

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Acetyliertes Buchen-Furnierschichtholz - Buchenholzprodukt für bewitterte Tragwerke: dauerhaft, formstabil, hochfest

Akronym:

AceBuFu

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

Teilvorhaben 2: Georg-August-Universität Göttingen – Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2220HV049A

Teilvorhaben 2: 2220HV049B

Laufzeit:

01.06.2021 bis 30.06.2024, verlängert bis 31.03.2025

Monat der Erstellung:

07/2025

Projektbeteiligte des Verbundvorhabens:

Teilvorhaben 1 Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau

Univ.-Prof. Dr.- Ing. Jürgen Graf,

Dipl.-Ing. Reiner Klopfer

Teilvorhaben 2 Georg -August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Holger Militz,

Maik Slabohm

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht	1
1. Aufgabenstellung	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse	1
a) Arbeitspakete und Meilensteine	1
b) Zusammenfassung	8
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	9
1. Erzielte Ergebnisse	9
Arbeitspaket 1: Modifikation der Buchenholz Furniere (Accsys / Militz; TV2).....	9
Arbeitspaket 2: Wirkmechanismen der Acetylierung auf die Buchenholzstruktur - Grundlagenforschung).....	10
Arbeitspaket 2.1: Qualitätsbestimmung und Ausbeuteanalyse (Militz; TV2).....	10
Arbeitspaket 2.2: Zugfestigkeit und Schrägfaserigkeit an Buchenholz furnieren (Graf TV1)	12
2. Verwertung.....	40
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	40
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	40
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	40
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	40
e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten.....	40
3. Erkenntnisse von Dritten	40
4. Veröffentlichungen	41
ANHANG	42
Teilvorhaben 1: 2220HV049A Mechanische Kennwerte und Anwendungen	42
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	42
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	42
Arbeitspaket 2.2: Schrägfaserigkeit (Graf).....	42
Arbeitspaket 5.1: Einfluss des Umgebungsklimas.....	42
Arbeitspaket 5.2: Delaminierung und Blockscherprüfungen.....	42
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	44
Teilvorhaben 2: 2220HV049B Verklebung und Fertigungsprozesse	45
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	45
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	45
Arbeitspaket 1: Modifikation der Buchenholz furniere (Accsys / Militz)	45
Arbeitspaket 2.1: Qualitätsbestimmung und Ausbeuteanalyse (Militz).....	45
Arbeitspaket 3: Wirkmechanismen der Verklebung mit der acetylierten Buchenholzoberfläche	45
Arbeitspaket 3.1: Kaltverklebung	45
Arbeitspaket 3.2: Heißverklebung.....	46
Arbeitspaket 4: Herstellung von Buchen furnierschichtholz lamellen (Militz)	46
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	46

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Zielsetzung des Forschungsvorhabens war die effektive Steigerung der stofflichen Substitutionswirkung und der CO₂-Speicherwirkung durch die Verwendung von Holzbauprodukten aus modifiziertem, heimischem Buchenholz für frei der Witterung ausgesetzter Tragwerke. Das erwartete Ergebnis ist die Bereitstellung dauerhafter, formstabiler und hochfester Bauteile. Der Mehrwert liegt, zur Steigerung der Holzbaquote, in der Öffentlichkeitswirksamkeit durch die Erweiterung und Sichtbarkeit von Holzbauprodukten in konstruktiv anspruchsvollen Holztragwerken. Dies fördert die steigende Akzeptanz der Gesellschaft von hochwertig verarbeiteter Holzarchitektur.

Konkretes Ziel war in diesem interdisziplinären Forschungsteam der Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau (RPTU) und der Georg-August-Universität Göttingen (GA) die Entwicklung und Konstruktion von stabförmigen Bauteilen aus acetyliertem Buchen-Furnierschichtholz (englisch: Laminated Veneer Lumber, LVL) für den konstruktiven Holzbau. Als Industriepartner waren die Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG (dehonit) und Accsys Technologies PLC (Niederlande) im Projekt beteiligt.

Grundlagenorientiert sollte die Wirkung der Furnierdicke auf den Acetylierungsprozess und die Wirkung acetylierter Buchenfurniere auf die Klebbarkeit zu Furnierschichtholz-Lamellen und zu Brettschichtholzträgern aus FSH-Lamellen – Flächen- sowie Keilzinkenverklebung – erforscht werden. Anwendungsorientiert sollen sowohl der Fertigungsprozess also auch das Trag- und Verformungsverhalten sowie das Delaminierungsverhalten von acetylierten Buchen-FSH-Bauteilen untersucht werden. Als Ergebnis sollten aufgrund der vorhandenen Dauerhaftigkeit der Bauteile durch das Modifikationsverfahren der Acetylierung biege-, zug- und druckbeanspruchbare Holzbauprodukte aus Buchen-FSH für Brücken- und Turmtragwerke bereitgestellt werden.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Fragestellungen des Forschungsvorhabens wurden in verschiedenen Arbeitspaketen (AP) der beiden Forschungspartner bearbeitet.

Arbeitspaket 1: Modifikation der Buchenholzfurniere

Arbeitspaket 2: Wirkmechanismen der Acetylierung auf die Buchenholzstruktur

Arbeitspaket 3: Wirkmechanismen der Verklebung mit der acetylierten Buchenholzoberfläche

Arbeitspaket 4: Herstellung von Buchenfurnierschichtholzlamellen

Arbeitspaket 5: Herstellung und Untersuchung der Dauerfestigkeit von Buchenfurnierschichtholzträgern

Arbeitspaket 6: Trag- und Verformungsverhalten von Buchenfurnierschichtholz

Arbeitspaket 7: Verbindungstechnik von Bauteilen aus Buchenfurnierschichtholz

Arbeitspaket 8: Anwendungsbereiche acetylierter Buchen-Furnierschichtholzprodukte

Die nativen Buchenfurniere wurden von der Firma dehonit beschafft und bei Accsys in den Niederlanden acetyliert. An den Furnieren wurden Untersuchungen durch die GA und die RPTU in den Arbeitspaketen 1 und 2 durchgeführt. Aus den ersten Ergebnissen wurde eine geeignete Furnierdicke gewählt und das Modifizierungsverfahren angepasst. Auf dieser Basis sind in weiteren Chargen aus den acetylierten Furnieren LVL Platten im Heißklebverfahren bei dehonit hergestellt worden. An den daraus hergestellten Prüfkörpern wurden in den nächsten Arbeitspaketen weitere Prüfungen und Untersuchungen zur Klebbarkeit und den mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Dabei wurden auch vergleichende Versuche zwischen nativem und acetyliertem Buchen LVL gemacht. Für die Prüfungen im Bauteilmaßstab waren aus den LVL Platten größere Prüfkörper herzustellen, die bei der Firma dehonit gefertigt wurden. Die Herstellung und die Versuchsdurchführung der Prüfkörper im Bauteilmaßstab wurde durch ein externes Forschungsvorhaben beim Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) des Landes Rheinland Pfalz finanziert.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1: Selektion/Herstellung von Furnieren unterschiedlicher Furnierdicke unter Einbeziehung des Furnierherstellers (Pollmeier,	06.2021-2025	Mehrere Chargen Buchenfurniere in verschiedenen Breiten und Stärken wurden erfolgreich in Zusammenarbeit mit Deutsche Holzveredelung Schmeing und Accsys Technologies acetyliert und

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
ggf. weitere) und Accsys Technologies (Eignung der Furniere zur Acetylierung: Astigkeit, Rotkern) mit Untersuchungen zum Acetylierungsgrad, Rissbildungen, Welligkeiten, Furnierdickenunterschiede infolge Aufquellen durch den Acetylierungsprozess		verklebt. Selektion, Acetylierung und Charakterisierung von Buchenfurnieren mit unterschiedlichen Dicken und Qualitäten. Bestimmung des WPG, Acetylgruppengehalt, Analyse der Rissbildung. Dichteveränderung und Homogenität der Modifikation. Messungen der Faserabweichungen an Furnieren war nicht möglich.
AP 2.1: Qualitätsbestimmung und Ausbeuteanalyse auf Grundlage der Welligkeit und Rissigkeit der Furniere nach der Acetylierung. Untersuchung des Furnierfeuchte und Strukturanalyse.	06.2021-05.2022	Untersuchungen hinsichtlich WPG und Acetylgruppengehalt wurden gemacht. Eine Ausbeuteanalyse, ergab einen Faktor von 1, da alle Furniere im Rahmen der Forschung theoretisch verwendet werden können. Mikroskopische Untersuchungen an acetylierten Furnieren wurden durchgeführt. Untersuchungen am Micro-Computer Tomographie (μ -CT) oder mittels Raman Spektroskopie waren nicht aussagekräftig. Topografische Unterschiede mittels Laserscanningmikroskop wurden ermittelt. Materialfeuchten mittels DVS wurden ermittelt.
AP 2.2: Schrägfaserigkeit	06.2021-05.2022	Der Einfluss der Schrägfaserigkeit an acetylierten und nativen Säge- und Schäl furnieren wurde in Zugversuchen durchgeführt. Hier wurde auch der Unterschied zwischen Sägefurnieren und Schäl furnieren (mit Rissen) untersucht. Der festigkeitsmindernde Einfluss der Schrägfaserigkeit konnte bei beiden Furnierarten nachgewiesen werden. Dabei zeigten die Sägefurniere erwartungsgemäß höhere Zugfestigkeiten als die Schäl furniere.
AP 3: Untersuchungen zur Veränderung der Oberfläche in Abhängigkeit von: Furnierdicke, geschält, geschliffen, gealtert, frisch in Bezug zur: Oberflächenenergie (Benetzbarkeit), Wasseraufnahmefähigkeit, Klebstoffaushärtung (Abbindeverhalten), Aufbringverfahren und -menge, Pressdruck, -zeit und -temperatur. Differenzierung zwischen Kalt- und Heißverklebung der Furniere. Klärung chemischen und prozesstechnischen Fragen der Heißverklebung.	09/2021 bis 05/2025	Acetylierte LVL-Platten wurden im Labormaßstab und industriell gefertigt. Dabei wurden verschiedene Furnierbreiten und -dicken sowie verschiedene Klebstoffe (PF, PRF, MUF, PUR) eingesetzt. Kaltverklebungen (Flächenverklebung und Keilzinkung) von LVL (heißt und kalt) wurden durchgeführt.
AP 3.1: Kaltverklebung		<p>Im Rahmen der Arbeitspakete 3.1 und 4 wurden Kaltverklebungen unter Verwendung von PRF-, MUF- und PUR-Klebstoffsystemen durchgeführt. Die Verklebungen erfolgten sowohl in der Fläche als auch in der Länge (Keilzinkung), wobei der Fokus auf acetylierten LVL-Platten lag. Eine Verklebung von Vollholz wurde nicht realisiert, da die Verwendung acetylierten Furnierschichtholzes eine realistischere Anwendungssituation im LVL-Kontext darstellt und zudem eine Anpassung der Prüfkörpergeometrie vermieden werden konnte.</p> <p>Die Verklebungsergebnisse zeigten insbesondere bei PRF- und PUR-Klebstoffen positive Tendenzen in Bezug auf die Scherzugfestigkeiten sowie den Holzbruchanteil, was auf eine grundsätzlich gute Verklebung hinweist.</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Zur Charakterisierung der Verklebungen kamen u. a. folgende Prüfmethode zur Anwendung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • EN 314-2 (Sperrholz) zur Bestimmung der Scherzugfestigkeiten anstelle der EN 302-1 (Längszugscherfestigkeiten), • Delaminierungsversuche in Anlehnung an EN 14080, wobei die Untersuchungen auf Furnierlagen bezogen wurden, • Fluoreszenzmikroskopische Analysen, welche eine detaillierte Beurteilung der Klebstoffpenetration und der Fugenstruktur ermöglichten. <p>Begleitend wurden zudem Materialfeuchten (vgl. AP 2) und Dichten (vgl. AP 3.2) ermittelt sowie umfassende Oberflächenanalysen durchgeführt. Letztere umfassten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Messung der Rauheit, • Bestimmung des Oberflächen-pH-Werts, • Kontaktwinkelmessungen mit Wasser und Klebstoffen (MUF, PRF, PUR) zur Bewertung der Benetzbarkeit. <p>Auf eine Ermittlung der Delaminationsbeständigkeit gemäß EN 302-2 sowie der Blockscherfestigkeit (trocken und nass, in Anlehnung an EN 14080) wurde bei den Vollholzverklebungen verzichtet. Vergleichbare Untersuchungen wurden jedoch an den hergestellten LVL-Strukturen durchgeführt, sodass dennoch eine fundierte Aussage zur Eignung der Klebstoffe für Kaltverklebungen im LVL-Kontext möglich war (siehe AP 4).</p> <p>Die Ergebnisse liefern eine belastbare Grundlage für die Auswahl geeigneter Klebstoffe sowie für die weitere Prozessoptimierung bei der Herstellung acetylierter LVL-Bauteile.</p>
AP 3.2: Heißverklebung		<p>Gezielte Versuchsreihen konnten wesentliche chemische und prozesstechnische Fragestellungen zur Heißverklebung von acetyliertem Buchenfurnier klären.</p> <p>Produktion mehrlagiger LVL-Platten unter Verwendung von PF- und PRF-Klebstoffen.</p> <p>Die Ergebnisse zeigten, dass acetyliertes Furnier während der Heißpressung eine deutlich geringere Verdichtung erfährt als unbehandeltes Furnier. Dennoch wies es aufgrund der chemischen Modifikation durch Acetylierung eine insgesamt höhere Dichte auf. Der Rücksprungeffekt, der sich auf die dimensionsstabilisierenden Eigenschaften nach der Entlastung des Pressdrucks und nach Wasserlagerung bezieht, konnte bei den acetylierten Proben ebenfalls als gering eingestuft werden.</p> <p>Zur weiteren Evaluierung möglicher chemischer Veränderungen während des Pressprozesses wurde ein ergänzender Versuch durchgeführt, bei dem die Pressung bei einer Temperatur von 150 °C erfolgte. Im Rahmen dieser Versuchsreihe konnten keine Hinweise auf eine Deacetylierung festgestellt werden. Dies wurde zusätzlich durch biologische Abbauprüfungen mit holzabbauenden Pilzen bestätigt: Ein Befall blieb vollständig aus, was auf den Erhalt der acetyltypischen Resistenz und damit auf eine unveränderte chemische Struktur des Furniers während der Heißverpressung hinweist.</p>
AP 4: Entwicklung von Fertigungsverfahren zur	10/2021 bis 05/2025	Industrielle und technikumsbezogene Herstellung von LVL-Lamellen aus acetylierten Buchenfurnieren. Durchführung von Delaminierungsprüfungen zur

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
Herstellung von acetylierten Buchen-LVL-Lamellen (aus Platten) und Brettschichtholzträgern aus LVL-Lamellen unter Berücksichtigung des Zustandes der Furniere nach der Acetylierung in Bezug auf die Flächenverklebung sowie Alterung der Furniere durch Transportwege. Variation von Klebstoffen, Aufbringverfahren, Klebstoffmenge, Furnierdicken, Prozesszeiten, Drücke, Temperaturen. Variation Furnierdicken und -anzahlen pro Platte.		Beurteilung der Verklebungsqualität, wobei zur praxisnahen Bewertung statt der EN 302-2 die EN 14080 herangezogen wurde. Die Scherzugfestigkeit und der Holzbruchanteil wurden in Anlehnung an EN 314-2 ermittelt (vgl. AP 3). Auf die Durchführung von Blockscherversuchen wurde verzichtet, da hierfür nicht genügend Prüfkörpermaterial zur Verfügung stand. Ergänzend wurden stattdessen Untersuchungen zur Qualität der Verklebung in Anlehnung an EN 14374:2004. Zudem wurden Dauerhaftigkeitsprüfungen gegen holzerstörende Pilze (Weißfäule, Braunfäule, Moderfäule), Bewitterungstests unter Labor- und Freilandbedingungen sowie Freilandexpositionen im Erdkontakt und im Meerwasser durchgeführt. Thematische Überschneidungen mit AP 3 traten insbesondere im Bereich der Verklebungsuntersuchungen auf, wodurch sich Synergieeffekte zwischen den beiden Arbeitspaketen ergaben.
AP 5: Dauerfestigkeit von Buchenfurnierschichtholz	10/2021 bis 05/2025	<p>Die Kleinversuche an nativen und acetylierten Buchenbrettern und an LVL Lamellen wurden an verschiedenen Lagerungsbedingungen (Grenzwerte der Nutzungsklassen NKL 1-3) durchgeführt. Diese wurden als trocken (20°C/40%rH) normal (20°C/65%rH), feucht (20°C/95%rH) und nass (Wasserlagerung) umgesetzt.</p> <p>Die charakteristischen Biegebruchspannungen reduzieren sich beim nativen LVL von trocken zu nass um 45% (123 N/mm² -) beim acetylierten LVL jedoch nur um 10% (103 N/mm² -). Betrachtet man nur die Veränderungen vom Normklima zum nassen Milieu kann für das acetylierte LVL eine eher konstantes Festigkeitsniveau aus a. 95 N/mm² festgestellt werden. Hier zeigt sich auch im nassen Zustand ein eher sprödes Verhalten.</p>
AP 5.1: Kriechverhalten		<p>Die Langzeitversuche nach DIN EN 1156 wurden an zwei verschiedenen Standorten durchgeführt; A: Unter normal-klimatisierten Verhältnissen im Klimaraum der RPTU und B: im Freiland auf dem Campusgelände des Fachbereichs Biologie. Die Verformungen wurden laufend gemessen, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit mit Datenloggern erfasst.</p> <p>Die Auswertungen zeigen für das angesetzte Lastniveau von 25% in der Nutzungsklasse SC1 (innen) eine Kriechzahl von derzeit $k_{c,300D,SC1,25\%}=0,30$ und in der Nutzungsklasse SC3 (außen bewittert) von $k_{c,300D,SC3,25\%}=0,70$. Im Vergleich zur BauBuche® ($k_{c,SC1}=0,6$) ist liegt der Wert in Nutzungsklasse SC1 auf einem guten niedrigen Niveau. Da die BauBuche® nur eine Zulassung bis Nutzungsklasse SC2 hat ist kein weiterer Vergleich in SC3 möglich.</p>
AP 5.2: Delaminierung und Scherfestigkeiten		<p>Ergänzend zu den Prüfungen in Göttingen wurden mit einem weiteren PU Klebstoff Delaminierungs- und Blockscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 durchgeführt. Dabei wurden Vorbehandlungen der Prüfkörper mit Wasser und einem Primer variiert. Die besten Ergebnisse ohne Delaminierungen wurden bei den acetylierten LVL Lamellen mit Primervorbehandlung erzielt. Bei einigen Prüfkörpern wurde eine Kavernenbildung in der Klebschicht festgestellt. Hier besteht noch Charkateristische Biegefestiggkeiten Oprimierungsbedarf.</p> <p>Für die Prüfung der Scherfestigkeiten von kaltverklebten PRF Klebefugen wurde ein</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>modifiziertes Scherprüfgerät eingesetzt, dass die Unzulänglichkeiten von üblichen Scherprüfeinrichtungen mit den Überlagerungen von Scher- und Normalkräften reduziert.</p> <p>Es zeigte sich im Vergleich zwischen nativen und acetylierten Hölzern eine höhere Scherfestigkeit von über 10% der acetylierten Hölzer.</p>
<p>AP 6: Trag- und Verformungsverhalten von Buchenfurnierschichtholz</p>	<p>10/2021 bis 05/2025</p>	<p>Wesentliche Aspekte des Trag- und Verformungsverhaltens wurden im Rahmen von Kleinversuchen durchgeführt.</p> <p>Die Versuchsreihen für weitgespannte Biegeträger werden durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert.</p> <p>Als Kleinversuche wurden Biege-, Druck-, und Blockscherprüfungen durchgeführt. Die Zugversuche erfolgten an größeren Lamellen mit $d=40$ mm t.</p> <p>Weiterhin wurden Homogenisierungseffekte und der Einfluss verschiedener Klimabedingungen auf das Biegetragverhalten geprüft.</p>
<p>AP 6.1: Kleinversuche (Einzellamelle)</p>		<p>Die charakteristische Biegefestigkeiten acetylierter LVL Lamellen wurden bei den Versuchen im Normalklima in Anlehnung an DIN EN 408 mit $f_{m,k}=93,3$ N/mm² bestimmt. Damit liegen diese Festigkeiten in den Kleinversuchen deutlich über dem angegebenen Wert für BauBuche von 75 N/mm².</p> <p>Die charakteristischen Druckfestigkeiten konnten in tangentialer und radialer Richtung im Normalklima nach DIN EN 408 mit $f_{c,90,edge,k}=12,8$ N/mm², bzw. $f_{c,90,flat,k}=12,4$ N/mm² bestimmt werden. Der Wert in radialer Richtung ist den Werten von Baubuch S Lamellen vergleichbar, in tangentialer Richtung liegt der Wert darunter (Baubuche $f_{c,90,edge,k}=14,0$ N/mm²).</p> <p>Die Scherfestigkeiten des Materials wurden an Hand von Blockscherprüfungen aus verklebten, acetylierten Brettabschnitten nach DIN EN 14 080 durchgeführt (modifiziertes Blockscherprüfgerät). Hier wurden charakteristische Scherfestigkeiten von $f_{v,k}=19,1$ N/mm² in Faserrichtung ermittelt. Diese Werte liegen deutlich über den Werten von BauBuche S mit $f_{v,k}=8,0$ N/mm².</p> <p>Bei nativer Buche wurden Mittelwerte der Scherfestigkeit von 17,28 N/mm² erreicht. Das Ergebnis ist mit den Versuchen an der TU München vergleichbar (Jiang, Y., Schaffrath, J., Knorz, M., Winter, S., van de Kuilen, J.W.G. „Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz“, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, TUM, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. München 2014).</p> <p>Die Zugprüfungen von acetylierten LVL Lamellen wurden an einer Zugprüfmaschine der Firma Pollmeier durchgeführt. Die charakteristischen Zugfestigkeiten mit $f_{t,0,k}=91,1$ N/mm² liegen deutlich über den Werten der Baubuche S mit $f_{t,0,k}=66,0$ N/mm².</p> <p>Für einen Aspekt der Homogenisierung wurden acetylierte LVL-Lamellen mit stehenden Furnierlagen hergestellt und mit Lamellen aus liegenden Furnieren verglichen. Im 4-Punkt Biegeversuch zeigten sich</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>annähernd gleiche Mittelwerte, durch die Homogenisierung wurden die Streubreiten der Biegefestigkeiten bei den stehenden Lamellen deutlich reduziert. Dies zeigte sich in einer charakteristischen Festigkeitssteigerung von etwa 19% ($f_{m,k,liegend}=93,3 \text{ N/mm}^2$ auf $f_{m,k,stehend}=110,9 \text{ N/mm}^2$).</p> <p>Ein weiterer Homogenisierungseffekt konnte bei den Auswirkungen der Schrägfaserigkeiten auf die Zugfestigkeiten geprüft werden. Obwohl sich die Zugfestigkeiten bei einem Last-Faserwinkel von nur 5° um ca. 45% (bei Furnieren) reduzieren, lagen die Zugfestigkeiten der LVL Lamellen über denen der Einzelfurniere ohne Faserneigung.</p>
AP 6.2: Weitspannende Biegeträger		Die Versuchsreihen für weitgespannte Biegeträger werden durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert, sind noch in Produktion und werden danach geprüft.
Arbeitspaket 7: Verbindungstechnik von Bauteilen aus Buchenfurnierschichtholz	10/2021 bis 05/2025	<p>Geprüft wurden die Lochleibungsfestigkeiten mit verschiedenen Durchmessern sowie im Normalklima und orientierend bei Wassersättigung (Verwendung im direkt bewitterten Außenbereich). Es wurden acetylierte mit naiven LVL Lamellen untersucht. Im Normalklima lagen die Mittelwerte und die charakteristischen Werte der nativen und acetylierten Hölzer bei Stabdübeldurchmessern von 8 mm und 12 mm untereinander in einer vergleichbaren Größenordnung bei Stabdübeldurchmesser 8 mm etwas über den charakteristischen Werten der BauBuche. (z.B. Stabdübel 8 mm, zur Faser: $f_{h,0,k,nativ}= 65,1 \text{ N/mm}^2$, $f_{h,0,k,acetyliert}= 67,3 \text{ N/mm}^2$, $f_{h,0,k,BauBuche}= 55,1 \text{ N/mm}^2$).</p> <p>Bei der Wassersättigung zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede. Während die Werte bei den nativen Lamellen deutlich reduziert waren ($d=12 \text{ mm}$, $f_{h,0,k,nativ}= 23,9 \text{ N/mm}$) blieben sie bei den acetylierten Lamellen etwa in der gleichen Größenordnung (wassergesättigt: $f_{h,0,k,acetyliert}= 53,5 \text{ N/mm}$, normal-klimatisiert: $f_{h,0,k,acetyliert}= 54,5 \text{ N/mm}$). Damit zeigt sich auch hier die Leistungsfähigkeit des Materials für den bewitterten Außenbereich.</p> <p>Für Längsverbindungen von LVL Lamellen wurden Zugversuche an Keilzinken durchgeführt. Nach Vorversuchen mit verschiedenen Pressdrücken wurden an acetylierten LVL Lamellen Hölzer mit Querlagen und verschiedenen Keilzinkengeometrien variiert. Für die Verklebung wurde ein Phenol-Resorzierharz Klebstoff von Dynea verwendet.</p> <p>Dabei erzielte das „Standard“ I15 Profil ohne Querlagen die besten charakteristischen Werte mit $f_{t,0,k}=69,5 \text{ N/mm}^2$. Der Wert liegt noch oberhalb der für BauBuche S angegebenen Wert von $f_{t,0,k}=60,0 \text{ N/mm}^2$. Damit werden aus im versetzten Verbund von keilgezinkten acetylierten LVL-Lamellen hergestellten Trägern hohe Festigkeiten wahrscheinlich.</p> <p>Stellvertretend für geeignete Verbindungsmittel im Außenbereich werden noch Versuche mit Konusdübeln (Vergleichbar etwa mit Dübeln besonderer Bauart, System Appel - Ringkeildübel aus Aluminiumdruckguss) durchgeführt. Diese zielen auf eine direkte Anwendung auf der Landesgartenschau in Neustadt / Wstr. ab, werden in Bauteilgröße geprüft und durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert. Durch Produktionsverzögerungen sind die Prüfkörper nun erst</p>

Arbeitspakete (AP) (It. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (It. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		hergestellt und werden im Anschluss geprüft und ausgewertet.
Arbeitspaket 8: Anwendungsbereiche acetylierter Buchen-Furnierschichtholz-produkte	10/2021 bis 05/2025	<p>Neben den möglichen als „klassisch“ zu bezeichnenden Anwendungen im Außenbereich - Brücken und Türme- wurden auch folgende Anwendungsfelder untersucht:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mobilitätsbereich (PV Parkplatzüberdachungen, Schilder- und Mautbrücken, Leitplankensysteme, etc.) - Windenergiebereich (auch Offshore) für resiliente und leichte Gittertragkonstruktionen - Stadtmöblierung mit leichten und gekrümmt formbaren LVL Modulen <p>In diesen Bereichen könnten die hohen Festigkeitseigenschaften, die Formstabilität und die Dauerhaftigkeit neue Impulse setzen.</p>
Arbeitspaket 9: Abschlussbericht (Graf / Militz)	bis Ende Juni 2025	Zusammenfassung und wissenschaftliche Bewertung aller Ergebnisse aus den Arbeitspaketen. Formale Dokumentation für das Förderprojekt.

Meilensteine (M) (It. Planung im Antrag)	Fälligkeit (It. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1: Herstellungsprozess von acetyliertem Buchen-LVL im Technikum und Übertragung auf Pilotmaßstab entwickelt. Gewissheit über Acetylierungsgrad, Furniereigenschaften und -qualitäten sowie Prozessausbeute (Militz). Einfluss der Schrägfaserigkeit auf mechanische Eigenschaften von Buchenholz und acetylierten Buchenholzfurnieren evaluiert.	06.2022	<p>Mehrere Chargen Buchenfurniere in verschiedenen Breiten und Stärken wurden erfolgreich Zusammenarbeit mit Deutsche Holzveredelung Schmeing und Accsys Technologies acetyliert. Selektion, Acetylierung und Charakterisierung von Buchenfurnieren mit unterschiedlichen Dicken und Qualität damit ließen ten. Bestimmung des WPG, Acetylgruppengehalt, Analyse der Rissbildung, Dichteveränderung und Homogenität der Modifikation. (siehe auch AP 1 und AP 2)</p> <p>Der Einfluss der Schrägfaserigkeit an acetylierten und nativen Säge- und Schäl furnieren wurde in Zugversuchen durchgeführt. Der festigkeitsmindernde Einfluss durch die beim Schälvorgang erzeugten Risse konnte nachgewiesen werden. Es konnte ebenso nachgewiesen werden, dass bereits geringe Faserneigungen zu hohen Zugfestigkeitsverlusten führen (5° Faserneigung = Zugfestigkeitsverlust von 45%).</p> <p>Da sich die Faserneigungen bei den Schäl furnieren nur in geringem Umfang über die Holzqualitäten (z.B. Geradschäftigkeit, geringe Krümmungen) beeinflussen lassen kommt der Furnierlegung mit dem damit verbundenen Homogenisierungseffekt eine hohe Bedeutung zu.</p>
M 2: Verständnis der Interaktion Klebstoffacetyliertes Buchenfurnier. Hinreichende Delaminierungsbeständigkeit des LVL. Homogenisierungseffekte und der Einfluss auf das Tragverhalten sowie Ergebnisse weiterer mechanischen Eigenschaften an Kleinprüfkörpern	04.2023	<p>Die Verklebungsqualität (trocken und nass) wurde in Anlehnung an EN 314-2 und EN 14374:2004 getestet. Darüber hinaus wurden Kontaktwinkelmessungen, Rauheitsmessungen sowie der pH-Wert auf der Oberfläche von acetyliertem Buchen-LVL bestimmt. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Delaminierungsbeständigkeit wurden durchgeführt und deuten auf eine ausreichend gute Verklebung hin.</p> <p>Homogenisierungseffekte mit einer Steigerung von mechanischen Kennwerten konnten unter verschiedenen Aspekten nachgewiesen werden. Die Streubreiten von Biegefestigkeiten verringerten sich zwischen acetylierten Brettern und acetyliertem Furnierschichtholz. Damit stiegen die charakteristischen Kennwerte.</p> <p>Durch die Reduktion der Feuchteaufnahme-fähigkeit in den Zellwänden durch die Acetylierung blieben die</p>

		<p>Biegefestigkeitswerte vom Normalklima zu wassersatten LVL-Lamellen auf einem gleichbleibenden Niveau, während unter den gleichen Bedingungen die Festigkeitswerte der nativen LVL Lamellen stark reduziert wurden.</p> <p>Ein weitere Homogenisierungseffekt konnte mit der Anordnung von stehenden Furnieren gegenüber liegenden Furnieren erreicht werden.</p> <p>Bei den untersuchten mechanischen Kennwerten an Kleinprüfkörpern konnten nahezu durchgängig hohe Festigkeiten erzielt werden, deren charakteristische Werte über denen von BauBuche lagen. Es ist zu erwarten, dass aus den Lamellen gefertigte Träger mit vergleichbaren Werten wie die BauBuche im Außenbereich einsetzbar sein werden.</p> <p>Bei den Kriechversuchen unter Dauerlast im Innen- und Außenbereich konnten im Vergleich zur BauBuche ebenfalls sehr gute Werte ermittelt werden. Dabei ist beachten, dass BauBuche nur eine Zulassung bis Nutzungsklasse SC2 hat und daher nur diese Werte vergleichbar sind.</p>
<p>M 3: Abschluss der Arbeiten zu Fertigungsverfahren und zum Trag- und Verformungsverhalten an Hölzern in Bauteilgröße sowie zu Dauerfestigkeitseigenschaften.</p> <p>Abschluss der Arbeiten zur Verbindungstechnik und Verbindungsmitteln sowie zur Anwendbarkeit von LVL Produkten</p>	01.2024	<p>Fertigungsverfahren, von Furnieracetylierung bis zur Trägerfertigung, wurden im Labormaßstab und im industriellen Maßstab im Batchprozess entwickelt.</p> <p>Die Versuchsreihen für weitgespannte Biegeträger und in Bauteilgröße werden durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert. Diese sind in der Produktion, Teilweise geprüft und werden noch geprüft.</p> <p>Für die Anwendung für Tragwerke im Freiland wurde der Fokus der Verbindungsmittel auf Stabdübel beschränkt. Die Zugfestigkeiten von Keilzinkenverbindungen zur Verlängerung von LVL-Lamellen wurden bestimmt, die Werte liegen bei Lamellen ohne Querlagen und mit dem Standard I15 Profil auf einem hohen Niveau.</p> <p>Die Untersuchungen zu Anwendungsfeldern führte neben den Bereichen Brücken und Türme zu den Komplexen Mobilität, Windenergie und Stadtmöblierung. Es sind und werden Kontakte zu Forschenden und Anwendenden geknüpft (z.B. WKI, Hasslacher Timber).</p>

b) Zusammenfassung

Die Wesentlichen Fragenstellungen und Ziele im Forschungsprojekt konnten beantwortet, bzw. erreicht werden. Der Prozess der Acetylierung von Buchenfurnieren und die daraus durch Heiß- und Kaltverklebung hergestellten Lamellen und Bauteile konnte mit den Industriepartnern technisch umgesetzt werden. Die Eigenschaften Formstabilität, Dauerhaftigkeit gegenüber biogenen Abbauprozessen und wesentlichen mechanischen Eigenschaften wurden erforscht und beschrieben. Mit diesen Eigenschaften lassen sich weitere Anwendungsfelder des konstruktiven Holzbaus im bewitterten Außenbereich erschließen. Eine erste Anwendung wird mit diesem Material auf der Landesgartenschau in Neustadt/WStr. als weitgespannte, bewitterte Parkplatzüberdachung geplant und umgesetzt.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Modifikation der Buchenholzfurniere (Accsys / Militz; TV2)

Insgesamt lieferte AP 1 eine reproduzierbare Methodik zur Acetylierung von Buchenfurnieren, die als Grundlage für alle weiteren Prozessschritte der LVL-Herstellung diente. Die Untersuchungsergebnisse flossen direkt in die Chargenauswahl und das Herstellungsverfahren für die folgenden Arbeitspakete ein.

Im Projektzeitraum wurden mehrere Chargen Buchenfurniere erfolgreich acetyliert. Für jede Charge wurde das WPG (Weight Percent Gain) zur Quantifizierung des Acetylierungsgrads bestimmt. Durchschnittliche WPG-Werte lagen bei etwa 23–25 %, was einer erfolgreichen Modifikation entspricht.

Beispielsweise wurde dabei an 38 dünnen (1,3 mm) und an 110 dicken (2,4 mm) Furnieren (500 x 500 mm) das WPG bestimmt. Dünne Furniere wiesen ein WPG von 23,0 % (SD 0,7; n = 38) und dicke Furniere eines von 22,7 % (SD 0,7; n = 110) auf. Auch wurde das Bulking (Tangential 9,2 (SD 0,7)) an dicken Furnieren gemessen. Ebenfalls konnte kein Unterschied im WPG innerhalb eines Stapels bei zunehmender Stückzahl bei abnehmender Furnierdicke ermittelt werden. Es zeigte sich auch, dass sich der Rotkernanteil nicht signifikant auf die Modifikationsergebnisse auswirkte. Grundsätzlich wurden Furniere ohne Äste oder nur mit kleineren Ästen acetyliert.

Für die Acetylierung kamen Buchenfurniere in zwei Breiten (600 mm und 1200 mm) und identischer Länge (rund 2050 mm) zum Einsatz. Während des Prozesses zeigte sich, dass insbesondere breite Furniere zur Bildung von Längsrissen neigten (Abbildung 1). Ursache hierfür ist die Quellung während der chemischen Reaktion mit Essigsäureanhydrid, gefolgt von möglichen Spannungen beim Rücktrocknen.

Daher wurde im weiteren Verlauf auf die Verwendung von 600 mm breiten bzw. 1000 mm breiten Furnieren umgestellt.



Abbildung 1: Starke Rissbildung von acetylierten Furnieren (circa in der Mitte der 1200mm breiten Furniere).

Nach der Herstellung von acetyliertem Buchenfurnierschichtholz wiesen einige Prüfkörper Fehlstellen auf. Dies ist auf Risse im Furnier in Kombination mit geringer Verdichtung beim Heißpressen (siehe weiter unten im Bericht) zurückzuführen. Deshalb ist darauf zu achten, dass Furniere mit möglichst keinen oder wenig und kleinen Rissen verwendet werden.

Anders als im Projektantrag beschrieben wurde keine Dichtebestimmung und keine Holzfeuchtesortierung an Furnieren vor der Acetylierung durchgeführt. Dies ist auf Welligkeiten in den Furnieren zurückzuführen, die zu großen Messunsicherheiten führen können. Außerdem nehmen die Furniere schnell Feuchtigkeit (große Fläche bei geringen Dicken) nach der Darrtrocknung auf. Eine Holzfeuchtesortierung war daher schwierig. Zwischen einer Klimatisierung im Labor und der Acetylierung vor Ort können mehrere Wochen liegen und wurde aufgrund technischer sowie logistischer Rahmenbedingungen nicht umgesetzt. Zur Bestimmung der Materialfeuchte wurden DVS-Messungen durchgeführt (siehe folgendes Kapitel). Die Ergebnisse zeigen, dass

sowohl unbehandeltes als auch acetyliertes Furnier in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte aufweisen. Grundsätzlich sollte der Feuchtegehalt des Holzes vor der Acetylierung möglichst niedrig sein, da Essigsäureanhydrid auch mit im Holz enthaltenem Wasser reagiert. Eine hohe Holzfeuchte führt daher zu einem erhöhten Verbrauch des Anhydrids.

Die Messung der Faserabweichungen an Furnieren war ebenfalls nicht möglich. Technologien zur Messung des Faserwinkels müssen mithilfe einer Referenzmethode überprüft werden. Im Bereich der Vollholzuntersuchungen ist dies in der Regel die Spaltmethode. Furniere lassen sich aber nicht reproduzierbar spalten, daher konnten die Faserabweichungen nicht gemessen werden. Zudem kann die Dichte an größeren Furnieren nur schwer genau bestimmt werden (siehe vorheriger Abschnitt). Die Frage der Auswirkung der Faserabweichungen auf Festigkeiten konnte daher im Rahmen dieses Arbeitspakets nicht abschließend untersucht werden.

Arbeitspaket 2: Wirkmechanismen der Acetylierung auf die Buchenholzstruktur - Grundlagenforschung)

Arbeitspaket 2.1: Qualitätsbestimmung und Ausbeuteanalyse (Militz; TV2)

Untersuchungen zur Qualität von Verklebungen zeigten, dass Welligkeiten und Risse die Verklebung nicht negativ beeinflussen. Alle acetylierten Furniere können theoretisch zu LVL-Platten verklebt werden. Auch stark gerissene Furniere (Abbildung 1) können für die Herstellung von LVL-Trägern verwendet werden, wenn beim Zuschnitt der Lamellen für die Träger, der mittlere Teil der verpressten Platte entfernt wird.

Abbildung 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt beispielhaft Risse vor und nach der Acetylierung an großen (A, ≈2200 x 600 mm) und kleinen Furnieren (B, 500 x 500 mm).

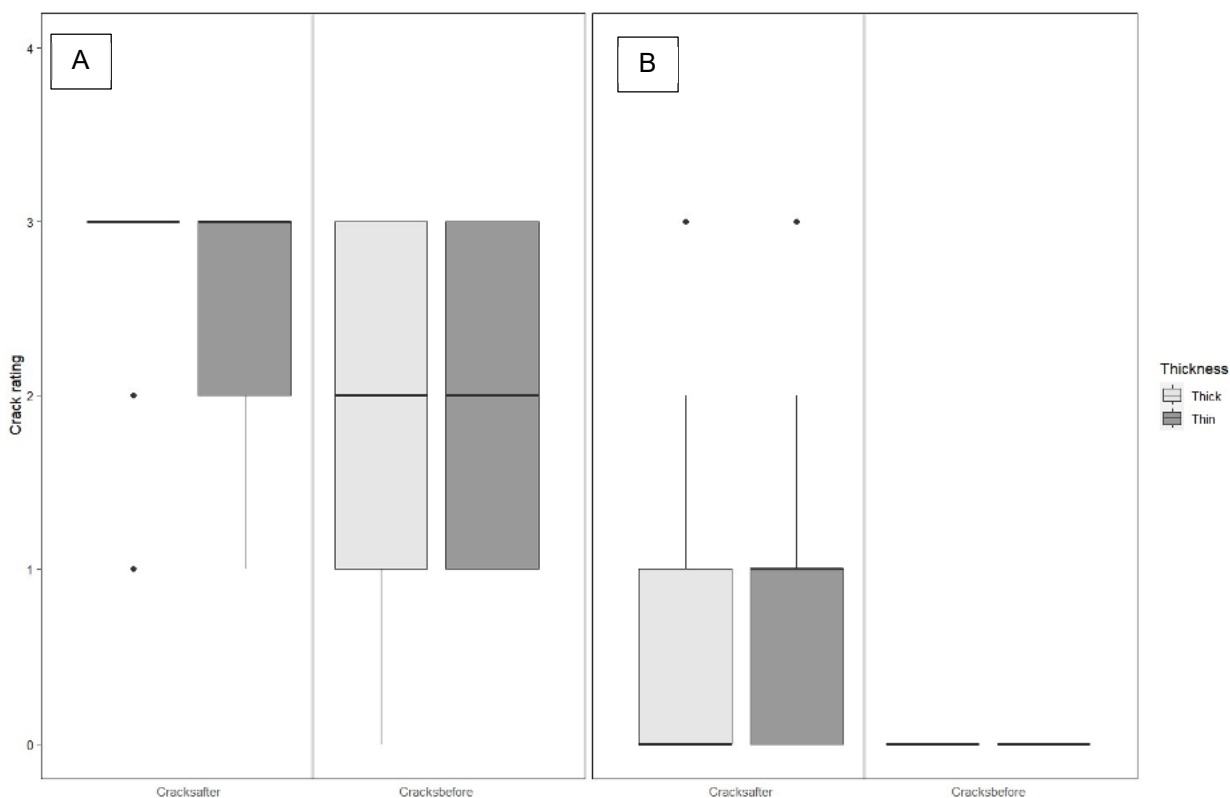


Abbildung 2: Risse vor und nach Acetylierung an großen (A, ≈2200 x 600 mm) und kleinen Furnieren (B, 500 x 500 mm).
0 = keine Risse und 4 = Risse > 25 cm.

Das dauerhafte Quellen (Bulking) in tangentialer Richtung lag bei rund 9,2 % und wurde beispielhaft an einigen Furnieren ermittelt. Rasterelektronmikroskopie hat die gequollenen Zellwände nach der Acetylierung verdeutlicht (Abbildung 2).

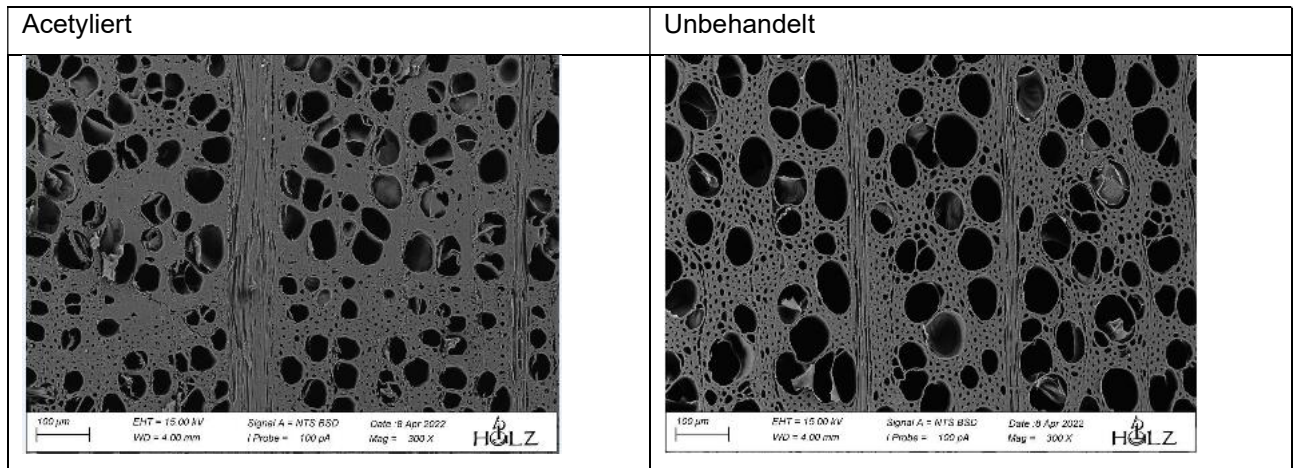


Abbildung 2: Rasterelektronmikroskopische Aufnahmen von acetyliertem (links) und unbehandeltem (rechts) Buchenfurnier

Zur Untersuchung der topografischen Unterschiede zwischen acetylierten Proben und Referenzen wurden verschiedene Rauheitsparameter berechnet (Abbildung 3). Ein Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) (VK-X110, Steuereinheit: VK-X100, Keyence, Osaka, Japan) wurde verwendet, um verschiedene Rauheitsparameter in Anlehnung an EN ISO 25178-122 zu bestimmen. Die Oberfläche des acetylierten LVL zeigte dabei nur geringe Abweichungen im Vergleich zum unbehandelten LVL, was im Einklang mit einer früheren Studie zu frisch gefrästen, acetylierten Keilzinkenverbindungen steht (siehe Publikation VI). Wie auch dort war die Oberfläche der acetylierten Proben etwas glatter. Ein direkter Einfluss der veränderten Oberfläche auf die Verklebung konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, da neben der Oberflächenrauheit auch weitere Parameter, wie etwa der Kontaktwinkel, verändert wurden.

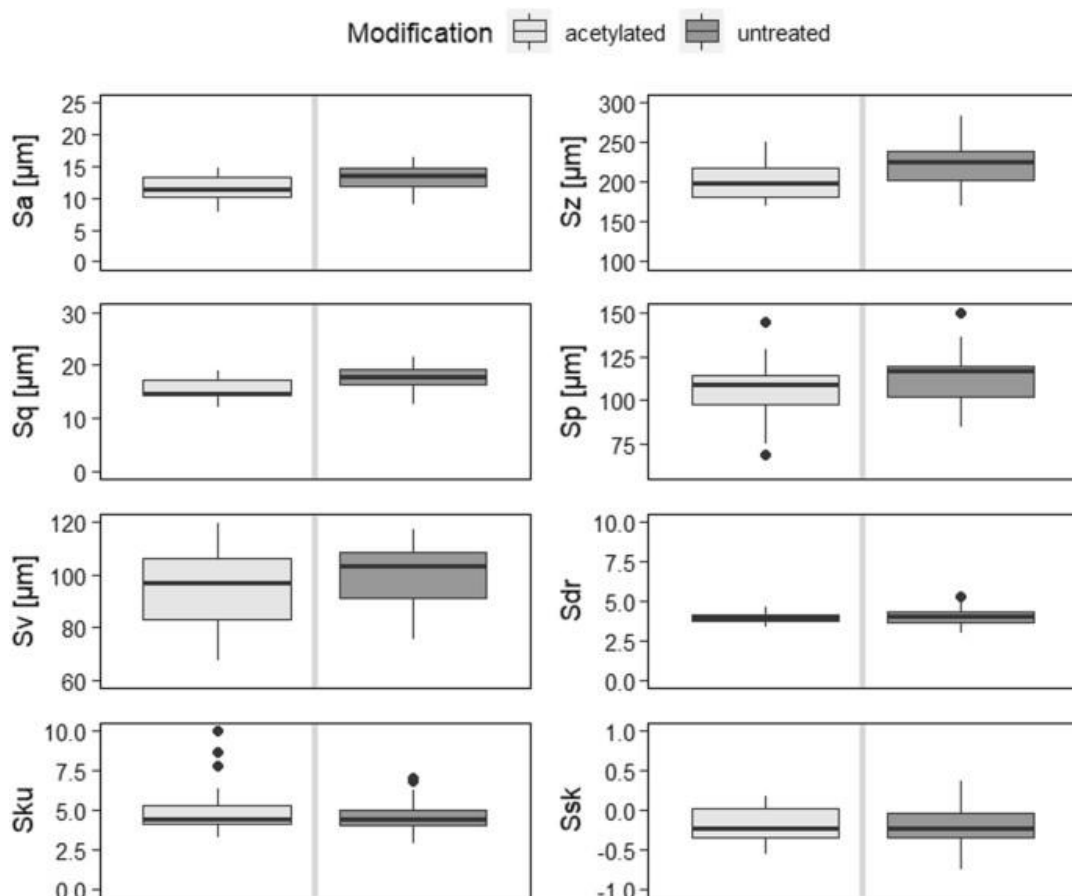


Abbildung 3: Rauheitsparameter auf der Oberfläche von acetyliertem und unbehandeltem Buchenfurnierschichtholz

Auch wurden die Materialfeuchten unter Berücksichtigung des Einflusses der Klimatisierung mittels Dynamic Vapour Sorption (DVS) untersucht (Abbildung 4). Die Ergebnisse zeigten, dass acetyliertes Buchenfurnier (auch nach einer Hitzebehandlung bei 150°C) eine deutlich reduzierte Materialfeuchte hat. Ebenfalls wurden Untersuchungen an 25 x 25 mm acetylierten Buchenfurnierschichthölzern in ausgewählten Klimata durchgeführt. Dafür wurden die Prüfkörper in Kunststoffboxen über verschiedenen Salzlösungen gelagert.

Acetylierte Prüfkörper zeigten auch hier eine reduzierte Materialfeuchte im Vergleich zu unbehandelten Referenzen. Weitere Details sind Publikation II zu entnehmen.

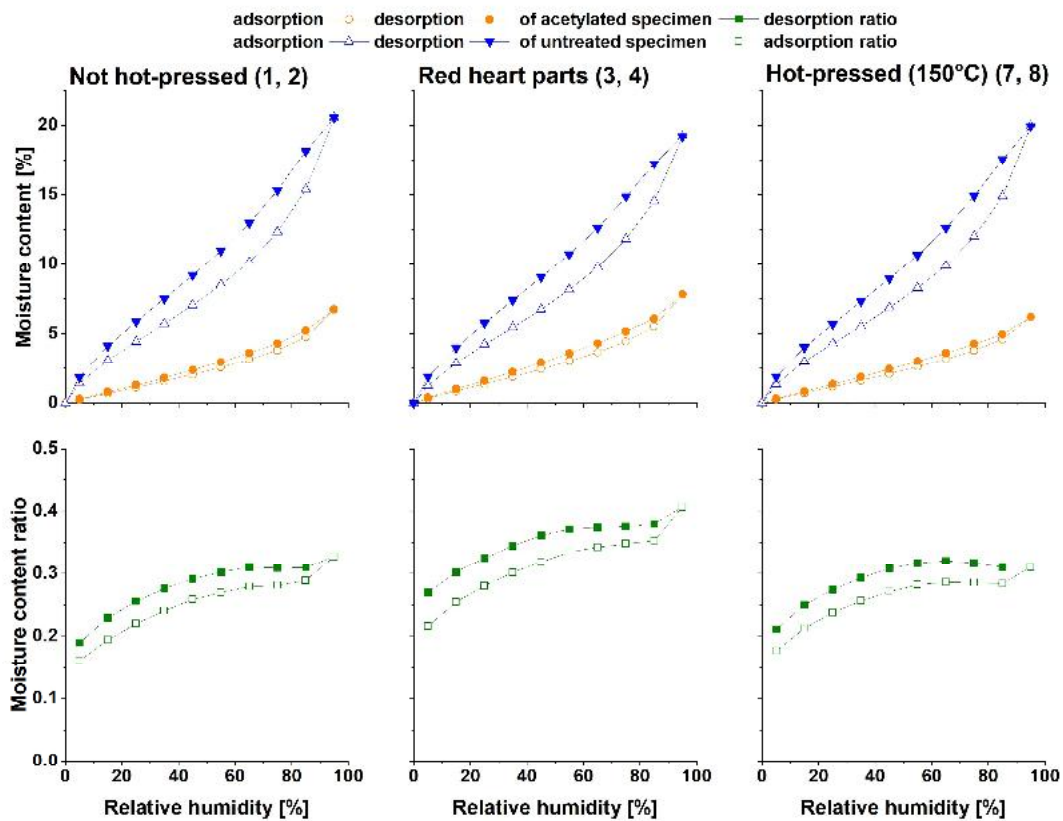


Abbildung 4: Dynamic Vapour Sorption (DVS)

Für die acetylierten Furniere wurde ein Ausbeutefaktor von 1 zugrunde gelegt, da im Rahmen des Forschungsvorhabens alle Furniere vollständig weiterverarbeitet werden konnten. Die tatsächliche Ausbeute ergibt sich jedoch aus den üblichen Bearbeitungsschritten wie dem Zuschnitt nach der Heißverpressung, dem Schleifen vor der Kaltverklebung sowie dem anschließenden Ablängen und Schleifen. Positiv wirkte sich dabei die durch die Acetylierung verursachte, dauerhafte Quellung in Dickenrichtung (Bulking) aus, die in tangentialer Richtung annähernd 10 % betrug. Eine präzise Berechnung des Ausbeutefaktors war aus organisatorischen Gründen nicht möglich. Zudem ist zu erwarten, dass der Ausbeutefaktor je nach konkretem Fertigungsauftrag variiert. Insgesamt ist jedoch laut Aussage der Industriepartner von einer typischen Ausbeute im Bereich gängiger industrieller Prozesse auszugehen. Mögliche Fehlstellen, etwa infolge von Rissbildung oder Delamination, sind dabei mit einzubeziehen.

Saubere mikroskopische Schnitte an acetyliertem Holz waren schwierig, da das Material sehr spröde ist. Dies zeigte sich auch bei Raman-Spektroskopische-Untersuchungen (nicht Teil des APs). Diese Untersuchungen führten zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen. Untersuchungen am Micro-Computer Tomographie (μ -CT) waren ebenfalls nicht aussagekräftig, was z.B. auf zu geringe Dichteunterschiede zurückzuführen ist.

Arbeitspaket 2.2: Zugfestigkeit und Schrägfaserigkeit an Buchenholz Furnieren (Graf TV1)

Prüfkörper für die Zugversuche wurden in Anlehnung an DIN 52 188 aus gesägten und geschälten Furnieren ausgelasert. Durch schräges Auslasern mit Orientierung an den Holzstrahlen konnten exakte Faserwinkel realisiert werden. Im Einspannbereich wurden nach mehreren Vorversuchen auf die Furniere Klötzchen aus Buchenfurnier-schichtholz aufgeklebt.

Die charakteristischen Werte wurden nach DIN EN 1058:2010-04 berechnet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 8 dargestellt.

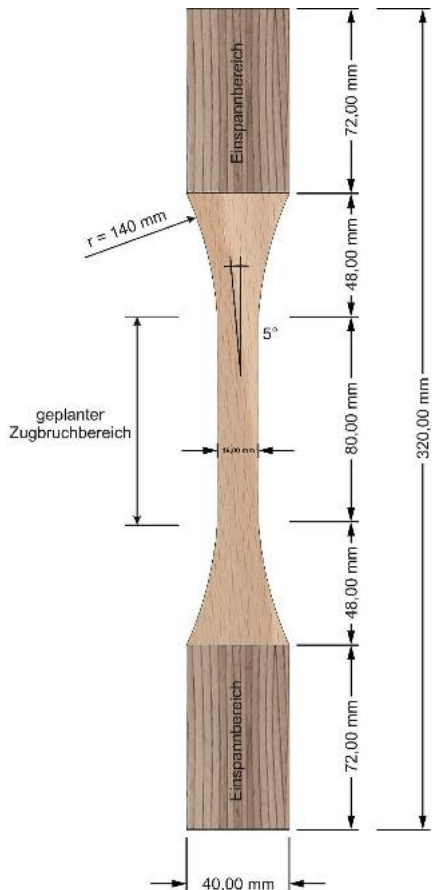


Abbildung 6: Prüfkörpergeometrie für die Zugversuche.



Abbildung 7: Mit einem Lasercutter wurden aus den Furnieren die Rohprüfkörper ausgeschnitten.

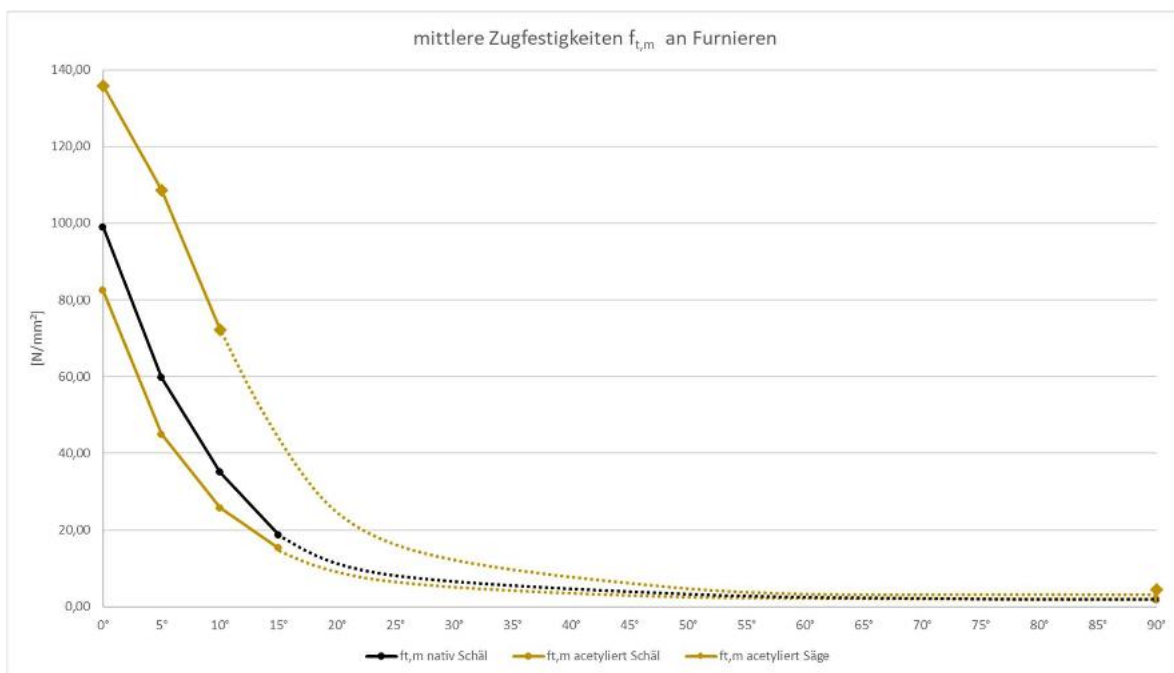


Abbildung 8: Zusammenhang der Zugfestigkeit von acetylierten Säge- und Schäl furnieren sowie von nativen Schäl furnieren. Die Werte zwischen 10°, bzw. 15° und 90° sind interpoliert (gestrichelte Linien)

Die Rohdichtewerte der nativen Schäl furniere wurden mit $0,63 \text{ g/cm}^3$ bestimmt, diejenigen der acetylierten mit $0,72 \text{ g/cm}^3$. Die Zugfestigkeiten der acetylierten Schäl furniere lagen ohne Faserneigung um knapp 20% unter den Werten der nativen Furniere.

Die geringere Zugfestigkeit der Schäl furniere gegenüber den Säge furnieren liegt in der herstellungsbedingten Rissbildung beim Schäl begründet.

Arbeitspaket 3: Wirkmechanismen der Verklebung mit der acetylierten Buchenholzoberfläche (Militz; TV2)

AP 3.1: Kaltverklebung

Keilzinken:

Abbildung 9 zeigt die schematische Darstellung eines Prüfkörpers zur Untersuchung der Keilzinkung von acetyliertem LVL. Dabei wurde die Scherzugfestigkeit an Prüfkörpern der Nummer c gemessen. Oberflächeneingeschaften, Dichte und Materialfeuchte an Prüfkörpern mit den Buchstaben a, b und d. Für die Herstellung der keilgezinkten Prüfkörper kamen drei Klebstofftypen bzw. Produkte nach Herstellerangaben zum Einsatz (MUF, PUR und PRF).

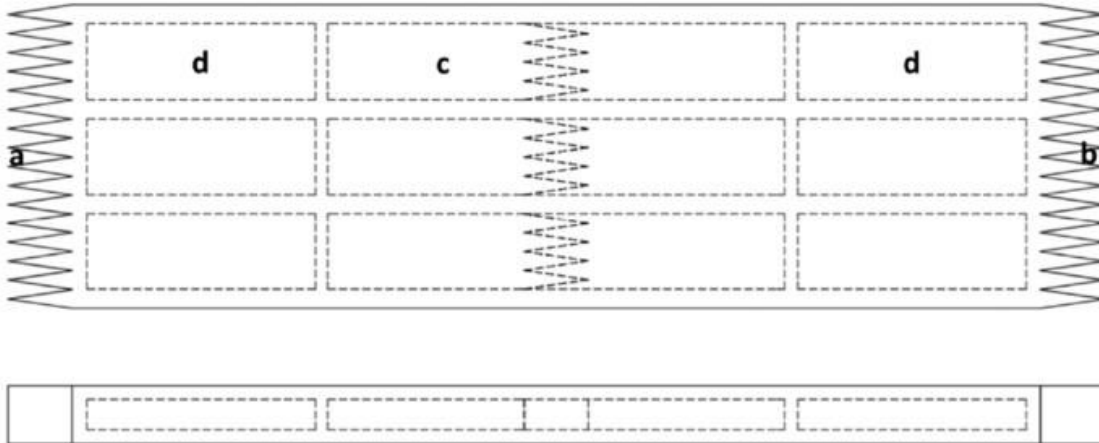


Abbildung 9: Schematische Darstellung der keilgezinkten Prüfkörper (360 × 100 × 19 mm) a = Kontaktwinkelmessungen; b = Rauheitsmessungen; c = Scherzugprüfkörper; d = Dichte und Materialfeuchte

Die Scherzugfestigkeiten der mit PRF oder PUR verklebten Keilzinkenverbindungen waren höher als die der Referenzen. Im Gegensatz dazu zeigten Keilzinkenverbindungen mit MUF eine geringe Scherzugfestigkeit, besonders nach einem Kochwechseltest.

Die Oberflächenrauheit, gemessen mit einem Laser-Scanning-Mikroskop, war vergleichbar zwischen acetylierten und unbehandelten Prüfkörpern. Die Oberflächenrauheit war zwischen acetylierten und unbehandelten Proben vergleichbar. PRF und PUR wiesen zudem günstigere Benetzungsverhalten (Kontaktwinkel) auf – insbesondere PUR zeigte Kontaktwinkel ähnlich zu unbehandeltem Holz.

Die Untersuchungen zeigten, dass acetyliertes Buchenfurnierschichtholz eine erhöhte Darrdichte aufweist. Nach einem Kochwechseltest lagen die Dichten von acetyliertem und unbehandeltem Material auf vergleichbarem Niveau. Es gibt mehrere mögliche Erklärungen für die vergleichbaren Dichten nach dem Kochwechseltest. Unbehandeltes Holz nimmt deutlich mehr Wasser in der Zellwand auf und quillt dadurch stärker als acetyliertes LVL. Das führt zu einem höheren Volumen und somit zu einer geringeren Dichte. Acetyliertes Holz hingegen zeigt eine deutlich reduzierte Volumenquellung und nimmt weniger Wasser in der Zellwand auf; auch im Lumen ist die Wasseraufnahme möglicherweise leicht reduziert. Trotz höherer Masse durch die chemische Modifikation bleibt das Volumen nahezu konstant. Deshalb kann sich die Dichte von acetyliertem und unbehandeltem Material nach dem Kochwechseltest angleichen – nicht wegen vergleichbarer Wasseraufnahme, sondern aufgrund der Kombination aus Massenzunahme und Dimensionsstabilität bei acetyliertem Holz.

Auf Basis dieser Ergebnisse werden für zukünftige Keilzinkenverklebungen PRF und PUR als geeignete Klebstoffsysteme empfohlen. Detaillierte Ergebnisse sind in Publikation VI veröffentlicht.

Flächenverklebung:

Die Flächenverklebung wurde an 10 mm dicken LVL-Prüfkörpern durchgeführt, die paarweise miteinander verklebt wurden. Für die Bestimmung der Scherzugfestigkeit kam die EN 314-2 zur Anwendung. Auch hier zeigten PRF und PUR im Vergleich zu MUF überlegene Ergebnisse in Bezug auf Festigkeit und Holzbruchanteil. Eine signifikant reduzierte Materialfeuchte (~5 %) sowie eine leicht erhöhte Oberflächenhydrophobie und pH-Werte (Abbildung 10) auf acetylierten Oberflächen konnten dokumentiert werden. Dies deutet auf eine veränderte Oberflächenchemie infolge der Acetylierung hin.

Die Darrdichte der acetylierten Prüfkörper war erneut leicht erhöht. Zudem wurde eine deutlich reduzierte Materialfeuchte (ca. 5 %) gegenüber den unbehandelten Prüfkörpern (ca. 11 %) bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte festgestellt.

Die Untersuchungen der Schälrisse lieferten nur begrenzte Erkenntnisse, da die Risse unregelmäßig auftraten und in unterschiedlichen Tiefen lagen. Nach der Heißpressung (siehe nächstes Kapitel) waren sie zudem bereits mit Klebstoff gefüllt, was die Analyse zusätzlich erschwerte. Zudem wurden auch die geschlossenen

Seiten miteinander verklebt. Es ist jedoch denkbar, dass sich die Rissbreite durch Quellen verändert. Einerseits können die Risse durch das Quellen größer werden, andererseits könnte das Quellen der Zellwände sie auch wieder schließen.

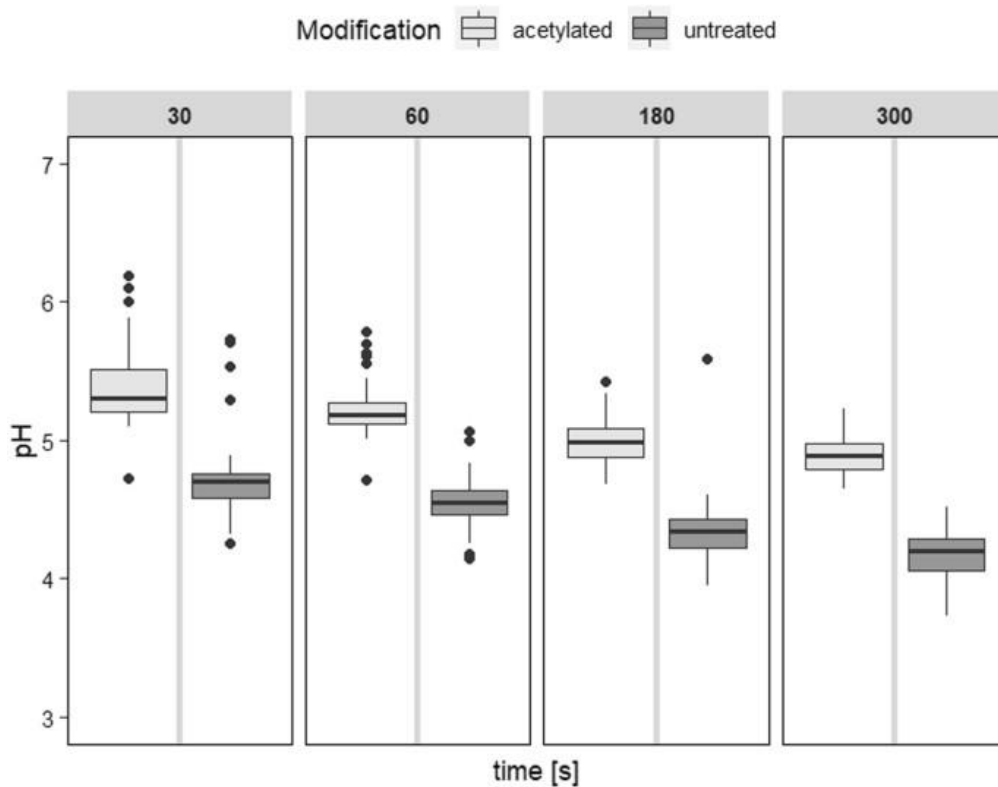


Abbildung 10: pH-Wert auf acetylierten und unbehandelten Oberflächen

Die Dynamic Vapour Sorption (DVS) Ergebnisse sind in AP2.1 zu finden, da dort der Einfluss der Klimatisierung auf die Materialfeuchte untersucht wurde.

Für weiterführende Flächenverklebungsversuche, insbesondere hinsichtlich der Delaminationsbeständigkeit, wurden PRF und PUR bevorzugt. Delaminationsversuche wurden an acetyliertem LVL durchgeführt (siehe AP4).

Fluoreszenzmikroskopische Analysen zeigten die Penetration von MUF, PRF und PUR in acetyliertes (Abbildung 12) sowie unbehandeltes (Abbildung 11) Furnierschichtholz. Die Eindringtiefe war allerdings uneinheitlich, wodurch keine direkte Korrelation zur Verklebungsgüte abgeleitet werden konnte. Die Rauheitsmessungen sowie pH-Analysen ergänzen das Gesamtbild der modifizierten Oberflächeneigenschaften. Jedoch konnten auch hier keine direkten Effekte der Acetylierung auf die Verklebung nachgewiesen werden.

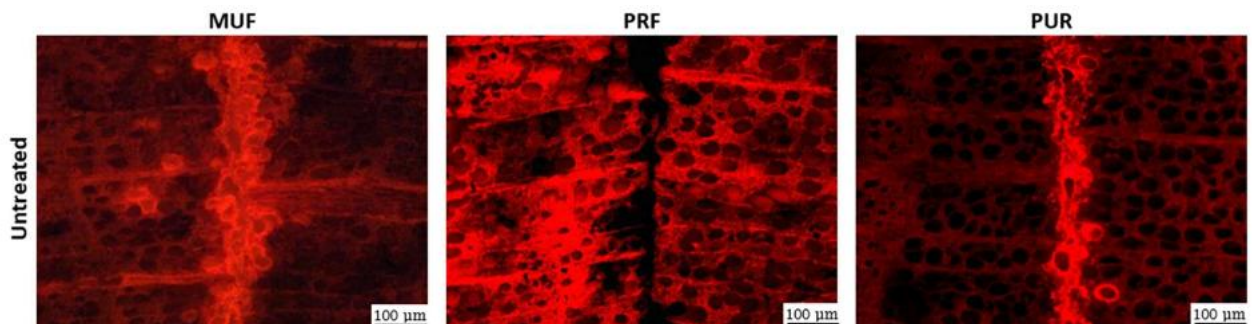


Abbildung 11: Fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen von MUF, PRF, und PUR Klebstoff an unbehandeltem Buchenfurnierschichtholz

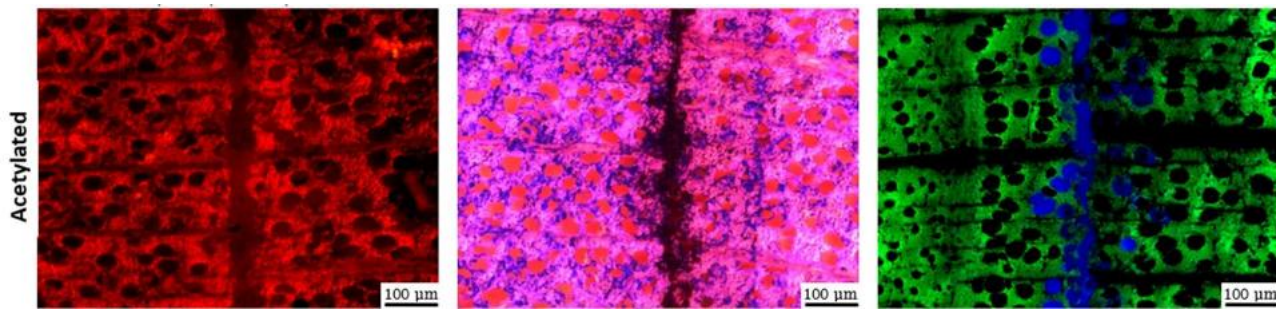


Abbildung 12: Fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen von MUF, PRF, und PUR Klebstoff an acetyliertem Buchenfurnierschichtholz

Abweichend vom ursprünglichen Forschungsantrag wurden die Delaminationsbeständigkeit sowie die Blockscherversuche (trocken und nass, in Anlehnung an EN 14080) nicht an acetylierten Vollholzprüfkörpern durchgeführt. Stattdessen erfolgte die Prüfung an acetyliertem Furnierschichtholz (LVL). Untersucht wurden dabei die Delaminationsbeständigkeit (siehe AP 4), Zugscherfestigkeiten sowie der Holzbruchanteil. Wie zuvor beschrieben, wurden heißgepresste LVL-Platten zu Trägern weiterverklebt, wodurch eine Anpassung der Prüfkörpergeometrie entfiel. Die Prüfkörper unterscheiden sich in Dicke (EN 302-1 10 mm und EN 314-1 ungefähr 20 mm) und Klebefläche (EN 302-1 10 x 20 mm und EN 314-1 25 x 25 mm), was eine Adaption der Prüfkörpergeometrie ersparte. Darüber hinaus kann bei modifiziertem Furnierschichtholz von einer weitgehend homogenen Acetylierung vom Kern bis zur Oberfläche ausgegangen werden. Weitere Ergebnisse sind in Arbeitspaket 3.2 und 4 dokumentiert.

AP 3.2: Heißverklebung

Ein Laborversuch mit variierenden Pressdrücken zeigte, dass acetyliertes Buchenfurnierschichtholz im Vergleich zu unbehandelten Referenzen deutlich weniger zur Verdichtung neigt. Diese reduzierte Verdichtung während der Heißverpressung ist vermutlich auf die geringere Materialfeuchte und Größe der Acetylgruppen der acetylierten Furniere zurückzuführen. Dennoch wies das acetylierte LVL trotz geringerer Verdichtung eine höhere Dichte auf als die Referenzen. Dies lässt sich durch die Massezunahme infolge der chemischen Modifikation im Rahmen der Acetylierung erklären. Detaillierte Ergebnisse zur Verdichtung und Materialfeuchte sind in Publikation III zu finden.

Ebenfalls ist die Materialfeuchte von Buchenfurnierschichtholz infolge der Acetylierung deutlich reduziert. Auch nach Wasserlagerung und Durchführung eines Kochwechselltests zeigte acetylierte LVL eine signifikant geringere Feuchteaufnahme im Vergleich zu unbehandeltem Material.

Bei den Verklebungsversuchen erzielten PRF-Klebstoffe (Abbildung 13) gegenüber PF-Klebstoffen (Abbildung 14) insgesamt bessere Ergebnisse hinsichtlich Scherzugfestigkeit und Holzbruchanteil, was auf eine Adhäsion hinweist. Acetylierte und unbehandelte Buchenfurnierschichtholzplatten (in verschiedenen Dimensionen verklebt mit einem PF-Klebstoff) zeigten einen hohen Holzbruchanteil nach einem Kochwechselltest und Prüfkörperspaltung (nur Holzbruchanteil) in Anlehnung an EN 14374:2004. Dies deutet auf eine gute Verklebung hin.

Ein industrieller Versuch bei Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH wurde ebenfalls durchgeführt. Die Furniere wurden dabei beidseitig mit Phenolharz benetzt und bei etwa 90 °C vorgetrocknet und anschließend in Kirchhundem in einer 12-Etagen-Presse heiß verpresst. Hierzu wurden sie zwischen zwei mit Öl befeuchteten Metallpressplatten positioniert, um ein Anhaften des Klebstoffs zu vermeiden. Nach einer 10-minütigen Aufheizphase folgte ein 30-minütiger Pressvorgang bei 150 °C sowie eine etwa 60-minütige Abkühlphase auf ca. 30–50 °C. Die so hergestellten Platten (siehe Tabelle 1) wurden anschließend formatiert und kalibriert.

Dabei zeigten sich einige Optimierungspotenziale:

- Einige Platten waren leicht verzogen; künftig sollte daher auf das „Stürzen“ der Furniere geachtet werden.
- Um die gewünschte Zieldicke beim Kalibrieren sicher zu erreichen, empfiehlt sich eine leicht erhöhte Furnieranzahl pro Platte (z. B. 1–2 Furniere mehr).
- Acetylierte Furniere zeigen im Vergleich zu unbehandelten kaum oder gar keine Verdichtung, was mit den Ergebnissen früherer Vorversuche übereinstimmt.



Abbildung 13: Prüfkörper (acetyliertes Buchen-LVL verklebt mit PRF-Klebstoff) nach Prüfung der Längszugscherfestigkeit in Anlehnung an EN 314-2 nach Kochwechselfest (1), Wasserlagerung (2) und Konditionierung bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte (3)

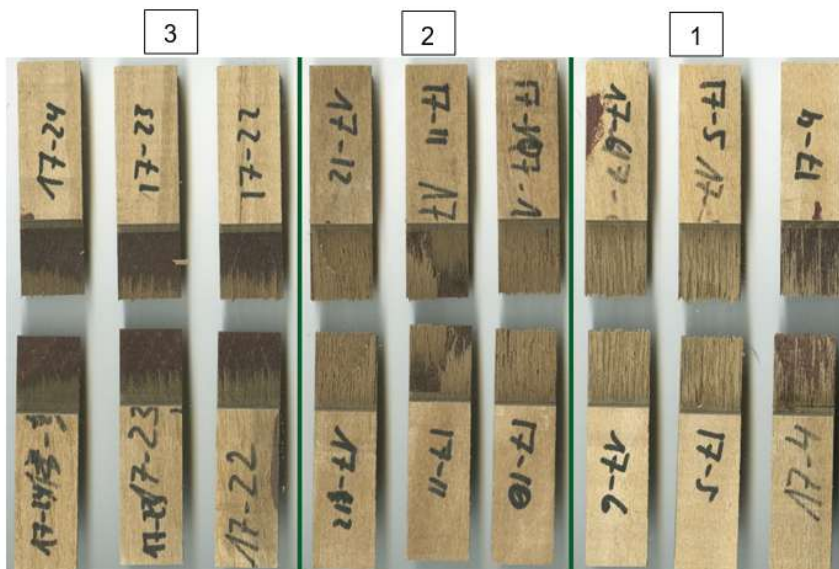


Abbildung 14: Prüfkörper (acetyliertes Buchen-LVL verklebt mit PF-Klebstoff) nach Prüfung der Längszugscherfestigkeit in Anlehnung an EN 314-2 nach Kochwechselfest (1), Wasserlagerung (2) und Konditionierung bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte (3)

Die Ergebnisse zum Rücksprungeffekt und zur Anti-Swelling-Efficiency (ASE) belegen, dass acetyliertes Buchenfurnierschichtholz nach der Heißverpressung nur einen sehr geringen Rücksprung zeigt. Zudem wurde eine ASE im Bereich von 70–80 % ermittelt, was auf eine deutlich verbesserte Dimensionsstabilität hinweist. Die detaillierten Resultate sind in Publikation XII dokumentiert.

De-Acetylierung:

Es bestanden mögliche Bedenken hinsichtlich der Stabilität acetylierter Hölzer bei erhöhten Temperaturen – insbesondere während thermisch anspruchsvoller Prozesse wie der Heißverpressung zur Herstellung von Produkten wie Furnierschichtholz (LVL). Bei Temperaturen um 150 °C könnten die eingelagerten Acetylgruppen abgespalten werden („De-Acetylierung“), wodurch erneut Sorptionsstellen für Wasser entstehen würden. Dies könnte die Feuchteaufnahme des modifizierten Holzes erhöhen.

In Publikation II wurde daher untersucht, wie sich eine Heißverpressung bei 150 °C auf die Stabilität von acetylierter Buche – sowohl als Furnier als auch im LVL-Verbund – auswirkt. Die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) zeigte, dass die chemische Zusammensetzung der acetylierten Furniere nach der Wärmebehandlung unverändert blieb (Abbildung 15). Ergänzende Analysen mittels dynamischer Dampfsorption (DVS) (Abbildung 4) sowie Langzeitlagerung über gesättigten Salzlösungen in Klimakammern (Abbildung 16) deuteten ebenfalls nicht auf eine De-Acetylierung hin, da sich das sorptive Verhalten nicht

veränderte. Die Anzahl an Hydroxylgruppen der hitzebehandelten Proben war vergleichbar mit jenen unbehandelten Referenzen (Abbildung). Dies deutet ebenfalls auf keine Deacetylierung hin.

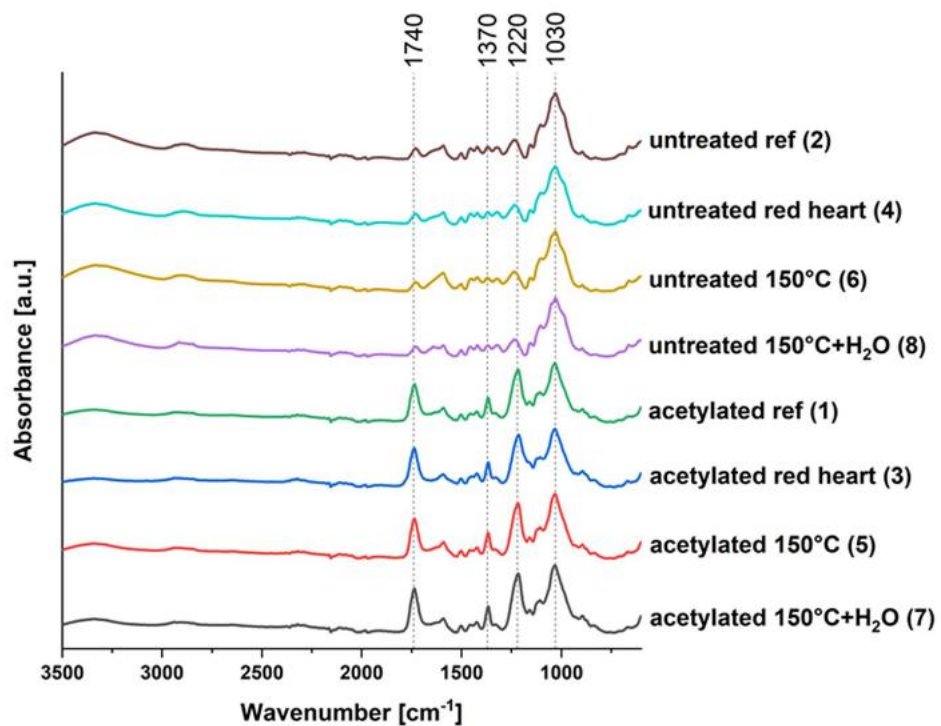


Abbildung 15: FT-IR Spektren von heiß verpresstem acetyliertem Furnier und Referenzen

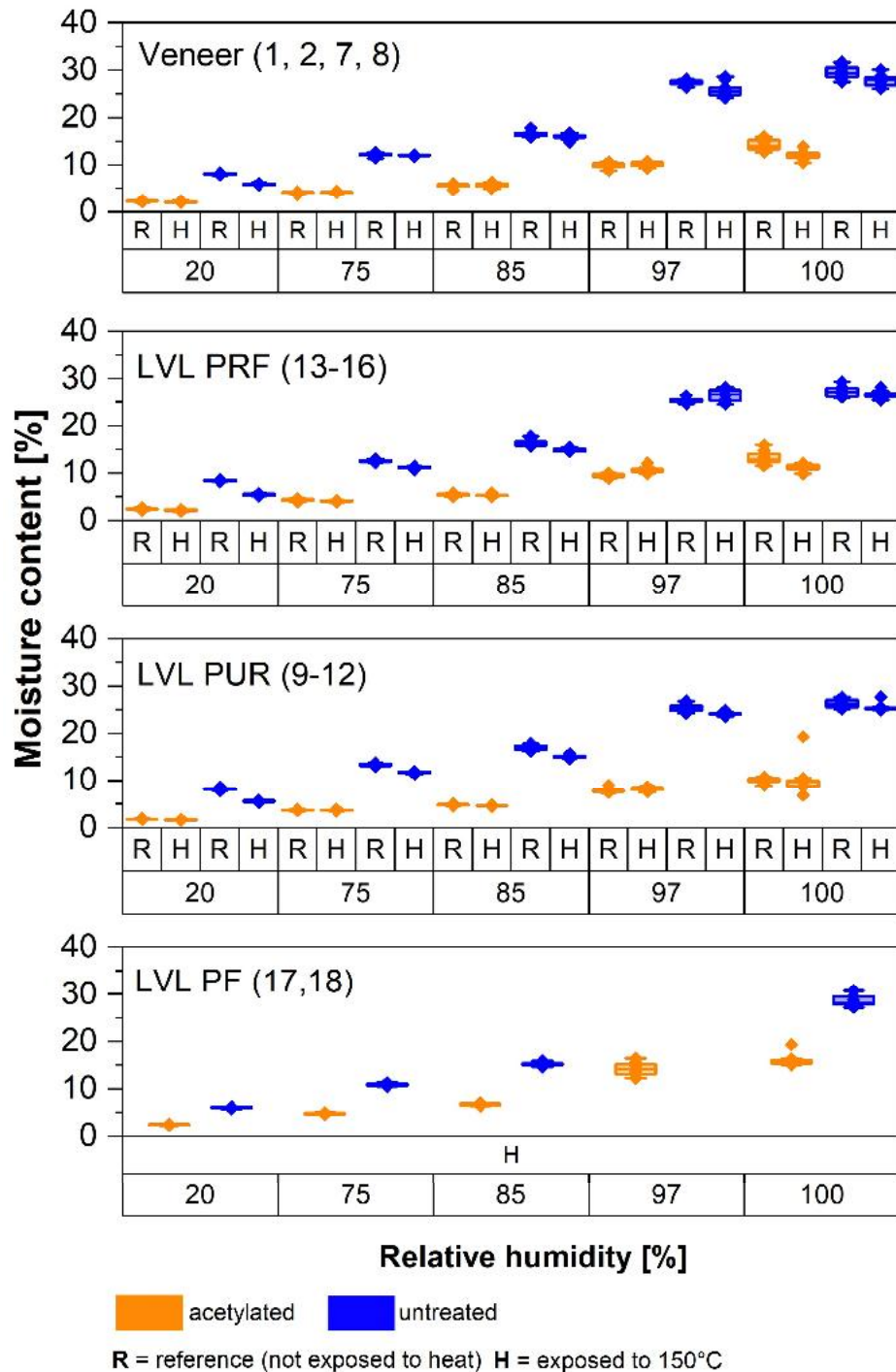


Abbildung 16: Materialfeuchte von acetyliertem Buchenfurnierschichtholz verklebt mit PRF und PUR-Klebstoff (heiß und kalt verklebt). Acetyliertes Buchenfurnierschichtholz wurde mit PRF und PUR-Klebstoff heiß und kalt verklebt. Im Anschluss wurden die Prüfkörper in ausgewählten Klimabedingungen auf ihre Ausgleichsfeuchte untersucht. Die Ergebnisse, zeigten keinen Unterschied in der Materialfeuchte zwischen heiß- und kaltverklebt verarbeiteter acetylierter LVL. Es lässt sich jedoch eine deutlich reduzierte Materialfeuchte des acetylierten LVL im Vergleich zu unbehandeltem Material feststellen.

Der Extraktstoff-, Holozellulose-, Cellulose-, Lignin Gehalt von heißgepressten und nicht heißgepressten acetylierten Furnieren wurde untersucht. Diese Analyse lieferte jedoch keine aussagekräftigen Ergebnisse, was vermutlich auf die angewandte Methodik zurückzuführen ist.

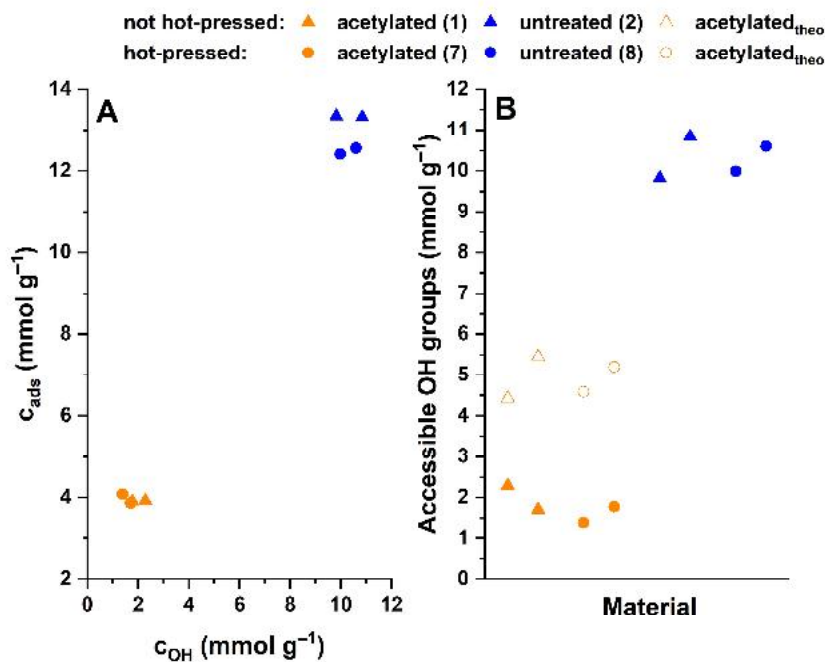


Abbildung 17: Hydroxylgruppen von heiß verpresstem acetyliertem Furnier und Referenzen. Die Menge der verfügbaren Hydroxylgruppen wurde an acetylierten Proben, sowohl nachbehandelt bei 150°C als auch unbehandelt, sowie an Referenzproben gemessen. Die Ergebnisse zeigten keinen Unterschied zwischen heißgepresstem und nicht heißgepresstem Material. Allerdings wies das acetyliert behandelte Material deutlich weniger verfügbare Hydroxylgruppen auf im Vergleich zu unbehandeltem Buchenfurnier. Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer STSM an der Aalto Universität in Finnland durchgeführt.

Abweichend vom ursprünglichen Forschungsantrag wurden die Delaminationsbeständigkeit sowie die Blockscherversuche (trocken und nass, in Anlehnung an EN 14080) nicht an acetylierten Vollholzprüfkörpern durchgeführt. Stattdessen erfolgte die Prüfung an acetyliertem Furnierschichtholz (LVL). Untersucht wurden dabei die Delaminationsbeständigkeit, Zugscherfestigkeiten sowie der Holzbruchanteil. Wie zuvor beschrieben, wurden heißgepresste LVL-Platten zu Trägern weiterverklebt, wodurch eine Anpassung der Prüfkörpergeometrie entfiel. Darüber hinaus kann bei modifiziertem Furnierschichtholz von einer weitgehend homogenen Acetylierung vom Kern bis zur Oberfläche ausgegangen werden. Weitere Ergebnisse zur Delaminationsbeständigkeit und zum Holzbruchanteil sind in Arbeitspaket 4 dokumentiert.

Arbeitspaket 4: Herstellung von Buchenfurnierschichtholzlamellen (Militz; TV 2)

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den AP 3.1 und 3.2 wurden im weiteren kleinere Mengen mehrlagige Träger hergestellt. Etwa 2 Meter lange Träger aus acetyliertem Buchenfurnierschichtholz sowie Referenzen wurden in Labormaßstab in Göttingen angefertigt, um den Herstellungsprozess auf Praxistauglichkeit abzuschätzen und dienen als Anschauungsmaterial. Die industrielle Herstellung von acetyliertem LVL war ebenfalls möglich.

Eine Längsverklebung zur Herstellung der 2m langen Furnierschichtholzträger war nicht notwendig, wurde aber im kleinen Maßstab in AP 3.1 (siehe Keilzinkung) durchgeführt.

Eine reine Kaltverklebung mit PRF von Furnier zu Furnierschichtholzträgern (ohne Heißpressung zu Platten) wurde versucht, jedoch abgebrochen, da ein Furnierschichtholzträger von 100mm Dicke circa 40 Lagen Furnier (2,5 mm) braucht. Diese 40 Lagen innerhalb von 90 Minuten Topzeit gleichmäßig mit einer Handrolle mit PRF einzustreichen war nicht möglich. Jedoch wurden Furnierschichthölzer (4 Lagen 500 x 500 mm) mit reiner Kaltverklebung in AP 3.2 für die Untersuchung der De-Acetylierung hergestellt. Dies hat problemlos funktioniert. Deshalb ist davon auszugehen, dass ein industrieller Prozess mit PRF-Verklebung von Furnier zu Furnierschichtholzträger möglich ist.

Ein Delaminierungstest von acetyliertem Buchenfurnierschichtholz in Anlehnung an EN 14080 wurde durchgeführt.

Aufgrund der begrenzten Menge an verfügbarem Probenmaterial und des praxisnahen Forschungsansatzes wurde die Delaminierungsprüfung in Anlehnung an EN 14080, Verfahren B, durchgeführt und nicht in Anlehnung an EN 302-2. Hierfür wurden LVL-Träger mit den Abmessungen 500 x 250 x 110 mm aus 50 mm dicken industriell gefertigten LVL-Platten hergestellt. Die Verklebung der Platten zu Trägern erfolgte im Labor unter Verwendung eines PUR-Klebstoffs (Henkel AG & Co. KGaA) ohne Primer, gemäß den Herstellerangaben. Pro Material wurden drei Träger jeweils mit drei 75 mm dicken Abschnitten einem Delaminierungstest unterzogen. Zwei unbehandelte sowie zwei acetylierte Träger zeigten keine Delaminierung (0 %). Ein unbehandelter Träger wies eine mittlere Gesamtdelaminierung von 8,8 % (SD 2,7)

mit einer maximalen Delaminierung von 19 % auf. Ein acetylierter Träger erreichte eine mittlere Gesamtdelaminierung von 7,5 % (SD 3,5) bei einem Maximalwert von 23,1 %.

Obwohl die maximale Delaminierung jeweils unter dem Grenzwert von 30 % gemäß EN 14080 Abschnitt 5.5.5.2.2 lag, überschritten die mittleren Gesamtdelaminierungswerte dieser beiden Träger den zulässigen Höchstwert von 4 % laut EN 14080, Tabelle 9.

Zusammenfassend erfüllen zwei acetylierte und zwei unbehandelte Träger die Anforderungen der Norm. Jeweils ein acetylierter und ein unbehandelter Träger entsprachen den Anforderungen hingegen nicht. Dies lässt auf potenzielle Unregelmäßigkeiten im Verarbeitungsprozess schließen. Weitere Untersuchungen zur Delaminierung wären zur Klärung notwendig gewesen, konnten jedoch aufgrund begrenzten Probenmaterials nicht durchgeführt werden.

Blockscherversuche unter trockenen und nassen Bedingungen gemäß EN 14080 konnten aufgrund unzureichenden Probenmaterials nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurde die Zugscherfestigkeit an Prüfkörpern – sowohl heiß- als auch kaltverklebt – in Anlehnung an EN 314-2 ermittelt. Zusätzlich wurde der Holzbruchanteil an diesen PK bestimmt (siehe AP3).

Zur Beurteilung der Verklebungsqualität wurde der Holzbruchanteil ferner an industriell hergestelltem LVL (ca. 100 × 75 × 50 mm) in Anlehnung an EN 14374:2004 untersucht. Die Prüfkörper wurden einem Kochwechsellast unterzogen und anschließend in Längsrichtung mit Hammer und Beitel gespalten. Die Bewertung des Holzbruchanteils erfolgte gemäß EN 314-1.

Sowohl bei acetyliertem als auch bei unbehandeltem LVL lag der Holzbruchanteil bei allen Prüfkörpern über oder mindestens 70 %, was auf eine ausreichend gute Verklebung hinweist. Es ist jedoch zu beachten, dass die Beurteilung des Holzbruchanteils eine gewisse Subjektivität beinhaltet.

Dauerhaftigkeit

Weiß- und Braunfäule: Sechs Materialien (acetyliertes Buchen-Furnierschichtholz, unbehandeltes Buchen-Furnierschichtholz, Buchen-Massivholz, Kiefernspiltholz (*Pinus sylvestris* L.), Lärche (*Larix decidua* Mill.) 3-Schicht-Platte, Lärchen-Massivholz) wurden mit drei Probengeometriedesigns (50 × 25 × 15 mm sowie 50 × 50 × 19 mm mit und ohne versiegelten Kanten) gegen *Coniophora puteana*, *Rhodonia placenta*, *Gloeophyllum trabeum*, *Trametes versicolor* und *Pleurotus ostreatus*. Die Prüfkörper wurden vorab ausgewaschen (EN 84). Die Dauerhaftigkeitsbewertung erfolgte anhand des arithmetischen Mittels und des mittleren prozentualen Massenverlusts (ML), des relativen ML (x-Wertes) und des Zerfallsanfälligkeitsindex (DSI). Acetyliertes LVL erreichte dabei immer die beste Dauerhaftigkeitsklasse (DC 1).

Erdkontakt: Acetyliertes Buchen-LVL und Referenzen werden in Anlehnung an EN 252 getestet. Die Prüfkörper befinden sich auf einem Testfeld in Göttingen, ferner in Stamsmåla, Schweden. Der Test startete im Mai 2022. Eine erneute Evaluierung in diesem Jahr zeigte, dass die Referenzen größtenteils ausgefallen sind und es wurde kein Pilzbefall an acetylierten Prüfkörpern entdeckt.

Moderfäule:

Die Dauerhaftigkeit gegen Moderfäuleerreger wurde nach CEN/TS 15083-2 (2005) geprüft. Dazu wurden die Prüfkörper zu 80% (der Länge nach) in Kunststoff-Boxen mit einer Kompost-Sand-Mischung mit einem Bodenfeuchtegehalt von ungefähr 57% in das Bodensubstrat eingesetzt. Der Masseverlust vor und nach der Exposition wurde ermittelt und normgerecht bewertet (siehe Tabelle E.1 im Standard). Dazu wurde der x-Wert berechnet:

$x = \text{Median Masseverlust der acetylierten Prüfkörper} / \text{Median Masseverlust der unbehandelten Prüfkörper}$

Zwei Prüfkörpergeometrien mit dünnen (1,3 mm) und dicken (2,4 mm) Furnieren wurden für acetyliertes und unbehandeltes LVL verwendet (Tabelle 2). Während 100 mm (ax.) x 10 mm x 5 mm die von der Norm vorgeschriebene Prüfkörpergröße ist, wurden zusätzlich Prüfkörper mit den Abmessungen 100 mm (ax.) x 20 mm x 20 mm getestet, um die ursprüngliche Dicke von 20 mm nach der Herstellung des LVL beizubehalten.

Tabelle 1: Prüfkörper für die Moderfäuleprüfungen; l = longitudinal, t = tangential, r = radial, DC = Dauerhaftigkeitsklasse

Material	Prüfkörpergeometrie l x t x r [mm]	x-Wert	DC
LVL acetyliert (2,4 mm)	100x20x20	0,00	1
LVL acetyliert (1,3 mm)	100x20x20	0,01	1
LVL acetyliert (2,4 mm)	100x10x5	-0,04	1
LVL acetyliert (1,3 mm)	100x10x5	-0,02	1
LVL unbehandelt (2,4 mm)	100x20x20	0,65	4
LVL unbehandelt (1,3 mm)	100x20x20	1,19	5
LVL unbehandelt (2,4 mm)	100x10x5	1,21	5

LVL unbehandelt (1,3 mm)	100x10x5	1,40	5
Buche Vollholz	100x20x20	1,66	5
Buche Vollholz	100x10x5	1,85	5

Eine deutlich erhöhte Dauerhaftigkeit der acetylierten Prüfkörper (DC 1) im Vergleich zu unbehandelten Prüfkörpern wurde festgestellt

Meerwasser: Um das Material unter anspruchsvollen marinen Bedingungen zu testen, wurde ein Versuch in der Gebrauchsklasse 5 (UC5) durchgeführt. Ein Testfeld in der Ostsee bei Hejlsminde, Dänemark (55° 21' N, 9° 36' E) wurde dafür ausgewählt, und der Test basiert auf der Norm EN 275 (1992). Acetyliertes LVL und unbehandelte Proben (200 x 75 x 20 mm; n=6) wurden 2021 ausgesetzt und wurden jährlich mittels Röntgenscanning analysiert. Auch Auswertung im dritten Jahr zeigte keinen Befall an acetyliertem LVL, während die Referenz bereits nach einjähriger Exponierung im Meerwasser ausgefallen war (Abbildung 19).

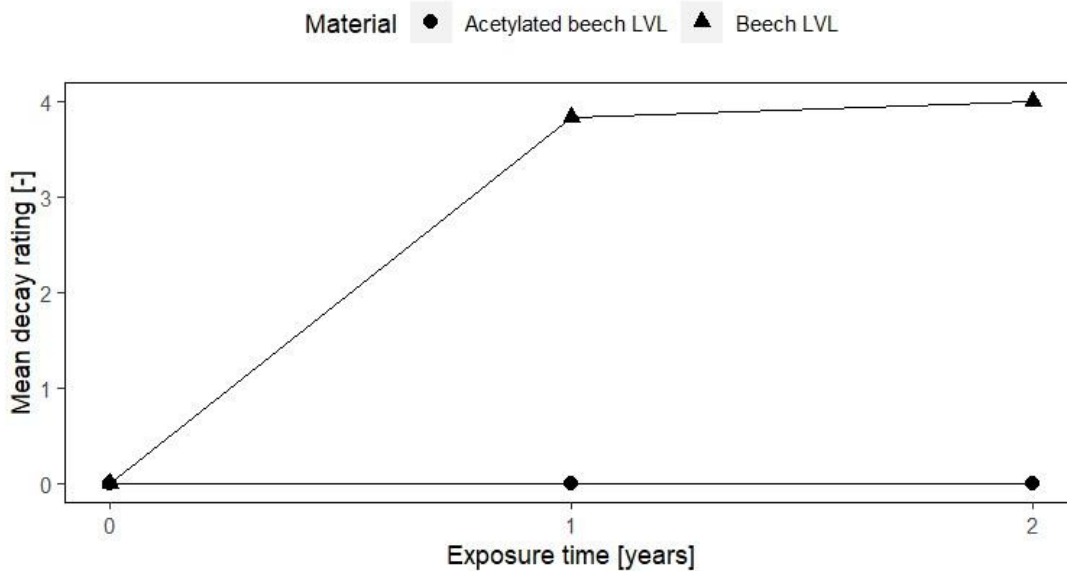


Abbildung 18: Mittelwert Befallsbewertung [1-4] von acetyliertem Buchen-LVL und unbehandeltem LVL



Abbildung 195: Röntgenaufnahmen von acetyliertem Buchen-LVL nach dreijähriger Bewitterung (links) sowie von unbehandeltem Buchen-LVL nach einjährigem Kontakt im Meerwasser (rechts).

Bewitterung von LVL-Platten

Ebenfalls wurden LVL-Platten künstlich und natürlich bewittert.

Die künstliche Bewitterung wurde durch einen zyklischen Test (4 Stunden UV-Strahlung, 4 Stunden Wassersprühung, 4 Stunden trocknen bei Raumbedingungen) über einen Zeitraum von 10 Wochen durchgeführt. Die Prüfkörper wurden vor und nach dem Schnelltest gescannt (siehe Tabelle 2). Die modifizierten Prüfkörper zeigten eine leichte Vergrauung der Oberfläche. Teilweise wurde leichter Schimmelbefall auf der Oberfläche festgestellt und ein Prüfkörper neigte auch zur Rissbildung in radialer Richtung (nicht dargestellt.). Die unbehandelten LVL-Prüfkörper zeigten starke Delamierung, Rissbildung und starken Pilzbefall auf der Oberfläche.

Acetyliert		Unbehandelt	
Unbewittert	Bewittert	Unbewittert	Bewittert
Radialfläche			
Ace 1 	Ace 1 	Ref 1 	Ref 1 
Tangentialfläche			
Ace 4 Ace 5 Ace 6 	Ace 4 Ace 5 Ace 6 	Ref 4 Ref 5 Ref 6 	Ref 4 Ref 5 Ref 6 

Tabelle 2: Scans acetylierter und unbehandelter Prüfkörper in Tangential- und Radialfläche vor und nach einer 10-wöchigen Schnellbewitterung

Die ursprüngliche Idee ganze Träger mit Verbindungsmitteln zu verwenden konnte aufgrund von zu wenig Probenmaterial nicht durchgeführt werden. Daher wurden LVL Prüfkörper (circa 500 x 100 x 50 mm) mit verschiedenen Feuchtefallen („Nut und Zapfen“, 45° Abschrägung am Stirnende sowie ein Loch (25 mm Durchmesser)) hergestellt. Dabei wurde auf keinen Standard zurückgegriffen. Die LVL-Prüfkörper (acetyliert und unbehandelt) wurden in horizontaler Position auf dem Testfeld in Göttingen (vgl. oben) exponiert und können jährlich begutachtet werden. Die natürliche Bewitterung wurde im Mai 2025 gestartet.



Abbildung 20: Acetylierte und unbehandelte LVL Bauteile zu Freibewitterung im Außenbereich (Start Mai 2025).

Arbeitspaket 5: Dauerfestigkeit von Buchenfurnierschichtholzlamellen

Arbeitspaket 5.1: Einfluss des Umgebungsklimas auf die Kurz- und Langzeitfestigkeit in den Nutzungsklassen 1,2 und 3 von LVL-Brettern (Graf, TV 1)

In Anlehnung an DIN EN 408 wurden aus acetylierten und nativen Brettern sowie aus LVL Platten Prüfkörper hergestellt und im Normalklima (20°C; 65% rH) klimatisiert. Da die Dicken der LVL innerhalb einer Platte schwankten wurde diese durch schleifen egalisiert. Die Biegeprüfungen wurden bei verschiedenen Lagerungsbedingungen trocken (20°C/40%rH) normal (20°C/65%rH), feucht (20°C/95%rH) und nass (Wasserlagerung) durchgeführt, um das Verhalten bei verschiedenen Klimabedingungen zu simulieren. Die Bedingungen trocken bis feucht wurden im Klimaschrank realisiert, die Lagerbedingung nass wurde im Autoklav mit 2 Zyklen der Wässerung und Lagerung im Wasserbad bis zur Biegeprüfung umgesetzt.

Die Biegeprüfungen erfolgten im 4-Punkt Biegeversuch an einer 50 kN Prüfmaschine im T-Lab der RPTU.

Die hohen Festigkeitswerte der nativen LVL-Lamellen im Trocken- und Normalklima gegenüber den acetylierten Lamellen lässt sich damit erklären, dass die Platten der ersten Charge mit einem hohen Pressdruck verpresst wurden, eine höhere Rohdichte erzielten (nativ 0,85 g/cm³, acetyliert 0,80 g/cm³) und damit höhere Festigkeitswerte erreicht werden konnten. Damit waren auch höhere Biegefestigkeiten zu erwarten.

Die charakteristischen Biegefestigkeiten sind beispielhaft für die LVL-Lamellen in Abbildung 21 dargestellt.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die charakteristischen Biegefestigkeitswerte der LVL-Lamellen in hohen feuchten Umgebungsbedingungen ihre hohen Festigkeitswerte beibehalten.

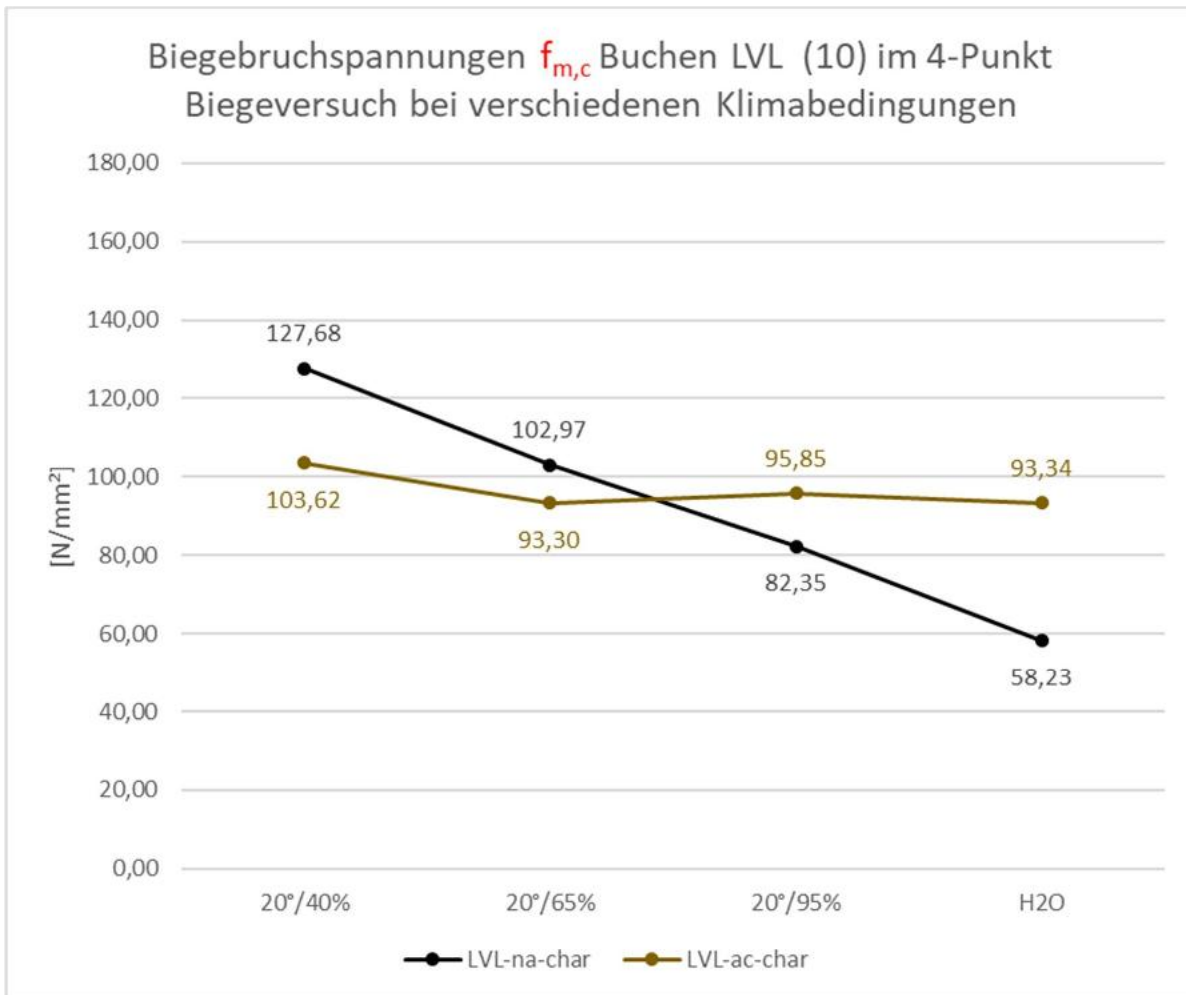


Abbildung 21: Verlauf der charakteristischen Biegebruchspannungen bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen. Bei den nativen LVL-Lamellen (schwarze Linie) ist eine deutliche Festigkeitsreduktion von trocken zu nass zu verzeichnen. Die Reduktion bei den acetylierten Lamellen (braune Linie) ist deutlich geringer und bleibt im feuchten und nassen Bereich auf einem vergleichbaren Niveau.

Arbeitspaket 5.2: Delaminierung und Blockscherversuche (Graf, TV 1)

Ergänzend zu den Untersuchungen in Göttingen wurden mit einen neuen, für Laubhölzer geeigneten PU Klebstoff Delminierungs- und Blockscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 durchgeführt. Dabei wurden Vorbehandlungen der Prüfkörper mit Wasser und einem Primer variiert. Die besten Ergebnisse ohne Delaminierungen wurden bei den acetylierten LVL Lamellen mit Primervorbehandlung erzielt. Bei einigen Prüfkörpern wurde eine Kavernenbildung in der Klebschicht festgestellt. Hier besteht in der Verarbeitung und bei den Rahmenbedingungen noch Optimierungsbedarf.

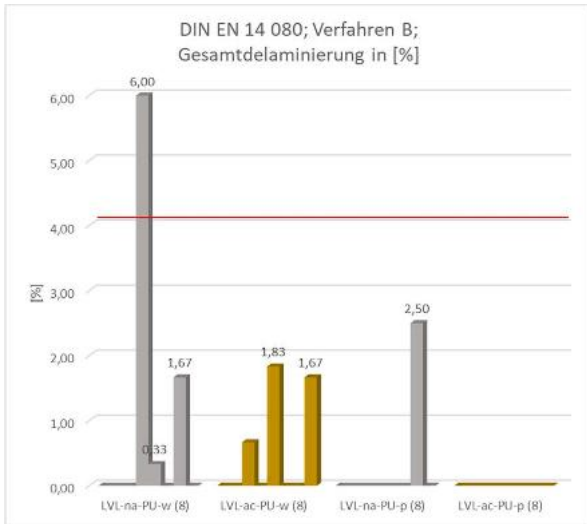


Abbildung 22: Gesamtdelaminierung von mit PU verklebten LVL Lamellen. Als Grenzwert gelten 4%.

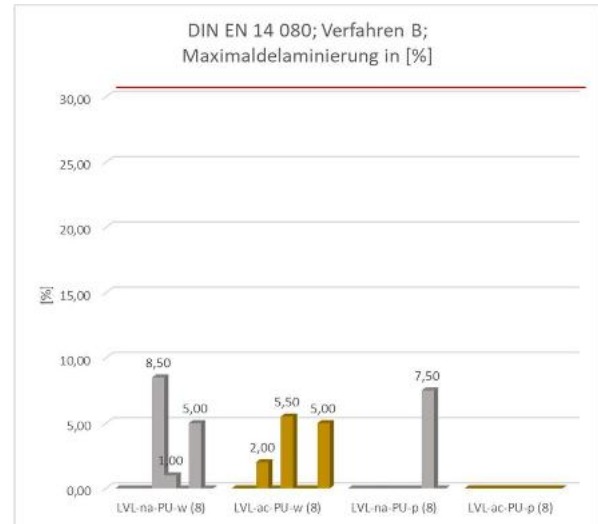


Abbildung 23: Maximaldelaminierung von mit PU verklebten LVL Lamellen. Als Grenzwert gilt hier 30%.

Für die Prüfung der Scherfestigkeiten von kaltverklebten PRF Klebefugen wurde ein modifiziertes Scherprüfgerät eingesetzt, dass die Unzulänglichkeiten von üblichen Scherprüf-einrichtungen mit den Überlagerungen von Scher- und Normalkräften reduziert.

Es zeigte sich im Vergleich zwischen nativen und acetylierten Hölzern eine höhere Scherfestigkeit von über 10% der acetylierten Hölzer.

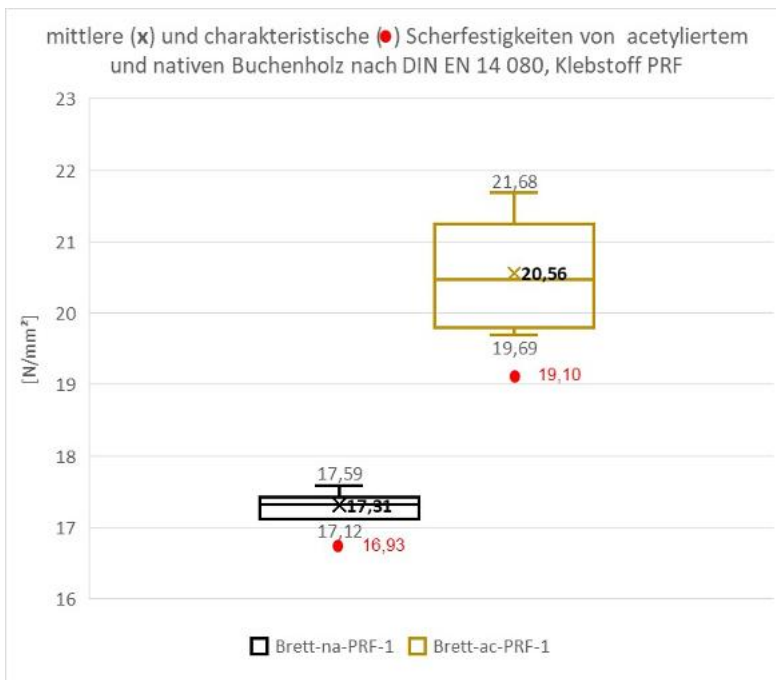


Abbildung 24: Blockscherfestigkeiten von kaltverklebtem nativem und acetylierten Buchenholz.

Arbeitspaket 5.3: Dauerlastprüfung und Kriechzahl (Graf, TV 1)

Nach den Kurzzeitversuchen zur Ermittlung des Lastniveaus wurden Langzeitversuche nach DIN EN 1156 an zwei verschiedenen Standorten: A: Unter normalklimatisierten Verhältnissen (20°C, 65% rH) im Klimaraum der RPTU;

B: im Freiland auf dem Campusgelände des Fachbereichs Biologie (Abb. 25, 26).

An beiden Standorten werden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeiten mittels Datenloggern erfasst. Die Prüfkörper mit den Abmessungen l=40 cm, b=5 cm und d=2 cm werden über Stahltraversen zur Lasteinleitung mit einer Dauerlast von 25% der Bruchlast von Kurzzeitversuchen belastet. Dafür sind Standard-Gehwegplatten mit Spanngurten an den Stahltraversen befestigt.



Abb. 25: Übersicht der Langzeitprüfungen am Standort „Biologie“.

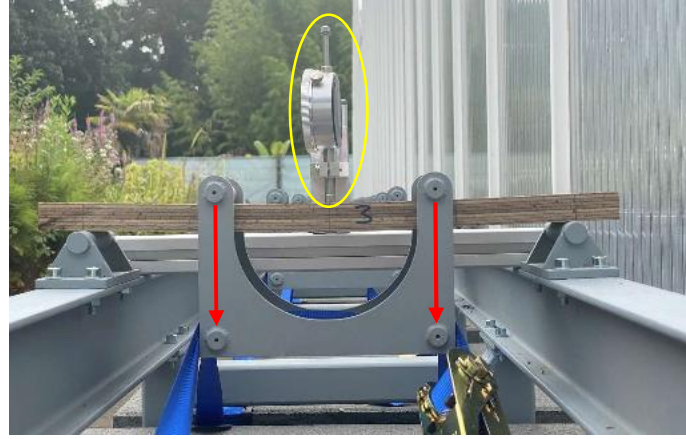


Abb. 26: Seitenansicht eines Prüfkörpers mit Lasteinleitung (Pfeile) und Messuhr (Oval).

Die Auswertungen (Abb. 27) zeigen für das angesetzte Lastniveau von 25% in der Nutzungsklasse SC1 (innen) eine Kriechzahl von $k_{c,300D,SC1,25\%}=0,30$ und in der Nutzungsklasse SC3 (außen bewittert) von $k_{c,300D,SC3,25\%}=0,70$. Ein direkter Vergleich zur BauBuche® ($k_{c,SC1}=0,6$) ist nur in Nutzungsklasse SC1 möglich, diese hat eine Zulassung bis Nutzungsklasse SC2. In den letzten ca. 60 Tagen ist ein Anstieg bei den acetylierten Prüfkörpern zu verzeichnen. Die Versuche werden auch nach Projektende weitergeführt.

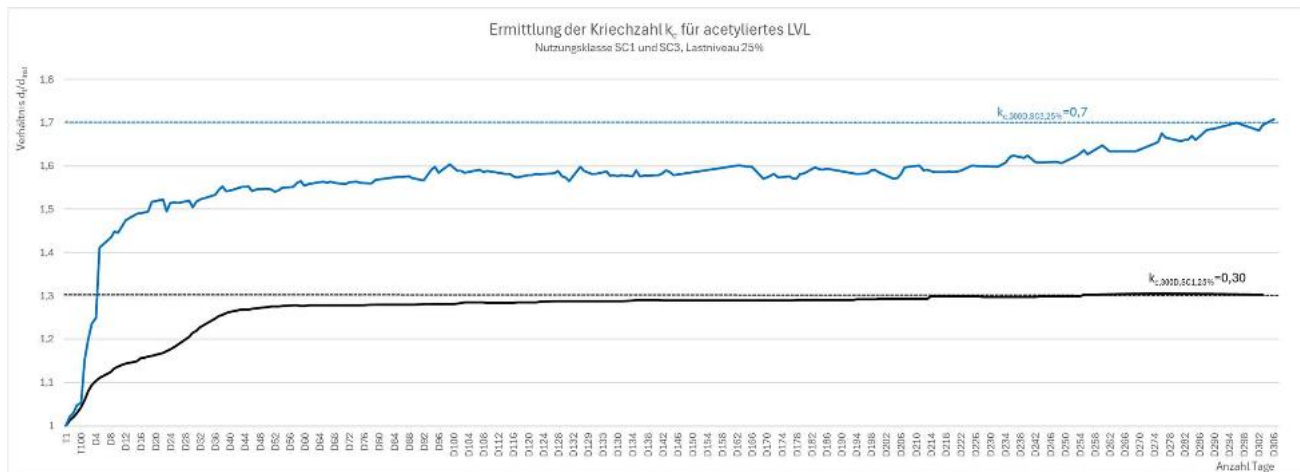


Abb. 27: Auswertung der Langzeit-versuche Innen (schwarz) und Außen (blau). Die Ergebniskurven der Mittelwerte der Prüfkörper nähern sich vorläufigen Asymptoten an, deren Ordinatenwerte die vorläufigen Kriechzahlen darstellen.

Arbeitspaket 5.4: Delaminationverhalten (Militz; TV 2)

Anmerkung: Diese Arbeiten wurden im Arbeitspaket AP 4 gemäß Forschungsantrag bearbeitet. Im dort enthaltenen, tabellarischen Arbeitsplan ist die Bearbeitung des Delaminierungsverhaltens nochmal in AP 5 aufgeführt.

Arbeitspaket 6: Trag- und Verformungsverhalten von Buchenfurnierschichtholz (Graf, TV 1)

Arbeitspaket 6.1: Homogenisierungseffekt

Für einen Aspekt der Homogenisierung wurden acetylierte LVL-Lamellen mit stehenden Furnierlagen hergestellt und mit Lamellen aus liegenden Furnieren verglichen. Im 4-Punkt Biegeversuch zeigten sich annähernd gleiche Mittelwerte, durch die Homogenisierung wurden die Streubreiten der Biegefestigkeiten bei den stehenden Lamellen deutlich reduziert. Dies zeigte sich in einer charakteristischen Festigkeitssteigerung von etwa 19% ($f_{m,k,liegend}=93,3 \text{ N/mm}^2$ auf $f_{m,k,stehtend}=110,9 \text{ N/mm}^2$).

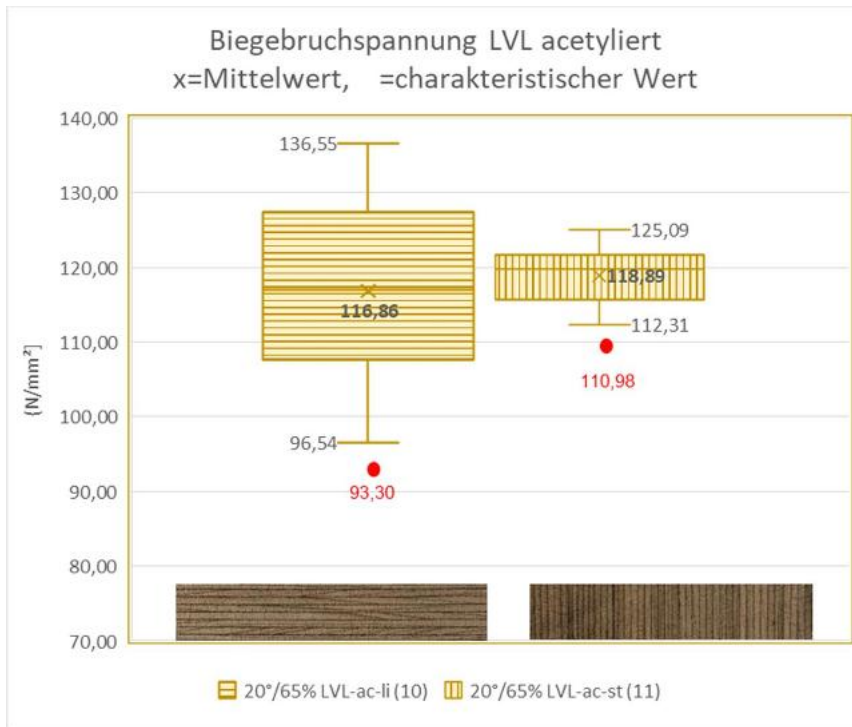


Abb. 28: Vergleich der Biegebruchspannungen im 4-Punkt Biegeversuch von Lamellen mit liegenden (links) mit stehenden (rechts) Furnieren.

Der Homogenisierungseffekt zeigt sich in einer geringen Streubreite und einer höheren, charakteristischen Biegefestigkeit bei den stehenden Lamellen

Ein weiterer Homogenisierungseffekt konnte bei den Auswirkungen der Schrägfaserigkeiten auf die Zugfestigkeiten geprüft werden. Obwohl sich die Zugfestigkeiten bei einem Last-Faserwinkel von nur 5° um ca. 45% (bei Furnieren) reduzieren (siehe Abb. 8), lagen die Zugfestigkeiten der LVL Lamellen (Abschnitt 6.2) mit $f_{t,m} = 101,73 \text{ N/mm}^2$ deutlich über denen der Einzelfurniere ohne Faserneigung $f_{t,m} = 82,45 \text{ N/mm}^2$.

Arbeitspaket 6.2: Trag- und verformungsverhalten an Kleinprüfkörpern

Biegefestigkeiten

Die Biegefestigkeiten an nativen und acetylierten LVL Lamellen wurden in Anlehnung an DIN EN 408 im 4-Punkt Biegeversuch bestimmt. Die Prüfkörper der Abmessungen $d \times b \times l = 2 \text{ cm} \times 9 \text{ cm} \times 64 \text{ cm}$ wurden zunächst normalklimatisiert. An Abschnitten wurden Holzfeuchte und Rohdichtewerte ermittelt, die Prüfungen erfolgten auf einer 50 kN Prüfmaschine am t-lab.

Die charakteristische Biegefestigkeiten der acetylierten LVL Lamellen wurden bei den Versuchen im Normalklima mit $f_{m,k} = 93,3 \text{ N/mm}^2$ bestimmt. Damit liegen diese Festigkeiten in den Kleinversuchen deutlich über dem angegebenen Wert für BauBuche von 75 N/mm^2 .

Dass sowohl die Mittelwerte, als auch die charakteristischen Werte der nativen LVL-Lamellen über denen der acetylierten Hölzer kann damit begründet werden, dass diese Charge bei den nativen Hölzern mit einem zu hohen Pressdruck hergestellt wurde.

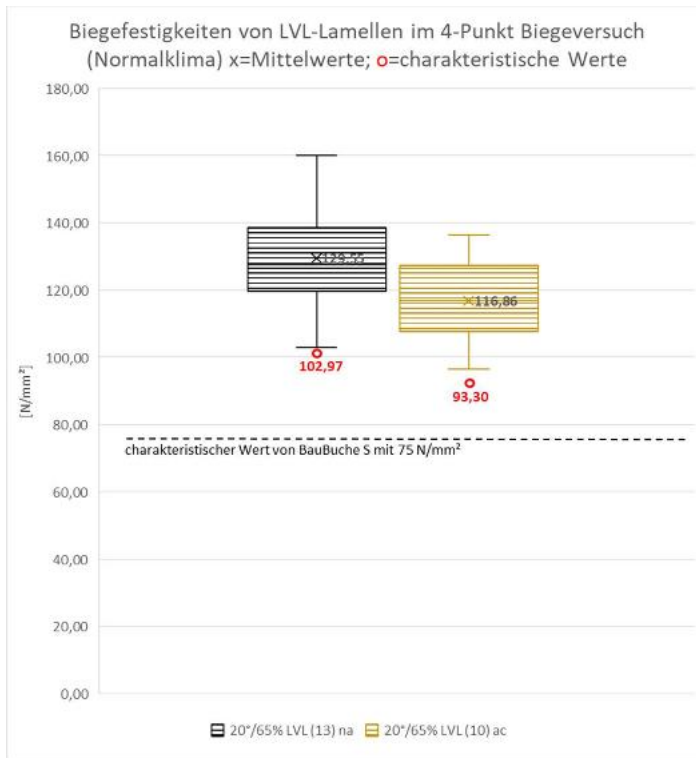


Abb. 29: Vergleich der Biegefestigkeiten von nativen und acetylierten LVL Lamellen im Normalklima im Vergleich zu den Werten der BauBuche S.

Druckfestigkeiten

Die Druckfestigkeiten an nativen und acetylierten LVL Kleinprüfkörpern wurden nach DIN EN 408 in radialer und tangentialer Furnierrichtung quer zur Faser bestimmt. Die Prüfkörper der Abmessungen $d \times b \times h = 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ wurden zunächst normalklimatisiert. An Abschnitten wurden Holzfeuchte und Rohdichtewerte ermittelt, die Prüfungen erfolgten auf einer 50 kN Prüfmaschine am t-lab.

Die charakteristischen Druckfestigkeiten in tangentialer und radialer Richtung wurden mit $f_{c,90,edge,k} = 12,8 \text{ N/mm}^2$ (tangential), bzw. $f_{c,90,flat,k} = 12,4 \text{ N/mm}^2$ (radial) bestimmt. Der Wert in radialer Richtung ist mit den Werten von BauBuche S Lamellen vergleichbar, in tangentialer Richtung liegt der Wert darunter (BauBuche $f_{c,90,edge,k} = 14,0 \text{ N/mm}^2$).

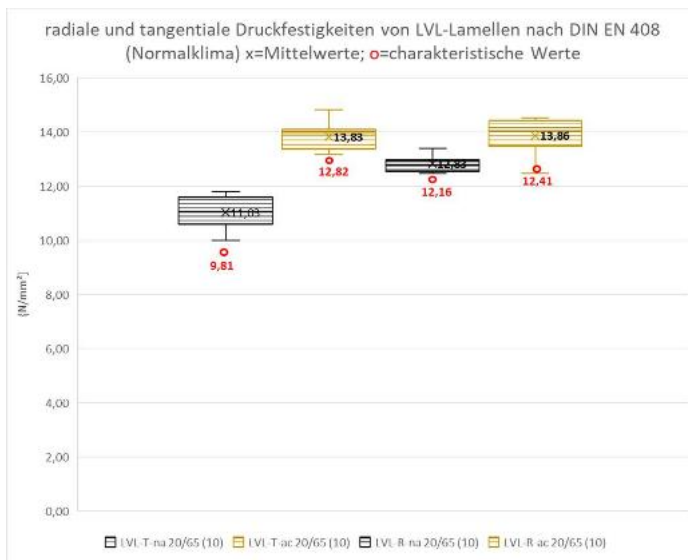


Abb. 30: radiale und tangentielle Druckfestigkeiten von nativen und acetylierten LVL Lamellen im Normalklima.

Scherfestigkeiten

Die Scherfestigkeiten des acetylierten Holzes wurden im Vergleich zu nativer Buche an Hand von Blockscherprüfungen aus verklebten Brettabschnitten nach DIN EN 14 080 durchgeführt (modifiziertes Blockscherprüfgerät). Hier konnten charakteristische Scherfestigkeiten von $f_{v,k} = 19,1 \text{ N/mm}^2$ ($n=12$) quer zur Faser ermittelt werden. Diese Werte liegen deutlich über den Werten von BauBuche S mit $f_{v,k} = 8,0 \text{ N/mm}^2$.

Bei nativer Buche wurden Mittelwerte der Scherfestigkeit von $17,28 \text{ N/mm}^2$ ($n=7$) erreicht. Das Ergebnis ist mit den Versuchen an der TU München vergleichbar (Jiang, Y., Schaffrath, J., Knorz, M., Winter, S., van de Kuilen,

J.W.G. „Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz“, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, TUM, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. München 2014).

Zugfestigkeiten

Die Zugprüfungen von acetylierten LVL Lamellen wurden an einer Zugprüfmaschine (Firma Zum Wald) der Firma Pollmeier durchgeführt. Die Prüfkörper der Abmessungen $d \times b \times l = 4 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ wurden vor den Prüfungen normalklimatisiert. Die charakteristischen Zugfestigkeiten konnten an den Lamellen mit $f_{t,0,k}=91,1 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden und liegen deutlich über den Werten der BauBuche S mit $f_{t,0,k}=66,0 \text{ N/mm}^2$.

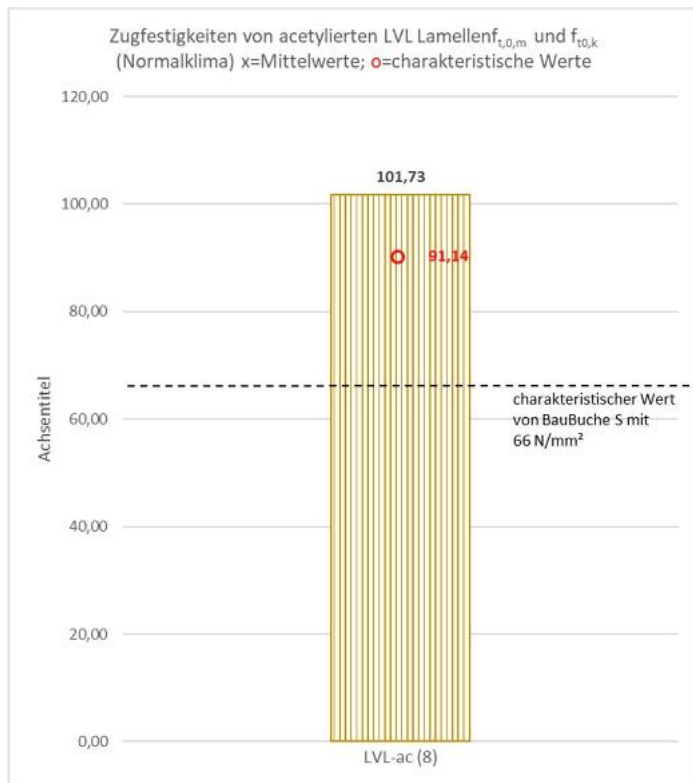


Abb. 31: Zugfestigkeiten von acetylierten LVL Lamellen ($d=40 \text{ mm}$) im Vergleich zu BauBuche S.

Arbeitspaket 7: Verbindungstechnik von Bauteilen aus Buchenfurnierschichtholz (Graf, TV 1)

Arbeitspaket 7.1: Stabdübel

Die Lochleibungsfestigkeiten von acetylierten LVL-Lamellen wurden nach DIN EN 383 geprüft. An Hand von Druckversuchen wurden die Festigkeiten und die Verschiebmodule ermittelt. Variiert wurden die Stabdübeldurchmesser, die Dicke der LVL Lamellen sowie zusätzlich zum Normalklima wassersatte Bedingungen. Da es sich hierbei um Kurzzeitversuche handelt, wurden und werden hierfür „normale“ verzinkte Stabdübel, statt Stabdübel aus Edelstählen eingesetzt. Für die Versuche wurde ein variabler Prüfrahmen für verschiedene Prüfkörperdicken und Stabdübeldurchmesser gebaut.

Die Versuche mit Stabdübeln 8 mm (Abb. 32) an 20 mm dicken Prüfkörpern zeigten im Normalklima charakteristische Lochleibungsfestigkeiten von $nativ=65,06 \text{ N/mm}^2$ und $acetyliert=67,28 \text{ N/mm}^2$. Damit liegen die Werte auf einem hohen Niveau (Buche ca. $45-50 \text{ N/mm}^2$; Sandhaas, 2013; $51,3 \text{ N/mm}^2$ BauBuche® für 8 mm Stabdübel). Erwartungsgemäß liegen die Werte für Stabdübeldurchmesser 12 mm untern denen mit 8 mm. Bei den Prüfungen im wassergelagerten Zustand blieben die charakteristische Werte der acetylierten Lamellen auf einem gleichen Niveau ($53,49 \text{ N/mm}^2$), die nativen Prüfkörper lagen bei knapp der Hälfte ($23,83 \text{ N/mm}^2$).

Charakteristisch ist der Bruch in Lochmitte auf der belasteten Seite und ein weniger kleinerer Riss auf der Lasteinwirkung abgewandten Seite. In wenigen Ausnahmen erfolgte der Bruch von der lastabgewandten Seite aus.



Abbildung 32: Ansicht einer Versuchsserie zur Lochleibung nach dem Versuch mit Stabdübeln Durchmesser 8 mm. 6 von 8 Prüfkörpern spalten von der belasteten Seite her auf, 2 von 8 von der unbelasteten Seite.

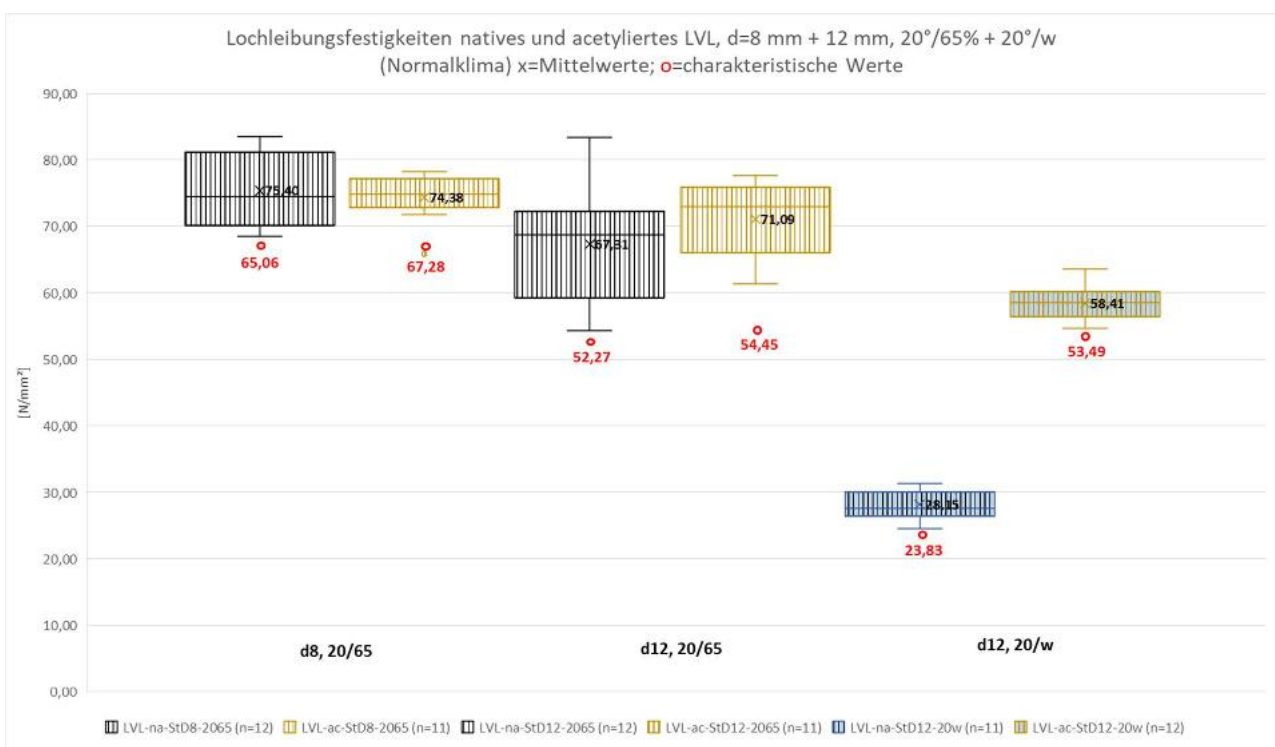


Abbildung 33: Auswertung von Lochleibungsfestigkeiten mit Stabdübeldurchmessern 8 mm und 12 mm sowie Prüfung im Normalklima und bei Wasserlagerung.

Arbeitspaket 7.2: Dübel besonderer Bauart, Konusadapter

Stellvertretend für geeignete Verbindungsmittel im Außenbereich werden noch Versuche mit Konusdübeln (Vergleichbar etwa mit Dübeln besonderer Bauart, System Appel - Ringkeildübel aus Aluminiumdruckguss) durchgeführt. Diese zielen auf eine direkte Anwendung auf der Landesgartenschau in Neustadt / Wstr. ab, werden in Bauteilgröße geprüft und durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert. Durch Produktionsverzögerungen sind die Prüfkörper nun erst hergestellt und werden im Anschluss geprüft und ausgewertet.

Arbeitspaket 7.3: Keilzinkenverbindungen

Geprüft wurden Keilzinkenverbindungen nach DIN EN 408 im 4-Punkt Biegeversuch (Flachkant). Variiert wurde die Klebstoffart (PRF als Referenz sowie ein neuentwickelter PUR mit Wasservorbehandlung und mit Primer). Die Biegefestigkeiten wurden mit LVL-Prüfkörpern ohne Keilzinken verglichen. Als Abmessungen wurden in Anlehnung an die Norm die Dimensionen l=640 mm, b=100 mm und d=20 mm gewählt, im Normalklima vorbehandelt und auf der Universalprüfmaschine an der RPTU bis zum Bruch belastet.

Es zeigte sich, dass die charakteristischen Biegefestigkeiten der Keilzinkenverbindungen bei der Verwendung des PU Klebstoffes (mit Wasser- und Primer-Vorbehandlung) um ca. 15% unter denen der PRF verklebten LVL-Prüfkörper lagen. Diese Reduktion gilt sowohl für die nativen als auch für die acetylierten Hölzer.

Der Vergleich von keilgezinkten (mit PRF Klebstoff) mit nicht bearbeiteten acetylierten LVL-Prüfkörpern zeigte eine Reduktion der charakteristischen Werte von ca. 12% (Abb. 6). Diese Reduktion entspricht in etwa der Größenordnung die durch den Verschwächungsgrad v auf Grund des offenen Keilzinkengrundes zu erwarten sind (Reduktionsfaktoren beim $l=15$ mm Profil $v_{nom}=10\%$ und $v_{eff}=17\%$ nach Aicher & Radovic, 1999). Beim Mittelwert ist eine Reduktion von 22% zu verzeichnen.

Bei den nativen Hölzern sind Reduktionen von ca. 10% bei den Mittelwerten und keine Reduktion bei den charakteristischen Werten festzustellen.

Die Unterschiede lassen sich dadurch begründen, dass die Streubreite der Festigkeitswerte zwischen unbearbeiteten und keilgezinkten Prüfkörpern die diesem Probenumfang abnimmt.

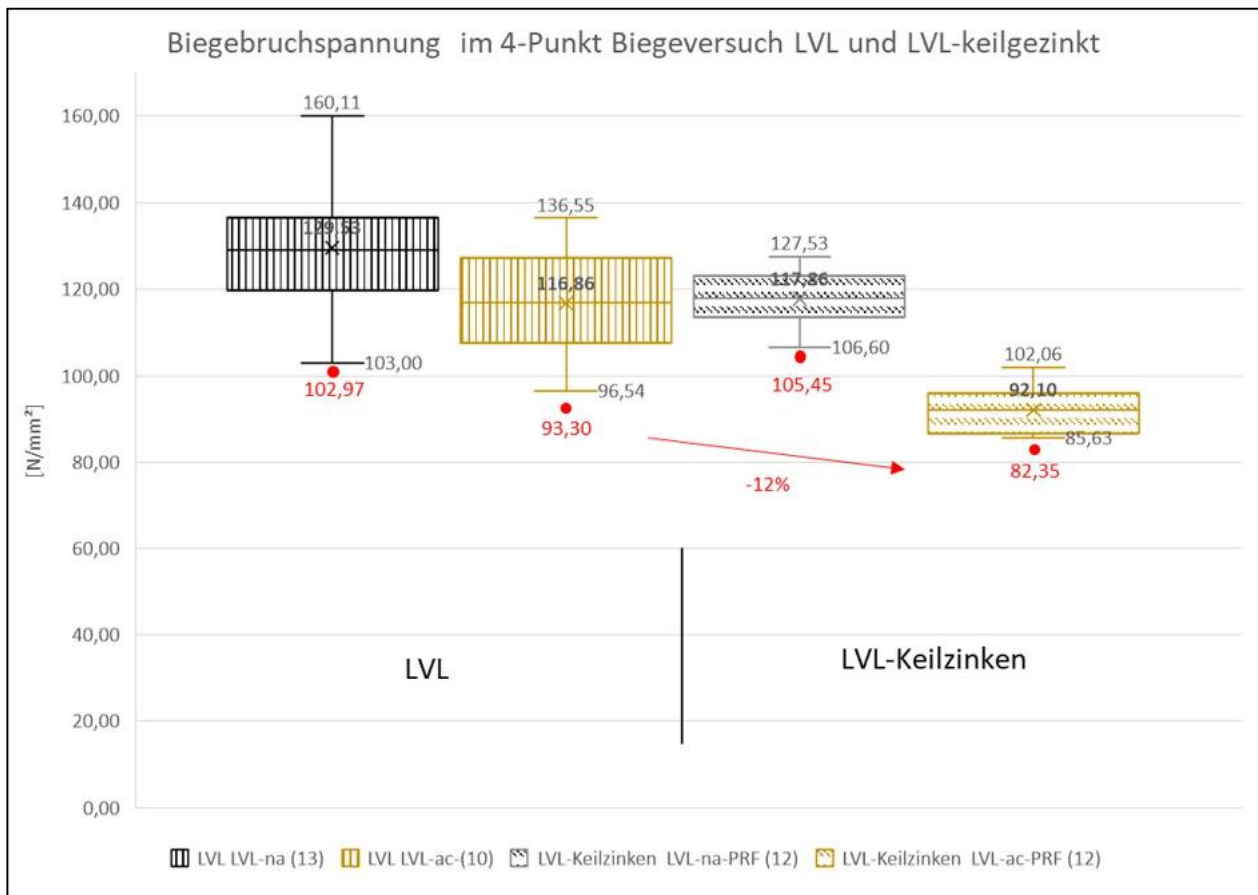


Abbildung 34: Vergleich der Biegefestigkeiten von LVL und keilgezinktem LVL, nativ und acetyliert im Normklima (fett=Mittelwerte, rot=charakteristische Werte). Hier ist bei den acetylierten, keilgezinkten Prüfkörpern ein charakteristischer Biegefestigkeitsverlust von ca. 12% zu verzeichnen.

Ergänzend zu den 4-Kant Biegeversuchen wurden reine Zugversuche an keilgezinkten und acetylierten Lamellen durchgeführt. Diese Zugverbindungen sind für die Leistungsfähigkeit der Keilzinkenverbindungen aussagekräftiger.

Diese Zugprüfungen wurden an einer Zugprüfmaschine (Firma Zum Wald) der Firma Pollmeier durchgeführt. Die Prüfkörper der Abmessungen $d \times b \times l = 4 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ wurden vor den Prüfungen normalklimatisiert. Variiert wurden LVL Lamellen mit 2, bzw. 3 Querlagen, die Anordnung der Keilzinkenprofile (Quer und Längs) sowie die Zinkenprofile selbst (I15 und I40).

Die charakteristischen Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen sind an Abb. 35 zusammengefasst. Zwischen Lamellen ohne Keilzinkungen und mit I15 mm Profil ist wieder der Verschwächungsgrad für den Zugfestigkeitsverlust verantwortlich. Die Querlagen und die Quer-Anordnung der Keilzinken reduzieren die Zugfestigkeiten der Lamellen weiter.

Die charakteristische Zugfestigkeit an Lamellen mit I15 Keilzinken Profil mit $f_{t,0,k}=69,48 \text{ N/mm}^2$ liegen im Bereich der Werte bei Baubuche S ohne Keilzinken mit $f_{t,0,k}=66,0 \text{ N/mm}^2$.

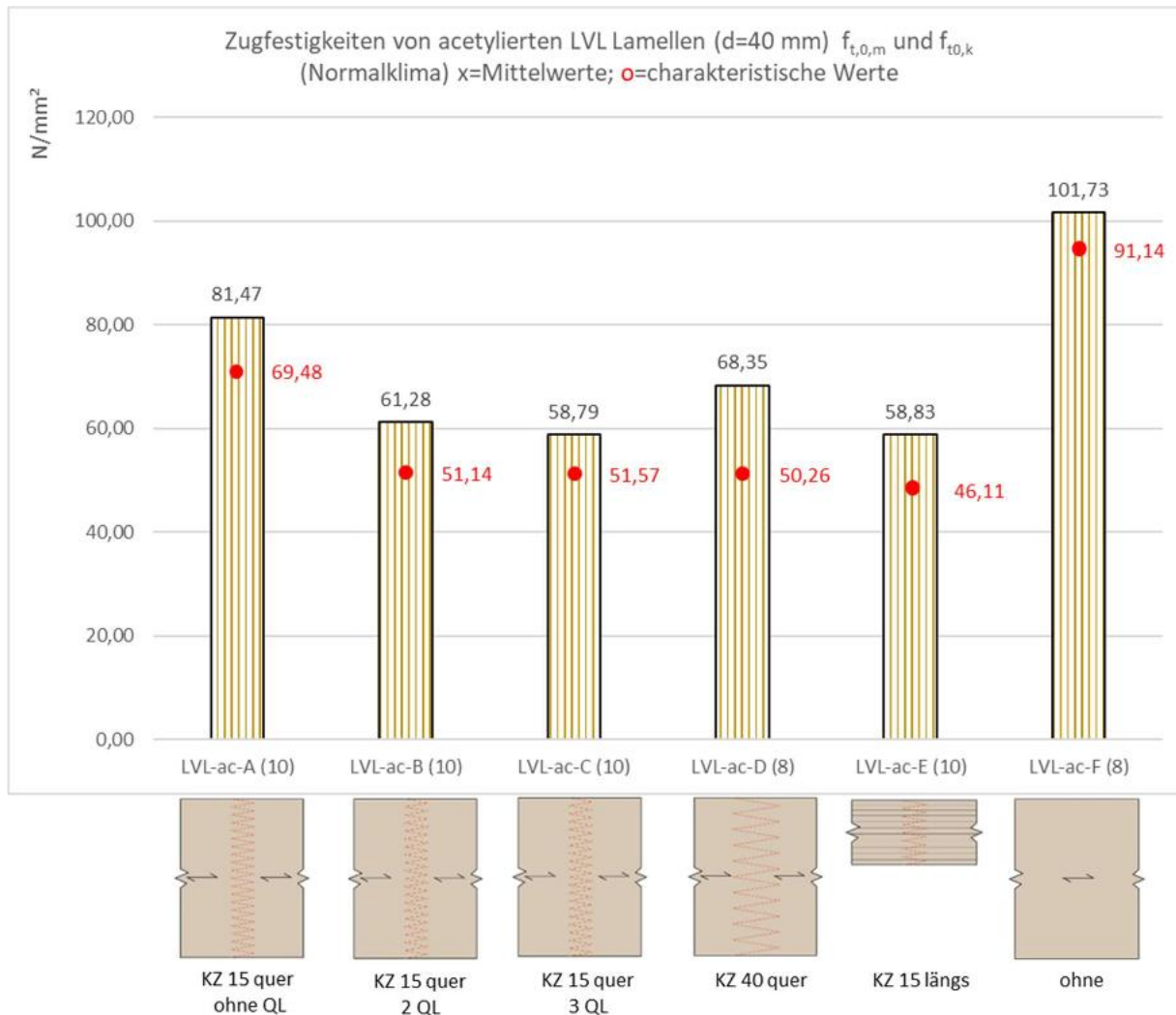


Abbildung 35: Mittelwerte und charakteristische Zugfestigkeiten an keilgezinkten LVL Lamellen im Vergleich zu unbearbeiteten Lamellen (rechts).

Arbeitspaket 7.4: Vorspannungen an Gewindestangen

Durch das Aufbringen einer Vorspannkraft auf Stäbe in Kontakt- und Druckanschlüssen von acetylierten Buchen LVL-Stäben an Stahl-, Stahlbeton- und anderen Stäben kann die Traglast erhöht werden. Um die Leistungsfähigkeit des Materials und dieser Verbindungsart zu untersuchen, wurde ein gleicher Versuchsaufbau wie bei einem Versuch mit BauBuche® gewählt.

Die Prüfkörperabmessungen betragen $l=650$ mm, $d=160$ mm und $b=300$ mm. Die Verbindungen sind mit einem eingelassenen Stahl-Vierkantankerstab, zwei Gewindestäben $d=16$ mm und einem Wiederlager aus Kunstharzpressholz $d=100$ mm mit Muttern realisiert (Abb. 36). Die Erfassung der Vorspannkraft erfolgt über Kraftmessdosen, die Klimabedingungen werden mit elektrischen Thermohygrographen ermittelt.

Im beheizten aber nicht geregelten Versuchsraum sind Temperaturen zwischen ca. 15°C und 20°C vorhanden, die Luftfeuchtwerte schwanken ca. 40% und 90%.

Die anfänglichen Vorspannungsverluste von ca. 2-4% (Abb. 37) können als gering bezeichnet werden, der Einfluss von Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit macht sich hier im Vergleich zu den Prüfungen an BauBuche (Abb. 38) kaum bemerkbar.

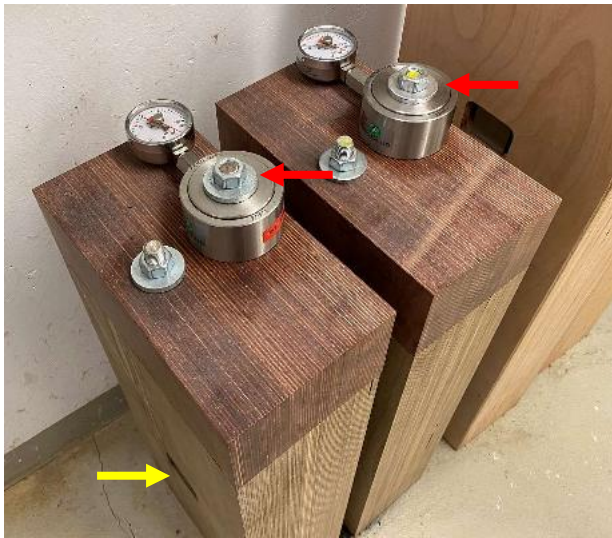


Abbildung 36: Die beiden Versuchskörper der Langzeit-Vorspannversuche. An je einem Gewindestab sind Kraftmessdosen (rote Pfeile) angeschlossen. Der Stahlvierkantstab ist in Stabmitte angeordnet (gelber Pfeil).

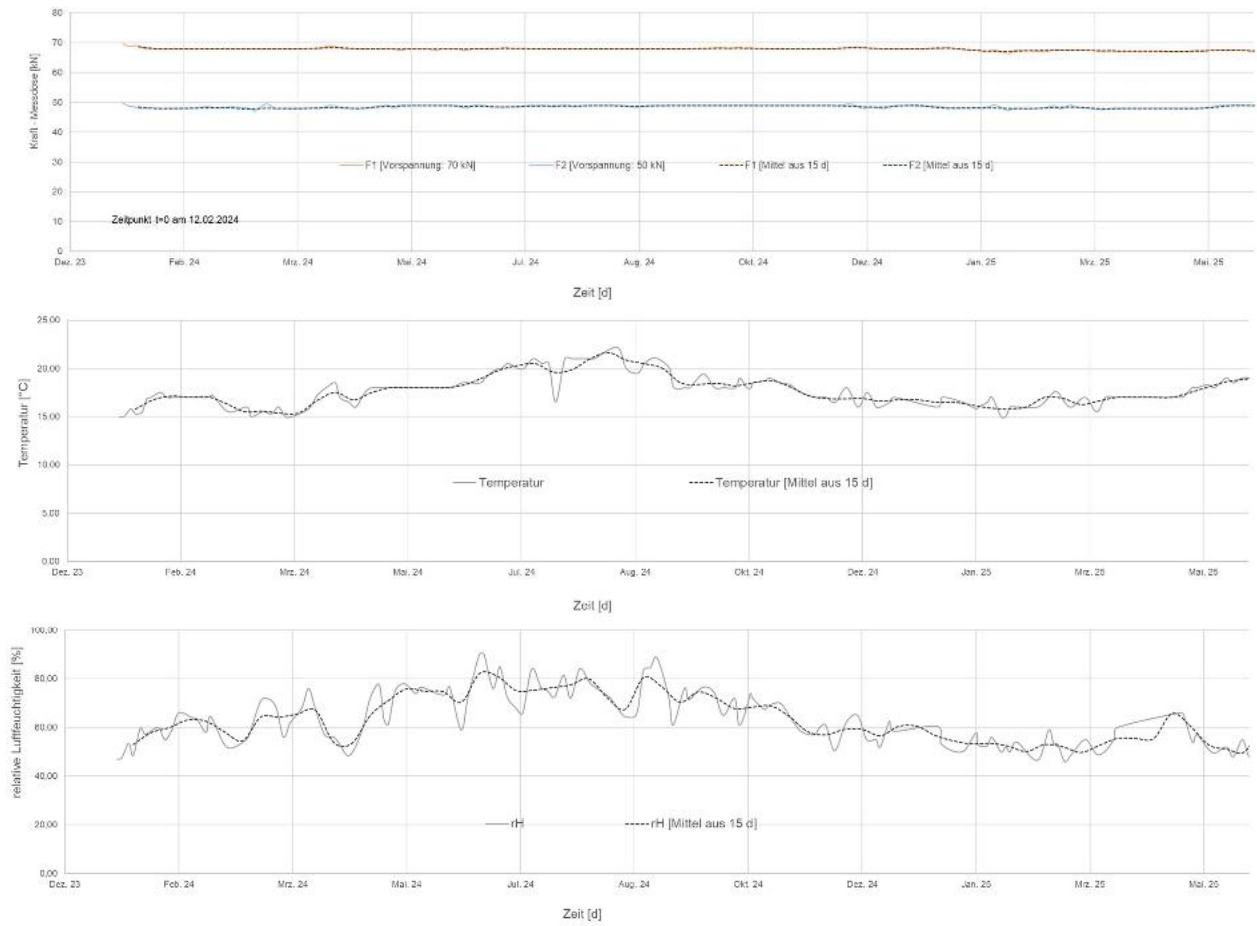


Abbildung 37: Vorspannungs-Versuche aus acetylierten Prüfkörpern mit $F_1=70$ kN und $F_2=50$ kN. Hier ist ein Vorspannungsverlust von ca. 2-4% (ca. 2 kN) durch die plastische Verformung am Versuchsbeginn zu erkennen. Ein Einfluss der klimatischen Bedingungen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ist kaum zu verzeichnen.

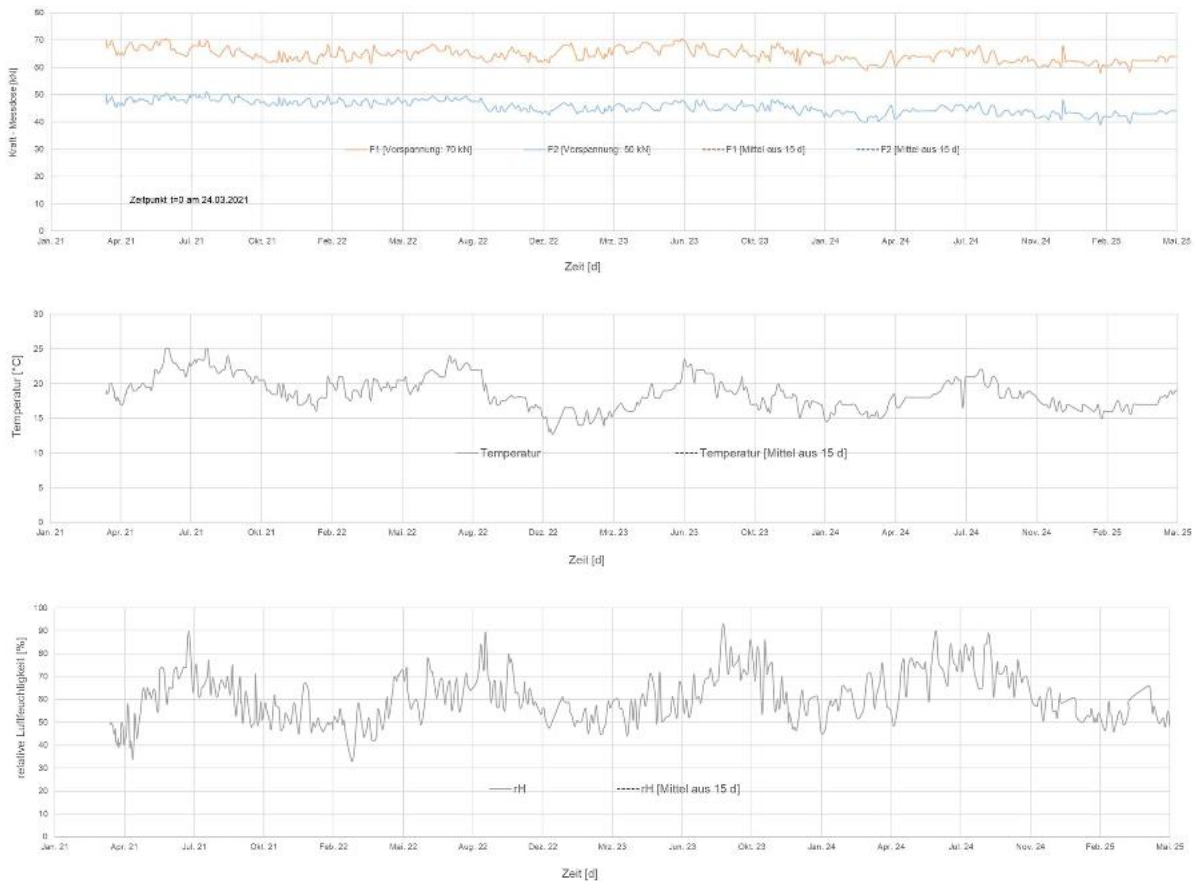


Abbildung. 38: Vorspannungs-Versuche aus nativen Prüfkörpern mit $F1=70\text{ kN}$ und $F2=50\text{ kN}$. Diese Versuche laufen schon über einen längeren Zeitraum. Hier erreicht der Vorspannungsverlust bisher ca. 5 - 15%. Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit ist deutlich zu erkennen.

Arbeitspaket 8: Anwendungsbereiche acetylierter Buchen-Furnierschichtholzprodukte (Graf, TV 1)

Arbeitspaket 8.1: Anwendbarkeit der acetylierten Buchen-LVL-Produkte für Brücken und Türme

Auf Grundlage der im Projekt nachgewiesenen Formstabilität, Dauerhaftigkeit gegenüber verschiedenen biotischen Schadeinflüssen und den guten mechanischen Kennwerten liegt die Anwendung für filigrane Tragstrukturen an Brücken und Türmen nahe. Hier kann könnte das Material unter Beachtung der dennoch notwendigen baulich konstruktiven Holzschutzaspekte seine positiven Eigenschaften einbringen.

Beispielhaft wird ein Aussichtsturm -der Albturm- kurz beschrieben, der mit dem erforschten Material umsetzbar wäre. Der Turm besteht aus einzelnen, geraden Buchenfurnierschichtholzstäben, die mit Stahlknotenverbindungen zu einem Gittertragwerk zusammengesetzt werden. Die einzelnen Holzstäbe sind mit Gewindestangen und Konusadaptern an die Stahlknoten angeschlossen. Die Verbindung ist reversibel, einzelne Holzstäbe können ausgetauscht werden. Alle Stahloberflächen sind schräg angeordnet, um stehendes Wasser zu vermeiden.

Mit einer kleinen Versuchsreihe am t-lab konnte nachgewiesen werden, dass sich mit geeigneten Ölen und Wachsen auf der Hirnholzfläche die Wasseraufnahmefähigkeit deutlich reduzieren lässt und damit einen weiteren Beitrag zu Optimierung der Dauerhaftigkeit der Konstruktion leisten kann.

(Wasseraufnahmekoeffizient $A_{w,l\text{unbehandelt}}=0,0115\text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s}0,5]$, $A_{w,l\text{behandelt}}=0,0019\text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s}0,5]$ nach DIN EN ISO 15 148)



Abbildung. 39: Visualisierung eines Aussichtsturmes -der Albturm- aus acetylierten Buchen Furnierschichtholzstäben.

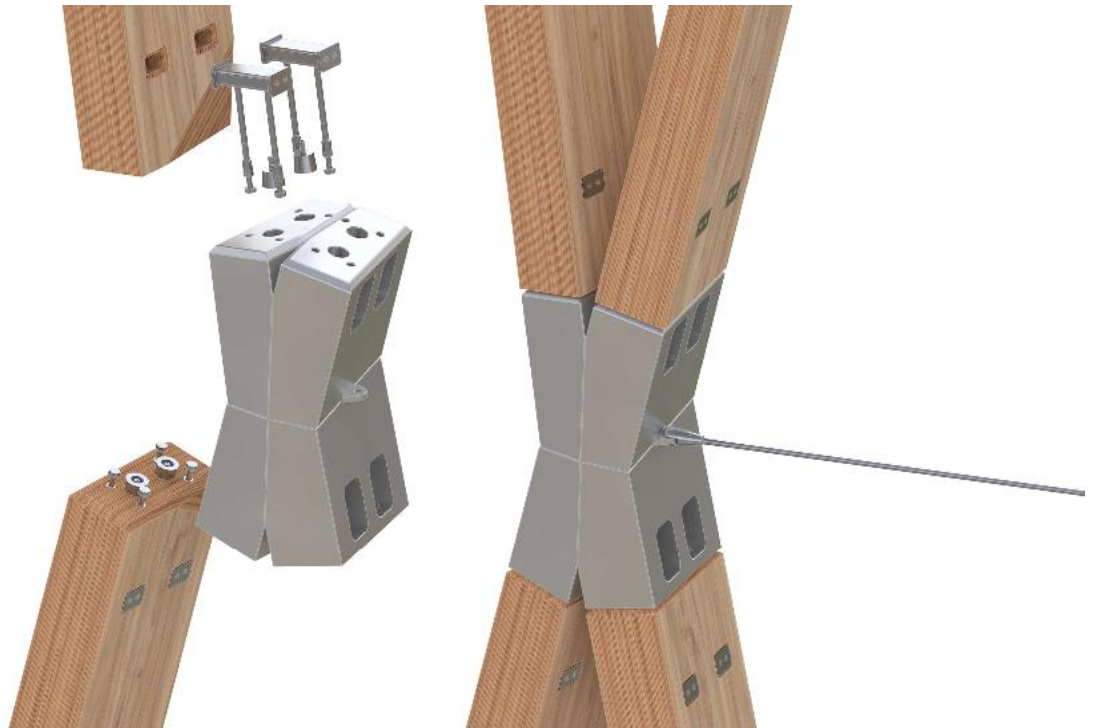


Abbildung. 40: Knotendarstellung des Albturmes. Die acetylierten Buchenhölzer sind mit Gewindestangen und Konusadaptern an die Stahlknoten angeschlossen. Die Verbindung ist reversibel, einzelne Holzstäbe können ausgetauscht werden.

Arbeitspaket 8.2: Weitere Anwendungsfelder

Weitere Anwednungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens in folgenden Anwendungsfeldern gesehen:

Mobilitätsbereich

Hier sind durch verschiedene Akteure sowohl im Forschungsbereich als auch im Anwenderbereich tätig, die Verwendung von Holz zu steigern. Die ersten E-Ladestationen aus Holz in Kombination mit Photovoltaik Anlagen sind gebaut, Tankstellen, Supermärkte, Firmen und Kommunen sind mögliche Nutzer.

Für die Landesgartenschau in Neustadt/ Weinstraße 2027 soll eine größere Parkplatzüberdachung mit Photovoltaik Anlage und der Option einer späteren Um- und Nachnutzung aus acetyliertem Buchenfurnierschichtholz umgesetzt werden.



Abbildung. 41: Rendering der Parkplatzüberdachung mit der Option einer späteren Aufstockung.

Im Mobilitätsbereich sind weitere technische Bauwerke als Pilotobjekte errichtet, bzw. in der Erforschung, bei denen das hier erforschte Material zur Anwendung kommen könnte. In Österreich wurde die erste Mautbrücke über eine Autobahn errichtet. Die Konstruktion ist aufwändig verkleidet und könnte mit dem erforschten Material einfacher konstruiert werden.



Abbildung. 42: Mautbrücke in Kärnten, Holzbau durch Hasslacher Timber (Bild: Kapsch).

In diesem Bereich sind auch Schilderbrücken für Verkehrszeichen an Fernstraßen und in Städten denkbar.

Windenergiebereich

Das Projekt Timbertower in Deutschland als einer der ersten Turmkonstruktionen für Energieanlagen wurden nicht weiterverfolgt. In Schweden werden seit geraumer Zeit durch das Startup Modvion Holztürme für Windenergieanlagen errichtet. Als Material kommt gebogenes Furnierschichtholz aus Fichte zum Einsatz. Dieses Material muss sicher auf der Außenseite vor biotischen Schadeinflüssen geschützt werden. Die Witterungseinflüsse im Offshore Bereich sind noch größer, hier könnte das acetyliertes Buchenfurnierschichtholz eine mögliche Anwendung sein.



Abbildung. 43: Turm für eine Windkraftanlage in Schweden aus Furnierschichtholz im Bau (Bild: Modvion)

Stadtmöblierung

Mit Hölzern z.B. aus Accoya (acetylierte Montereykiefer) ist eine Alternative zu dauerhaftem Tropenholz für Bänke, Ruheinseln, etc. in die Städte eingezogen. Für das eher „weiche“ Accoya könnte acetyliertes Buchenfurnierschichtholz eine Abnutzungsfestere Alternative darstellen.

Aus den acetylierten Furnieren lassen sich auch leicht gekrümmte und Formbare Elemente herstellen, die eine andere Ästhetik im städtischen Umfeld ermöglichen.



Abbildung. 44: gebogene Möbel auf Furnieren mit denen andere Formen der Stadtmöblierung im bewitterten Bereich möglich werden (links: R. Pauloin „Lamed Chair“ 2011, rechts: S. Collins „Urban Chair“ 2009)

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projekts wurden keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen. Die Ergebnisse stehen der Allgemeinheit über wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Verfügung.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse belegen das hohe Potenzial von acetyliertem Buchen-LVL für den Einsatz im Außenbereich, insbesondere im konstruktiven Holzbau. Die erhöhte Maßhaltigkeit und verbesserte Dauerhaftigkeit sprechen für eine erfolgreiche Marktanwendung, jedoch sind Langzeitversuche empfehlenswert.

Die im Teilvorhaben 1 konnte gezeigt werden, dass nun ein heimischer Holzwerkstoff mit hohen mechanischen Eigenschaften zur Verfügung gestellt werden kann, der für bewitterte Tragwerke im Außenbereich, wie Brücken und Türme sowie im Bereich Mobilität und für Windkraftanlagen einsetzbar sein kann. Hiermit können neue Anwendungsfelder des Holzbaus erschlossen werden.

Die im Teilvorhaben 2 durchgeführten Untersuchungen liefern wertvolle Erkenntnisse zur Qualität, zum Feuchteverhalten, zur Verklebung und zur Dauerhaftigkeit des Materials und tragen so wesentlich zum Verständnis und zur Weiterentwicklung dieses Werkstoffs bei.

Zudem konnte gezeigt werden, dass eine industrielle Herstellung von acetyliertem Buchen-LVL in Kooperation mit Accsys Technologies und der Deutschen Holzveredelung Schmeing GmbH erfolgreich umgesetzt werden kann.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Zwei Promotionen stehen im direkten Zusammenhang mit diesem Projekt. Darüber hinaus wurden mehrere Abschlussarbeiten sowie studentische Arbeiten in Zusammenhang mit diesem Projekt erstellt.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das Projekt hat gezeigt, dass LVL aus acetyliertem Buchenfurnier unter Verwendung geeigneter Klebstoffsysteme erfolgreich im industriellen Maßstab hergestellt werden kann. Dabei konnten sowohl die technischen Herausforderungen bei der Verarbeitung als auch die Anforderungen an die Produktqualität gemeistert werden. Die gewonnenen Ergebnisse liefern wesentliche Grundlagen für die technische Anwendbarkeit des neuen Holzbauproduktes. Hier sind die mechanischen Kennwerte des Materials sowie von Verbindungen und Verbindungsmitteln zu nennen. Das erforschte Materialverhalten im nassen und wassergesättigten Bereich gibt Hinweise auf ein deutlich verbessertes Tragverhalten im Vergleich zu nicht acetyliertem Holz.

Die Zusammenarbeit mit Industriepartnern wie Accsys Technologies und der Deutschen Holzveredelung Schmeing GmbH unterstreicht die Praxisnähe und Anwendungsrelevanz der entwickelten Ansätze.

Aus diesen Ergebnissen ergibt sich ein vielversprechendes Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten. Künftige Untersuchungen könnten sich beispielsweise auf die Optimierung der Verklebungssysteme, die Langzeitbeständigkeit unter realen Bewitterungsbedingungen oder auf die Entwicklung spezifischer Anwendungen im konstruktiven Holzbau konzentrieren. Auch die Übertragung des Konzepts auf andere Holzarten oder modifizierte Produkte bietet interessante Perspektiven für eine nachhaltige Materialentwicklung.

Insgesamt leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Etablierung modifizierter Laubholzprodukte im industriellen Holzbau und ebnet den Weg für innovative und dauerhafte Holzwerkstoffe im Außenbereich

e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten

Die im Antrag formulierten Verwertungsziele konnten größtenteils erreicht werden. Die Forschungsdaten sind vollständig dokumentiert und über interne Datenbanken und Partner verfügbar gemacht worden.

3. Erkenntnisse von Dritten

Keine.

4. Veröffentlichungen

Teilvorhaben 1:

Publikation I: **Acetyliertes Buchen-Furnierschichtholz -Potenziale im Brückenbau.** Klopfer, R.; Graf. Jürgen. (2022). In Proceedings of 5. *Brückenkolloquium, TAE Esslingen, 453-456*, Ostfildern, Germany.

Publikation II: **Acetyliertes Buchen-Furnierlagenholz für tragende Anwendungen: mechanische Eigenschaften und praktische Anwendung.** Klopfer, R.; Graf. Jürgen. (2024). In Proceedings of 32. *Deutsche Holzschutztagung 196–203*, Dresden, Germany.

Teilvorhaben 2:

Publikation I: **Bonding Acetylated Veneer for Engineered Wood Products—A Review.** Slabohm, M., Mai, C., Militz, H. (2022). *Materials* 15, 3665. <https://doi.org/10.3390/ma15103665>

Publikation II: **Acetylation of wood: understanding the risk of de-acetylation during exposure to elevated temperature.** Slabohm, M., Emmerich, L., Valkonen, M.J., Rautkari, L., Militz, H. (2024). *Holzforschung* 78, 647–656. <https://doi.org/10.1515/hf-2024-0067> 2024.

Publikation III: **Compression of Acetylated Beech (*Fagus sylvatica* L.) Laminated Veneer Lumber (LVL).** Slabohm, M., Mayer, A.K., Militz, H. (2022). *Forests* 13, 1122. <https://doi.org/10.3390/f13071122>

Publikation VI: **Bonding performance of hot-bonded acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber (LVL).** Slabohm, M., Militz, H. (2022). *Wood Material Science & Engineering* 18, 76–81. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2124544>

Publikation V: **Bonding performance and surface characterization of cold-bonded acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber.** Slabohm, M., Militz, H. (2024). *Scientific Reports* 14, 4083. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48224-z>

Publikation VI: **Evaluation of wet tensile shear strength and surface properties of finger-jointed acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber.** Slabohm, M., Stolze, H., Militz, H. (2023). *European Journal of Wood and Wood Products* <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01970-3>

Publikation VII: **The durability of acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber (LVL) against wood-destroying basidiomycetes.** Slabohm, M., Brischke, C., Militz, H. (2023). *European Journal of Wood and Wood Products* 81, 911–921. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01962-3>
Publikation VIII:

Publikation IX: **Acetyliertes Buchen-Furnierlagenholz für tragende Anwendungen: Furniere und Verklebung.** Slabohm, M., Emmerich, L., Marais, B.N., Brischke, C., Militz, H. (2024). In Proceedings of 32. *Deutsche Holzschutztagung 182–193*, Dresden, Germany.

Publikation X: **Relevant bonding aspects of acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) LVL for load-bearing construction in exterior use.** Slabohm, M., Haase, J.-O., Militz, H. (2024). In Proceedings of the 11th *European Conference on Wood Modification*, Florence, Italy.

Publikation XI: **Investigation of chemical composition and wood-moisture interaction of acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) veneer after thermal impact.** Slabohm, M.; Emmerich L.; and Militz, H. (2023). In Proceedings of the 18th meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE 2023) 10-12, Oslo, Norway.

Publikation XII: **Acetylated Beech LVL: Anti-swelling-efficiency, leaching, and set recovery.** Slabohm, M., Militz, H. (2022). In Proceedings of the 10th *Hardwood Conference 222–227*, Sopron, Hungary.

Publikation XIII: **Improving Durability and Dimensional Stability of Beech (*Fagus sylvatica* L.) LVL by Acetylation With Acetic Anhydride.** Slabohm, M.; and Militz, H. (2022). In Proceedings of the 10th *European Conference on Wood Modification*, pages 217–225, Nancy, France.

Publikation XIV: **Durability of acetylated beech (*Fagus sylvatica* L.) laminated veneer lumber (LVL).** Slabohm, M., Militz, H. (2024). In Proceedings of IRG54 *Scientific Conference on Wood Protection*, Knoxville, Tennessee, USA.

ANHANG

Teilvorhaben 1: 2220HV049A Mechanische Kennwerte und Anwendungen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben „mechanische Kennwerte und Anwendungen“ hatte das Ziel, wesentliche Kennwerte acetylierter Buchenfurnierschichthölzer zu ermitteln. Aus industriell gefertigtem Plattenmaterial wurden basierend auf verschiedenen Prüfnormen die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dabei wurden im Hinblick auf die Verwendbarkeit in Nutzungsklasse 3 auch Prüfungen bei verschiedenen Feuchteverhältnissen durchgeführt und im Vergleich mit unbehandelten Hölzern bewertet.

Wesentliche Arbeitsschwerpunkte waren:

- **Ermittlung grundlegender, mechanischer Kennwerte**, wie Zug, Druck und Biegefestigkeiten; Prüfungen unter Normalklima für eine Vergleichbarkeit mit am Markt vorhandenen Produkten und unter Wasserlagerung um Extrembedingungen und deren Auswirkung auf das Tragverhalten abschätzen zu können;
- **Versuche zu Holzverbindungen und Verbindungsmitteln**, wie Lochleibungsfestigkeiten und Keilzinkenverbindungen;
- **Prüfungen von Dauerfestigkeiten** mit Ermittlung von Kriechzahlen und Verhalten unter Vorspannungen bei Verbindungsmitteln;
- **Anwendung im bewitterten Außenbereich** mit dem Fokus auf reversible Anschlüsse und Recherche zu weiteren Anwendungsfeldern.

Die Untersuchungen und Prüfungen wurden am t-lab der RPTU durchgeführt, die Fertigung von Prüfkörpern erfolgte in der eigenen Werkstatt, ergänzend bei der Firma Schmeing Deutsche Holzveredelung und bei Firma Pollmeier für die Zugprüfungen. Wegen Materialengpässen, Auslastungen von Firmen und der Suche nach einer Finanzierung für Prüfungen im Bauteilmaßstab konnten diese noch nicht abgeschlossen werden.

Die erforschten Ergebnisse sollen in einem Projekt als Mockup konkret umgesetzt werden und in größerem Maßstab auf der Landesgartenschau Neustadt/Weinstraße 2027 eine erste Anwendung finden.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2.2: Schrägfaserigkeit (Graf)

Im Arbeitspaket wurden die Grundlagen des Einflusses von Faserneigungen auf die Zugfestigkeiten untersucht. Nachgewiesen wurde der starke Einfluss bereits geringer Kraft-Faserneigungen (bei 5° Faserneigung ca. 45% Zugfestigkeitsverlust). Da auf Schrägfaserigkeiten im Produktionsprozess der Schäl furniere nur in begrenztem Umfang Einfluss genommen werden kann, kommt der der Homogenisierung durch die Furnierverklebung mit wechselnden Schichten sowie der Anordnung vor Furnieren (auch liegendstehend) eine große Bedeutung zu. Dies lies sich in den Zugversuchen an LVL Lamellen bestätigen.

Arbeitspaket 5.1: Einfluss des Umgebungsklimas

In diesem Arbeitspaket konnte nachgewiesen werden, dass die Biegefestigkeiten von acetylierten LVL Lamellen auch im Extrembereich der Wassersättigung auf einem nahezu konstanten, hohen Niveau bleiben. Das zeigte sich auch den Last-Verformungskurven die im Gegensatz zu den nativen Lamellen ihr eher sprödes Verhalten behielten. Die charakteristischen Biegefestigkeiten lagen auf über 90 N/mm² und damit immer über den charakteristischen Werten von BauBuche im Normalklima.

Arbeitspaket 5.2: Delaminierung und Blockscherprüfungen

Ergänzend zu den Untersuchungen in Göttingen wurden mit einen neuen, für Laubhölzer geeigneten PU Klebstoff Delminierungs- und Blockscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14080 durchgeführt. Die besten Ergebnisse ohne Delaminierungen wurden bei den acetylierten LVL Lamellen mit Primervorbehandlung erzielt. Bei einigen Prüfkörpern wurde eine Kavernenbildung in der Klebschicht festgestellt, hier besteht noch Optimierungsbedarf.

Arbeitspaket 5.3: Kriechverhalten

Die Langzeitversuche im Innen- und Außenbereich zeigen für das untersuchte Lastniveau bei 25% der Bruchlast in der Nutzungsklasse SC1 (innen) eine niedrige Kriechzahl von $K_{c,300D,SC1,25\%}=0,30$. Im

Außenbereich konnte der -vorläufige- Wert mit $k_{c,300D,SC3,25\%}=0,70$ ermittelt werden. Ein direkter Vergleich zur BauBuche® ($k_{c,SC1}=0,6$). Ist nur für den Innenbereich möglich.

Arbeitspaket 6: Trag- und Verformungsverhalten von Buchenfurnierschichtholz (Graf, TV 1)

Arbeitspaket 6.1: Homogenisierungseffekt

Ein deutlicher Homogenisierungseffekt konnte mit der Anordnung, bzw. Ausrichtung der Furnier in den LVL Lamellen erzielt werden. Dies zeigte sich in einer charakteristischen Festigkeitssteigerung von etwa 19% ($f_{m,k,liegend}=93,3$ N/mm² auf $f_{m,k,stehend}=110,9$ N/mm²). Mit der Anordnung von solchen „Speziallamellen“ in der Zugzone von LVL Trägern ist eine Steigerung der Leistungsfähigkeit möglich.

Die Homogenisierung vom Furnier zur Lamelle ließ sich bei den Zugfestigkeiten gut dokumentieren. Obwohl die Zugfestigkeiten bei geringen Last-Faserwinkeln rasch abfallen, lagen die Zugfestigkeiten der LVL Lamellen deutlich über denen der Einzelfurniere ohne Faserneigung-

Arbeitspaket 6.2: Trag- und Verformungsverhalten an Kleinprüfkörpern

Biegefestigkeiten

Die charakteristische Biegefestigkeiten der acetylierter LVL Lamellen wurden bei den Versuchen im Normalklima mit $f_{m,k}=93,3$ N/mm² bestimmt. Damit liegen diese Festigkeiten in den Kleinversuchen deutlich über dem angegebenen Wert für BauBuche von 75 N/mm².

Druckfestigkeiten

Die charakteristischen Druckfestigkeiten in tangentialer und radialer Richtung wurden mit $f_{c,90,edge,k}=12,8$ N/mm² (tangential), bzw. $f_{c,90,flat,k}=12,4$ N/mm² (radial) bestimmt. Der Wert in radialer Richtung ist mit den Werten von Baubuche S Lamellen vergleichbar, in tangentialer Richtung liegt der Wert darunter (Baubuche $f_{c,90,edge,k}=14,0$ N/mm²).

Zugfestigkeiten

Die charakteristischen Zugfestigkeiten konnten an den Lamellen mit $f_{t,0,k}=91,1$ N/mm² bestimmt werden und liegen deutlich über den Werten der Baubuche S mit $f_{t,0,k}=66,0$ N/mm².

Arbeitspaket 7: Verbindungstechnik von Bauteilen aus Buchenfurnierschichtholz

Arbeitspaket 7.1: Stabdübel

Bei den Lochleibungsfestigkeiten konnten unter normalklimatisierten Bedingungen Werte erreicht werden, die denjenigen von Buche und BauBuche entsprechen. Bei den Prüfungen im wassergelagerten Zustand blieben die charakteristische Werte der acetylierten Lamellen auf einem hohen Niveau (53,49 N/mm²), die nativen Prüfkörper lagen bei knapp der Hälfte (23,83 N/mm²). Hier zeigte sich an einem weiteren Beispiel, das gute Eignung des Materials im bewitterten Außenbereich.

Arbeitspaket 7.2: Dübel besonderer Bauart, Konusadapter

Stellvertretend für geeignete Verbindungsmittel im Außenbereich werden noch Versuche mit Konusdübeln (Vergleichbar etwa mit Dübeln besonderer Bauart, System Appel - Ringkeildübel aus Aluminiumdruckguss) durchgeführt. Diese zielen auf eine direkte Anwendung auf der Landesgartenschau in Neustadt / Wstr. ab, werden in Bauteilgröße geprüft und durch einen anderen Fördermittelgeber finanziert. Durch Produktionsverzögerungen sind die Prüfkörper nun erst hergestellt und werden im Anschluss geprüft und ausgewertet.

Arbeitspaket 7.3: Keilzinkenverbindungen

Keilzinkenverbindungen bewirken eine Reduzierung der Zugfestigkeiten, unter anderem durch den Verschwächungsgrad. Für Keilzinkungen mit I15 mm Profil war dieser Verschwächungsgrad gegenüber ungezinkten Lamellen vorhanden, dennoch konnte einer Zugfestigkeit von $f_{t,0,k}=69,48$ N/mm² ein hoher Wert erreicht werden, der im Bereich der Baubuche S ohne Keilzinken mit $f_{t,0,k}=66,0$ N/mm² liegt.

Arbeitspaket 7.4: Vorspannungen an Gewindestangen

An vorgespannten Knotenverbindungen mit Gewindestangen konnte gezeigt werden, dass Klimaschwankungen bei diesem Material nur einen sehr geringen Einfluss im Vergleich zu den nativen Hölzern

Arbeitspaket 8: Anwendungsbereiche acetylierter Buchen-Furnierschichtholzprodukte (Graf, TV 1)

Die im Projekt nachgewiesene Formstabilität, Dauerhaftigkeit gegenüber verschiedenen biotischen Schadeinflüssen und die guten mechanischen Kennwerten sind geeignet für die Anwendung filigraner Tragstrukturen bei Brücken und Türmen.

Über diese Anwendungen hinaus erscheint eine Eignung in Tragstrukturen im Bereich Mobilität und Windkraftanlagen als technische und zugleich ästhetische Alternative zu bestehenden Materialien aus Stahl und Stahlbeton sinnvoll.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben 1 wurden die mechanischen Kennwerte von acetyliertem Buchen Furnierschichtholz (LVL) umfassend untersucht. Die durchgeführten Arbeiten und Prüfungen gliedern sich in die Abschnitte grundlegende mechanische Kennwerte, Holzverbindungen und Verbindungsmittel, Dauerfestigkeit und Anwendung im bewitterten Außenbereich. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Grundlegende mechanische Kennwerte

Mit im Projekt hergestellten, acetylierten Buchen Furnierschichtholz ließen sich durchweg hohe mechanische Kennwerte ermitteln, die die Leistungsfähigkeit des Materials kennzeichnen. In der Regel wurden charakteristische Werte im Bereich von BauBuche oder darüber erreicht. Bei einigen Kleinprüfkörpern wirkten sich die herstellungsbedingten Risse bei Furnieren negativ aus, die war bei größeren Prüfkörpern nicht mehr signifikant. Die ermittelten Kennwerte können als erste Anhaltspunkte für eine Bemessung von Tragstrukturen herangezogen werden.

Holzverbindungen und Verbindungsmittel

Für die untersuchten Verbindungsmittel konnten ebenfalls gute bis hohe Materialfestigkeiten ermittelt werden, die wiederum mit dem Produkt BauBuche auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Für die Anwendung im bewitterten Außenbereich zeigte sich die hohe Leistungsfähigkeit mit gleichbleibenden Festigkeiten unter nassen Umgebungsbedingungen.

Mit Hilfe von Keilzinkenverbindungen wird es möglich sein aus -in absehbarer Zeit- noch kurzen hergestellten Platten längere Elemente für Träger zu erzeugen. Die Festigkeitsverluste der Keilzinkung sind berechenbar, die Anordnung von Zinkenstößen in einem Träger kann geplant werden.

Dauerfestigkeit

Bei den Langzeitversuchen konnte im Vergleich zu BauBuche eine geringe Kriechzahl nachgewiesen werden. Auch im bewitterten Außenbereich lag dieser Kennwert auf einem niedrigen Niveau. Die Versuche werden weitergeführt.

Alle Versuche zu mechanischen Kennwerten und mit Verbindungsmitteln an wassersatten Prüfkörpern belegen, dass keine oder nur geringe Festigkeitseinbußen zu verzeichnen sind. Damit ist eine hohe Leistungsfähigkeit im Außenbereich gegeben, bei Anwendung von Abminderungsfaktoren würden damit deutliche Tragfähigkeitsreserven übrig bleiben.

Anwendung im bewitterten Außenbereich

Im Projekt wurden Anwendungsfelder herausgearbeitet, die den ermittelten Eigenschaften und Kennwerten entsprechen. Damit können neben Brücken und Türmen auch „neuere“ Felder der Mobilität und im Bereich von Windkraftanlagen mit einem neuen und leistungsfähigen Material erschlossen werden.

Zusammenfassung:

Die Ergebnisse des Teilvorhabens belegen die grundsätzliche Eignung von acetyliertem Furnierschichtholz im bewitterten Außenbereich. Die hohen mechanischen Kennwerte auch im wassersatten Zustand belegen diese Leistungsfähigkeit.

Aus acetyliertem Buchen-Furnierschichtholz steht erstmalig für bewitterte Konstruktionen ein Holzwerkstoff aus heimischem Holz zur Verfügung, welcher sowohl hohe Formstabilität, hohe Dauerhaftigkeit und hohe mechanische Kennwerte für tragende Baukomponenten besitzt. Damit werden im Ingenieurholzbau neue Maßstäbe gesetzt.

Teilvorhaben 2: 2220HV049B Verklebung und Fertigungsprozesse

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben „Verklebung und Fertigungsprozesse“ hatte das Ziel, die Verarbeitbarkeit sowie die Verklebungseigenschaften von acetyliertem Buchenfurnier sowohl unter laborähnlichen Bedingungen als auch im industriellen Maßstab zu evaluieren. Dabei standen die Modifikation der Furniere, die Auswahl geeigneter Klebstoffsysteme sowie die Optimierung der Herstellungsparameter von Furnierschichtholz (LVL) im Fokus. Zudem war die Dauerhaftigkeit von acetyliertem Buchen-LVL Teil der Untersuchungen. Der Fokus lag auf der Kombination aus holzchemischer Modifikation und leistungsfähiger Verklebung, um ein neuartiges, dauerhaftes Laubholzprodukt für Anwendungen der Nutzungsklasse 3 bereitzustellen.

Zentrale Arbeitsschwerpunkte waren:

- **Optimierung der Acetylierung von Buchenfurnieren**, insbesondere in Bezug auf WPG (Weight Percent Gain), Rissverhalten, Dimensionsstabilität und Stapelhomogenität,
- **Analyse der Klebstoffinteraktionen** mit der modifizierten Holzoberfläche für Kalt- und Heißverklebungen, einschließlich Keilzinken- und Flächenverbindungen mit MUF, PRF und PUR,
- **Entwicklung praxisgerechter Fertigungsprozesse** zur industriellen Herstellung von LVL-Platten und Trägern auf Basis acetylierten Furniers,
- **Bewertung des Delaminierungsverhaltens** sowie der mechanischen Eigenschaften unter klimatischer und mechanischer Beanspruchung (z. B. Dauerhaftigkeit, Formstabilität, Tragverhalten).
- **Dauerhaftigkeit und Bewitterung**, die ursprünglich nicht Teil des Forschungsvorhabens waren.

Die Untersuchungen fanden unter sowohl laborähnlichen Bedingungen als auch in industrieller Umgebung statt. Aufgrund von Materialengpässen konnten einige großtechnisch angelegte Prüfungen (z. B. an Mehrlagen-Trägern) nicht vollständig realisiert werden, was in einer ergänzenden Projektverlängerung adressiert wurde.

Die Untersuchungen leisten einen Beitrag zur stofflichen Nutzung heimischer Buche in Nutzungsklasse 3 und zur möglichen Substitution energieintensiver Bauprodukte wie Beton und Stahl.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Modifikation der Buchenholzurniere (Accsys / Miltz)

Die im Arbeitspaket 1 durchgeführte Modifikation der Buchenholzurniere mittels Acetylierung war ein zentraler technischer Schritt zur Herstellung dauerhaft formstabiler LVL-Bauteile. Es konnten mehrere Chargen erfolgreich behandelt und detailliert charakterisiert werden. Die erzielten WPG-Werte (ca. 23–25 %) und das Bulking in Dickenrichtung (ca. 9 %) belegen die Wirksamkeit des Verfahrens. Herausforderungen wie Rissbildung, insbesondere bei breiten Furnieren, wurden erkannt und durch Anpassung der Furnierabmessungen berücksichtigt. Eine Feuchtesortierung vor der Acetylierung war aus technischen Gründen nicht praktikabel.

Arbeitspaket 2.1: Qualitätsbestimmung und Ausbeuteanalyse (Miltz)

Arbeitspaket 2.1 bestätigte die Weiterverwendbarkeit aller acetylierten Furniere trotz teilweiser Rissbildung. Mikroskopische, physikalische und klimatische Untersuchungen belegten die Eignung des Materials für die weitere LVL-Herstellung. Durch eine theoretisch vollständige Verwertung konnte ein Ausbeutefaktor von 1 angenommen werden bzw. gängige Ausbeutefaktoren für LVL. Die reduzierte Wasseraufnahme und Materialfeuchte infolge der Modifikation spricht für eine erhöhte Dimensionsstabilität – ein entscheidender Vorteil im Hinblick auf spätere Verklebprozesse und den Einsatz in Außenanwendungen.

Arbeitspaket 3: Wirkmechanismen der Verklebung mit der acetylierten Buchenholzoberfläche

In den Arbeitspaketen 3.1 und 3.2 wurden die Wirkmechanismen der Verklebung zwischen acetyliertem Buchenfurnier und verschiedenen Klebstoffsystemen untersucht. Ziel war es, die Eignung gängiger Klebstoffe (PF, MUF, PRF, PUR) sowohl für die Kaltverklebung (AP 3.1) als auch für die Heißverklebung (AP 3.2) zu bewerten und verfahrenstechnisch zu optimieren.

Arbeitspaket 3.1: Kaltverklebung

Keilzinken- und Flächenverklebungen mit MUF, PRF und PUR zeigten, dass PRF und PUR deutlich bessere Verklebungseigenschaften auf acetyliertem Furnierschichtholz aufwiesen als MUF. Die Scherzugfestigkeit nach einem Kochwechseltest war bei PRF und PUR erhöht, während MUF deutliche Schwächen zeigte. Messungen ergaben eine leicht hydrophobere Oberfläche, einen erhöhten pH-Wert sowie eine vergleichbare Rauheit im Vergleich zu unbehandeltem LVL. Die Fluoreszenzmikroskopie bestätigte eine Penetration der Klebstoffe, jedoch ohne klare Korrelation zur Verklebungsgüte.

Arbeitspaket 3.2: Heißverklebung

Im Rahmen der Heißverklebung wurden LVL-Platten im Labor und industriell mit PF- und PRF-Klebstoffen unter Variation der Pressparameter hergestellt. Auch hier erwies sich PRF als besonders geeignet, wobei hohe Festigkeiten und Holzbruchanteile erzielt wurden. Acetylierte Furniere zeigten kaum Verdichtung während der Pressung, was auf ihre reduzierte Materialfeuchte zurückzuführen ist. Trotz geringerer Verdichtung wiesen die Platten eine erhöhte Dichte aufgrund der chemischen Modifikation auf. Untersuchungen zur De-Acetylierung bei 150 °C sowie zur Dimensionsstabilität (ASE 70–80 %) belegen die Eignung des Materials für strukturelle Anwendungen unter Feuchtebelastung.

Arbeitspaket 4: Herstellung von Buchenfurnierschichtholzlamellen (Militz)

Basierend auf den vorherigen Arbeitspaketen wurden acetylierte Furnierschichtholzträger im Labor und industriell hergestellt und untersucht. Neben der anfänglichen Herstellung des LVL im Technikumsmaßstab, werden schon früh die Erkenntnisse zu den Herstellungsparametern mit den anderen Projektpartnern kommuniziert. Versuche zur Delaminierung (EN 14080). Insbesondere Verzögerungen bei der LVL-Herstellung und Materialverfügbarkeit erschwerten die Umsetzung. Ergänzend wurden daher kleinere Dauerhaftigkeitstests (Weiß- und Braunfäule, Moderfäule, Erdkontakt, Meerwasser) durchgeführt, die ursprünglich nicht im Arbeitsplan vorgesehen waren. Ferner wurde die Proben einer Schnellbewitterung unterzogen sowie eine Bewitterung im Freiland (Start Mai 2025).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben 2 wurde die technologische Machbarkeit der Herstellung von Furnierschichtholz (LVL) aus acetyliertem Buchenholz umfassend untersucht. Die Arbeiten gliederten sich in die Bereiche Modifikation, Verklebung, Fertigungsprozesse und Dauerhaftigkeit. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Acetylierung und Furniercharakterisierung:

Die Acetylierung der Buchenfurniere wurde mit reproduzierbaren WPG-Werten von ca. 23–25 % erfolgreich durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Modifikation zu einer signifikant reduzierten Wasseraufnahme und einer verbesserten Dimensionsstabilität führt (ASE bis zu 80 %). Gleichzeitig wurden Rissbildung und Sprödigkeit als zentrale Herausforderungen identifiziert, insbesondere bei breiten Furnieren. In der Folge wurde die Furnierbreite auf 600–1000 mm begrenzt. Die Mikroskopie bestätigte die Modifikation auf Zellwandebene. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für eine praxisnahe Sortierung und Verarbeitung.

Verklebung:

Die Untersuchungen zur Kalt- und Heißverklebung mit MUF, PRF und PUR zeigten, dass insbesondere PRF und PUR für acetyliertes Buchen-LVL geeignet sind. MUF war weniger leistungsfähig, insbesondere in Keilzinkenverbindungen. PRF- und PUR-Verbindungen erreichten gute Scherzugfestigkeiten sowie hohe Holzbruchanteile – auch nach Wasserlagerung oder Kochwechsellast. Die Penetration der Klebstoffe konnte mikroskopisch bestätigt werden, war jedoch nicht gleichmäßig. Erhöhte pH-Werte und hydrophobere Oberflächen nach der Acetylierung beeinflussten das Adhäsionsverhalten messbar.

Materialfeuchte sowie Quell- und Schwindverhalten:

Auch unter wechselnden Klimabedingungen wiesen die Proben eine deutlich geringere Feuchteaufnahme auf. Die Anti-Swelling-Effizienz (ASE) lag je nach Charge im Bereich von 70–80 %. Die reduzierte Gleichgewichtsfeuchte, bestätigt durch DVS-Messungen, unterstreicht das Potenzial des Materials für Anwendungen im Außenbereich.

Dauerhaftigkeit und Bewitterung:

Die durchgeführten Dauerhaftigkeitsprüfungen, zeigten eine in allen Fällen signifikant verbesserte Dauerhaftigkeit der acetylierten LVL-Proben im Vergleich zu unbehandeltem Material. Dabei wurde kein Pilzbefall bzw. Befall von Bohrmuschel festgestellt. Ebenfalls zeigten die acetylierten Prüfkörper weniger Rissbildung Pilzbefall in einer Schnellbewitterung im Vergleich zu unbehandelten Prüfkörpern. Ergänzend wurden ausgewählte LVL-Probekörper im Außenbereich exponiert, um das Langzeitverhalten unter realen Witterungsbedingungen zu beobachten. Diese Freilandbewitterung soll Aufschluss über mögliche Verfärbungen, Oberflächendegradation und strukturelle Veränderungen im mehrjährigen Verlauf geben und damit die Laborergebnisse validieren.

Industrielle Herstellung:

Die industrielle Fertigung von LVL-Platten aus acetyliertem Furnier gelang sowohl im Labor als auch beim Industriepartner. Dabei zeigte sich, dass die Furniere – infolge ihrer geringeren Materialfeuchte – während der Heißverpressung kaum verdichtet wurden. Dennoch erreichten die hergestellten Platten eine höhere Dichte als unbehandelte Referenzen, was auf die Massezunahme durch die chemische Modifikation zurückzuführen

ist. Bei der Verarbeitung traten vereinzelt Verzüge auf, die durch gezieltes „Stürzen“ der Furniere minimiert werden konnten.

Zusammenfassung:

Die Ergebnisse des Teilvorhabens belegen die prinzipielle Eignung acetylierten Buchenfurniers als Grundlage für tragende Holzprodukte im Außenbereich. Die Kombination aus chemischer Modifikation und angepassten Klebstoffsystemen liefert leistungsfähige, formstabile LVL-Produkte. Das Teilvorhaben trägt damit zur Erweiterung der stofflichen Buchenholznutzung in Nutzungsklasse 3 bei und bietet eine biobasierte Alternative zu konventionellen, energieintensiven Baustoffen.