>	21	Z	
<i>Oberflächenbehandlung</i>	19	<i>Zellulose</i>	106

UF 104

U**V**

<i>Variationskoeffizient</i>	106
<i>Vorversuche</i>	
<i>Klebfugenfestigkeit</i>	36
<i>Spannungen im Buchenholz</i>	33

Z

7.8 Literaturverzeichnis

- [1] **R. Archer**, Growth stresses and strains in trees, Springer, Berlin, 1986.
- [2] **Austria**, Firma Thermoholz Austria, <http://www.thermoholz.at>, Stand: 9.3.2006.
- [3] **F. Bächle**, Witterungsbeständigkeit von öl-thermisch behandeltem Holz, Int. Bericht ETHZ/IBWK-HP Nr. 19, Zürich, 2004.
- [4] **F. Bächle, A. Schmutz**, Industrielle Untersuchungen zur Optimierung der Eigenschaften von thermisch vergütetem Holz, insbesondere Laubholz, Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 36, Zürich, 2006.
- [5] **Balzholz**, Fa. Balz Holz AG, <http://www.balz-holz.ch>, Stand: 12.3.2006.
- [6] **Balzholz**, Fa. Balz Holz AG, <http://www.balz-holz.ch>, Stand: 12.3.2006.
- [7] **T. Beimgraben**, Auftreten von Wachstumsspannungen im Stammholz der Buche und Möglichkeiten zu deren Verminderung, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2002.
- [8] **P. Böhme**, Industrielle Oberflächengestaltung von plattenförmigen Werkstoffen aus Holz, Fachbuch, Leipzig, 1980.
- [9] **Bundesamt_für_Umwelt_BAFU**, BUWAL warnt vor krebsverursachenden Stoffen in imprägnierten Eisenbahnschwellen, Alte Eisenbahnschwellen gehören nicht in den Schrebergarten, <http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/php/druckversin.php?/buwal/de/medien/presse>, Stand: 6.5.2006.
- [10] **A. Burmester**, Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung des halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit, Holz als Roh- und Werkstoff (237-243) 1973.
- [11] **A. Burmester**, Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit, BAM-Bericht Nr. 4, Bundesamt für Materialprüfung Berlin, Berlin, 1970.
- [12] **A. Burmester**, Zur Dimensionsstabilisierung von Holz, Holz als Roh- und Werkstoff (333-335) 1975.
- [13] **DIN-EN-205**, Klebstoffe, Juni 2003.
- [14] **DIN-EN-927-6**, Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich, Oktober 2006.
- [15] **DIN-EN-50014**, Klimate und ihre Anwendungen, Juli 1985.
- [16] **C.M. Grossmann**, Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing, Universität Freiburg, Institut für Forstpolitik, Arbeitsbereich Markt und Marketing, Freiburg, 2002
- [17] **R.B. Hoadley**, Holz als Roh- und Werkstoff (Ravensburg) 1990.
- [18] **K. Junghans**, Untersuchungen zu spezifischen Eigenschaftsänderungen bei der thermischen Vergütung von Fichtenholz, Diplomarbeit, 1981.
- [19] **A. Kägi, P. Niemz, D. Mandallaz**, Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologische Parameter auf die Klebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter extremen klimatischen Bedingungen, Holz als Roh- und Werkstoff 2005.
- [20] **A. Koebler**, A new hypothesis as to the cause of shakes and rift cracks in green timber, Journal of Forestry 31 (443-449).

- [21] **F. Kollmann, A. Schneider**, Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich nis 200°C auf sichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften das Holzes., 1964.
- [22] **Mirako**, Firma Mirako, www.thermoholz.at, Stand: 8.5.2006.
- [23] **Mühlböck**, Firma Mühlböck, <http://www.muehlboeck.co.at>, Stand: 8.5.2006.
- [24] **P. Niemz**, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW, Leinfelden-Echterdingen, 1993.
- [25] **P. Niemz, S. Mariani, M. Torres**, Einfluss der thermischen Vorbehandlung des Holzes auf ausgewählte chemische Eigenschaften, bisher unveröffentlicht, 2003.
- [26] **M. Oelhafen**, Untersuchung der Eignung der thermischen Behandlung als Methode zur Farbegalisierung von Holz mit fakultativem Farbkern, Diplomarbeit, Zürich, 2005.
- [27] **M. Patzelt, R. Stingel, A. Teischinger**, Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte HolzeigenschaftenModifiziertes, Lignovisionen - Schriftreihe des Institutes für Holzforschung und des Verbandes Holzwirte Österreich, Österreich, 2002.
- [28] **Plato**, Firma Plaro International BV, <http://www.platowood.nl>, Stand: 12.3.2006.
- [29] **F. Schanack**, Untersuchungen zur hydrothermischen Vergütung von Pinus radiata D. Don, Grosser Belag an der TU Dresden, Valdivia, 2002.
- [30] **A.J. Stamm, I.A. Hansen**, Minimizing wood shrinkage and swelling, Ind. Eng. Chem 1937.
- [31] **Stellac**, Firma Stellac OY, http://www.stellac.fi/German/index_ger.htm, Stand: 13.3.2006.
- [32] **TGL-4413**, Prüfung von Werkstoffen aus Holz, August 1972.
- [33] **Thermoholztag**, 1. Europäischer Thermoholztag in Dresden Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, Dresden, 2003.
- [34] **Thermowood-Verband**, ThermoWood, <http://www.thermowood.fi/index.php?anonymous=thermode>, eingetragene Marke des finnischen Thermowood-Verbandes (Finnish Thermowood Association)Stand: 20.3.2006.
- [35] **A. Tjeerdsma, M. Boostra, A. Pizzi, P. Tekeley, H. Militz**, Characterisation modified wood: molecular reasons for wood, Holz als Roh- und Werkstoff 1998 149-153.
- [36] **R. Trendelenburger, H. Mayer-Wegelin**, Holz als Roh- und Werkstoff (München) 1955.
- [37] **Waldwirtschaft_Verband_Schweiz**, Schweizerische Handelsbräuche für Rundholz, Solothurn, 2000.
- [38] **J. Welling**, Die Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammer trocknung von Schnittholz, Dissertation, Hamburg, 1987.

8 Zwingende Form

8.1 Eidestattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit selbstständig und ohne jegliche Hilfe verfasst habe, nicht andersweitig als Diplomarbeit vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ich habe die Bestimmungen der HSB über Rechte und Pflichten namentlich über die Urheber- und Nutzungsrechte, das Genehmigungsverfahren für Publikationen sowie Sperrfristen, zur Kenntnis genommen.

Ort und Datum:

Unterschrift:

Biel, Mittwoch 14. März 2007

.....

Thomas Schnider

8.2 Note / Abnahmeerklärung

Die vorliegende Arbeit ist als Diplomarbeit an der HSB, Fachbereich Holz entgegengenommen worden:

Gesamt Note der Diplomarbeit :

(zusammengesetzt aus den Teil Noten A-C)

Name erstprüfender Dozierende/r : Unterschrift:

Name zweitprüfender Dozierende/r : Unterschrift:

Name Experte 1 : Unterschrift:

Name Experte 2 : Unterschrift:

Ort und Datum :

8.3 Teil Noten

Note A Fachliche Problemlösung

(unter Berücksichtigung des Schwierigkeitsgrades der Aufgabenstellung)

50 % Fachliches Urteil, Qualität der Ergebnisse (Schlussfolgerungen), Vorgehen, Logistik

.....

Note B Methodische Problembearbeitung

25 % Kreativität, Systematik, Eigeninitiative, Eigenkritik, Bewertung, Einsatz, usw.

.....

Note C Soziale Vermittlung der Ergebnisse

25 % Sprache, Verständlichkeit der Darstellung, Einhalten der Formen, Vortrag (Klarheit, Präsentationsmittel), Abstract als Publikationsmitte

.....

8.4 Schriftliche Beurteilung der Arbeit durch die Prüfer

Ort und Datum: Unterschrift: 1. Dozierende/r

Unterschrift: 2. Dozierende/r

Unterschrift: Experte

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB
CH-2504 Biel-Bienne

Fachbereich Holz
Vertiefungsrichtung:
Produkte Management
PDM

DIPLOMARBEIT

**Eignung mittlerer Stammabschnitte aus
Schweizer Laubholz für neuartige Holzwerkstoffe**

Anhang

von

Thomas Schnider
von Schüpfheim, Kanton Luzern

6170 Schüpfheim, im März 2007
Feldgass 18

Diplomarbeit Nr. F / 4 / D / 506 / 07 / 0

Sperrfrist: 0 Jahre

