

Investigation of the Impact of Micro Structuring on Bonding Behaviour of Beechwood

D. B. Moanda
Bernener Fachhochschule Architektur Holz und Bau
Biel/Bienne, Schweiz



Investigation of the Impact of Micro Structuring on Bonding Behaviour of Beechwood

1. Einleitung

In der Schweiz wird der grösste Teil des Holzes, das jährlich für verschiedene Anwendungen im Holzbau verarbeitet wird, aus Nadelholz gewonnen. Während die Buche einen jährlichen Zuwachs von rund 2 Millionen Kubikmetern, verzeichnet, dominiert die Fichte mit einem Zuwachs von 5 Millionen Kubikmetern deutlich. Diese Dominanz lässt sich gleichermaßen auf den Baumarkt übertragen, wobei in der Schweiz für jede Million Kubikmeter Fichtenholz nur knapp 36 000 Kubikmeter Buchenholz verwendet [1] werden. Dieser bemerkenswerte Unterschied ist hauptsächlich auf die Ausrichtung der Holzindustrie zurückzuführen.

Darüber hinaus motiviert die Tatsache, dass Fichtenholz eine begrenzte Ressource ist, die Forschung zur Entwicklung von Bearbeitungstechniken für die optimale Nutzung von Laubholz. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Buche und die grossen Reserven in der Schweiz machen sie zum idealen Kandidaten für den Versuch, den Baumarkt wieder ins Gleichgewicht zu bringen. Aufgrund der geringen Nutzung von Laubholz in Mitteleuropa haben die Bearbeitungstechniken noch keinen ähnlichen technologischen Entwicklungsstand erreicht wie die für Nadelholz.

Die Verklebung ist sicherlich eine wichtige Herausforderung, die zu bewältigen ist. Es ist selbstverständlich, dass die Verwendung von Holzwerkstoffen in Holzbauanwendungen durch Verklebung ermöglicht wird. Daher ist eine effiziente Verklebung von Laubhölzern ausschlaggebend für den Markteintritt wettbewerbsfähiger Produkte aus Laubholz.

Um Buchenholz (*Fagus Sylvatica* L.) mit den gängigen Klebstoffen zu verkleben, muss eine geschlossene Wartezeit eingehalten werden und im Falle von 1K-PUR-Klebstoffen muss die zu verklebende Oberfläche zunächst mit einem Primer vorbehandelt werden. Die geschlossene Wartezeit kann bis zu einer Stunde betragen [2]. Beide Anforderungen erhöhen die Produktionskosten und/oder verringern die Produktivität, da die Rentabilität nur durch den Einsatz sehr grosser und/oder spezialisierter Produktionsanlagen erreicht werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit untersucht, welche Möglichkeiten zur Verbesserung der Verklebung von Buchenholz durch Strukturhobeln bestehen. In mehreren Studien wurde die Möglichkeit untersucht, die Verklebungsfestigkeit durch Stirnfräsen zu verbessern. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie der Innosuisse durchgeführt. In Vorarbeiten wurde ein positiver Einfluss der Mikrostrukturierung auf die Verklebungsqualität von Buchenholz festgestellt [3]. Aufgrund der durch diese Verklebung erreichten Stabilität gekoppelt mit der hohen Steifigkeit von Laubholz, können Beton und Stahl durch Laubholz ersetzt werden.

Auf europäischer Ebene ist es für die Zukunft wichtig, die Verarbeitung von Laubholz zu beherrschen (optimieren), da eine Verschiebung von nadelholzdominierten Wäldern hin zu Wäldern mit einem höheren Anteil an Laubholzarten absehbar ist. Die Verbesserung der Technologien für Laubholzverarbeitung kann der Holzindustrie helfen, einen möglichen Rohstoffmangel zu überstehen [4].

Im Gegensatz zur Fichte fördert die Buche anatomisch bedingt ein tiefes Eindringen von Klebstoff. Dieses Eindringungsverhalten kann zur Bildung von sehr dünnen Klebefugen führen [5][6][7]. Hass, [8] konnte das komplexe Gefässnetzwerk der Buche mittels röntgentomographischer Synchrotronstrahlungsmikroskopie aufklären. Bis dahin wurde das Eindringungsverhalten eines Klebstoffs nur mit Hilfe der maximalen Eindringtiefe beschrieben. Er zeigte auch die Liste der wichtigsten Faktoren, die das Eindringen des Klebstoffs in das Holz beeinflussen. Im Falle von sehr dünnen Klebefugen ist die Haftfestigkeit gering. Dies zeigt, dass es irreführend sein kann, sich nur auf die Klebstoffpenetration zu verlassen, um die Qualität einer Verklebung zu beurteilen [3]. Buchenholz hat eine starke volumetrische Schwindung, die bis zu 18 % betragen kann [9]. Dies schränkt die Anzahl der verwendbaren Klebstoffe ein, da höhere mechanische Eigenschaften erforderlich sind, um

den inneren Spannungen des Holzes standzuhalten. Bei der Delaminierungsprüfung muss der Klebstoff die durch diese besonders starke Schwindung verursachten Kräfte aufnehmen. Die Verwendung von Klebstoffen, die ursprünglich für Nadelhölzer (wie Fichte, Kiefer und Tanne) entwickelt wurden, erfordern für die Verklebung von Laubhölzern (wie Buche, Esche und Eiche) aufgrund der zuvor genannten Faktoren eine Anpassung der Prozessparameter. Die Dichte einer Holzart ist ein guter Faktor zur groben Einschätzung ihrer Verklebbarkeit. Tanne und Balsa gehören beispielsweise in die Kategorie «leicht zu verkleben¹», während Buche und Esche in die Kategorie «zufriedenstellend zu verkleben²» fallen, wie Frihart und Hunt, [10] es darlegen. Eine hohe Dichte entspricht dickeren Zellwänden und kleineren Lumina, die das Eindringen des Klebstoffs in das Holzgewebe erschweren. Diese komplizierte Klebstoffeindringung führt dazu, dass die mechanische Verriegelung auf weniger als zwei Zellen Tiefe begrenzt ist. Bei Holzarten mit hoher Dichte (Laubholz oder dichtes Nadelholz) ist ein stärkeres Quellen und Schwinden zu beobachten. Die Holzporosität ergibt sich aus der Holzdicke und der holzartbezogenen Anatomie.

Knorz *et al.* [11] und Luedtke *et al.* [12] untersuchten den Einfluss der Oberflächenvorbereitung auf die Verklebungsqualität von Massivholz und die erzielte Verbundfestigkeit. In dem nachfolgenden Abschnitt wird der aktuelle Stand der Technik zu diesem Thema zusammengefasst. Hobeln, Schleifen und Planfräsen wurden in vielen Forschungsarbeiten berücksichtigt [13][14][15].

Beim Hobeln hat die Schärfe der Hobelmesser einen Einfluss auf die Oberflächenqualität [14][16]. Singh *et al.* [16] beschreibt anhand mikroskopischer Analysen, wie stumpfe Messer das Eindringen von Klebstoff in das Holz beschweren. Kläusler *et al.* [14] bestätigten die Ergebnisse von Singh *et al.* [16], da sie berichteten, dass mit scharfen Messern gehobelte Oberflächen die Zugscherprüfung bestanden [17][18]. Das Schleifen unterscheidet sich von den anderen Oberflächenvorbereitungsmethoden durch die Schneidengeometrie [19][20]. Beim Schleifen ist die Korngrösse ausschlaggebend für die Verklebbarkeit der erzeugten Oberflächen. Feine Körnung führt zu einer Verbesserung des Adhäsionsverhaltens [14][17]. Grobe Körnung wird dagegen mit schlechter Verklebung assoziiert [21]. B. Moanda *et al.* [22] gaben einen Überblick über aktuelle Erkenntnisse zum Hobeln und Schleifen im Zusammenhang mit der Holzhaftung.

Die Rauheit ist ein quantitativer Parameter, der zur Charakterisierung einer Oberflächenbehandlungsmethode verwendet wird [15]. Es gibt Studien, die einen positiven Einfluss der Rauheit auf die Holzverklebung feststellen [14][23]. Dieser positive Einfluss wird auf die vergrösserte Klebefläche zurückgeführt. Allerdings sind die mit stumpfen Messern gehobelten Oberflächen rauer als die mit scharfen Messern gehobelten, und die Verklebungsleistung ist schlechter [24]. Andererseits können zu raue Oberflächen einen idealen Kontakt zum Substrat verhindern. Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Rauheit. Aufgrund der Anisotropie des Holzes messen die meisten Studien die Oberflächenrauheit quer zur Faser [14][15][25]. Die durch die Oberflächenbearbeitung verursachten Schäden auf mikroskopischer Ebene scheinen geringer zu sein als die daraus resultierende Vergrösserung der für die Verklebung zur Verfügung stehenden Fläche, wie Murmanis, *et al.* [26] mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie an geschliffenen und gehobelten Oberflächen nachweisen konnten.

Um eine erfolgreiche Verklebung von Hartholz zu erreichen, ist bei der Verwendung von Melamin-Formaldehyd-Klebstoffen (MUF- oder MF-Systemen) eine lange geschlossene Wartezeit erforderlich. Diese Wartezeit kann bei der Verwendung von MUF sogar länger als eine Stunde sein [2][27]. Bei der Verwendung von Einkomponenten-Polyurethanklebstoffen (1K PUR) war es nicht möglich, die Delaminierungsprüfung nach EN 302-2 ohne chemische Vorbehandlung der Oberfläche zu bestehen [12].

Die Mikrostrukturierung hat ihre Wurzeln im Bereich der Oberflächenbeschichtung. Es hat sich gezeigt, dass durch Strukturhobeln der zu beschichtenden Oberfläche die Dauerhaftigkeit der Beschichtung erhöht werden kann [28]. Es wurden Untersuchungen an Nadelhölzern für Aussenanwendungen durchgeführt, bei denen eine bessere Haltbarkeit der Haftung zwischen Holz und Beschichtung erforderlich ist.

¹ Sehr leichtes Verbinden mit Klebstoffen unterschiedlichster Eigenschaften und unter verschiedensten Klebebedingungen

² zufriedenstellende Verklebung mit qualitativ hochwertigen Klebstoffen unter gut kontrollierten Klebebedingungen

Lehmann and Volkmer, [3] untersuchten die Verklebungsqualität von mikrostrukturierten Oberflächen für Harthölzer. Sie verwendeten drei verschiedene Holzarten: Esche (*Fraxinus excelsior* L.), Buche (*Fagus Sylvatica* L.) und Fichte (*Picea Abies* Karst.). Die auf der Oberfläche bearbeitete Mikrostruktur wurde mit Hilfe der Lichtmikroskopie beobachtet. Die Profiltiefe wurde mit 43 μm angegeben. Es wurden Untersuchungen an Klebefugen durchgeführt, die mit 1K-PUR (ohne Primer) und MUF ausgeführt wurden. Diese Serien wurden einem Delaminierungstest gemäss EN 302-2 unterzogen. Die Ergebnisse zeigten, dass bei MUF das einseitige Mikrostrukturhobeln der Proben einen vielversprechenden Einfluss auf die Klebequalität hatte. Sie berichteten, dass keine geschlossene Wartezeit erforderlich war, um die Delaminierungsanforderungen für MUF zu erfüllen. Andererseits war der Einfluss der Mikrostrukturierung bei den mit PUR geklebten Proben immer noch sichtbar, die Delaminationswerte lagen jedoch weit über dem akzeptierten Grenzwert. Der Einsatz von 1K-PUR ohne Primer für die Verklebung von Laubholz wies eine tiefe Verbundqualität auf. Es wurde auch beobachtet, dass die einseitige Mikrostrukturierung bessere Ergebnisse liefert als die beidseitige Mikrostrukturierung. Die 1K-PUR-Proben konnten weder den Niedrig- noch den Hochtemperaturprozess der Norm EN 302-2 erfüllen. Der Brettschichtholzaufbau dieses Experiments führte zu mikrostrukturierten und normal gehobelten Oberflächen innerhalb derselben Platte. Dies könnte die Ergebnisse ebenfalls beeinflusst haben, denn sobald die schwächste Klebefuge versagt, werden die anderen Klebefugen entlastet und es kommt zu weniger Delamination. Auch der Formfaktor kann in Betracht gezogen werden. Es ist bekannt, dass eine kleinere Probengrösse für die Delaminierung mit Hartholz die Testergebnisse verbessern kann[29].

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Verklebbarkeit von Buchenholz zu untersuchen. Durch die Charakterisierung der strukturierten Hobelflächen und die Verwendung verschiedener Klebstoffe mit unterschiedlichen Prozessparametern sollten Erkenntnisse über das Ausmass der positiven Wirkung des Strukturhobelns gewonnen werden, die bereits in früheren Studien beobachtet werden konnten.

2. Methodik

2.1. Ausführung der Zugscherprüfung

Bei allen durchgeführten Klebeverbindungen wurde Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.) verwendet. Für den Zugscherversuch lag der Jahrringwinkel zwischen 60° und 85°, um die Auswirkungen des Holzes auf die Ergebnisse zu verringern. Es ist bekannt, dass ein flacher Jahrringwinkel mit einer niedrigen Zugscherfestigkeit im nassen Zustand verbunden ist [30][31]. Die Buchenbretter wurden im Normalklima (20 °C / 65 % relative Luftfeuchtigkeit) konditioniert, bis die Gleichgewichtsfeuchte von 12 % erreicht war. Unter diesen Bedingungen betrug die durchschnittliche Dichte ρ der Bretter $700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Fünf verschiedene Oberflächenvorbereitungen wurden verglichen: scharfes Hobeln, Hobeln mit stumpfen Messern, Schleifen, Strukturhobeln mit grobem und feinem Muster. Um den Einfluss der Oberflächenvorbereitung auf die Verklebungsqualität zu beurteilen, wurde ein Zugscherversuch nach EN 302-1 [32] durchgeführt. Die verschiedenen hergestellten Oberflächen sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: geprüfte Oberflächenbeschaffenheiten

Oberflächenbearbeitung	Werkzeug	Beschreibung	Code
Hobeln	scharfe Messer	Hobeln (normal)	N
Hobeln	stumpfe Messer	Hobeln (stumpf)	P
Hobeln	grobstrukturierte Messer	Strukturhobeln	S1
Hobeln	feinstrukturierte Messer	Strukturhobeln	S2
Schleifen	P100 Schleifband	Schleifen	B

Der Klebstoff wurde einseitig mit einer auf 125 g/m^2 eingestellten Auftragsmenge mit einem Holzspachtel aufgetragen. Als Klebstoff für die vorgefertigten Bretter wurde ein Einkomponenten-Polyurethan verwendet. Dabei handelt es sich um einen Einkomponenten-Klebstoff mit einer Verarbeitungszeit von 30 Minuten (Offenzeit), der für tragende Anwendungen mit Nadelholz verwendet wird. Durch den Verzicht auf Primer bei 1K-PUR wurde ein Adhäsionsversagen erzielt, um den Einfluss der Holz Auswahl auf das Ergebnis zu eliminieren, da der Holzbruchanteil auf ein Minimum reduziert wird.

Die strukturgehobelten, vorgefertigten Bretter weichen von den Normen (EN 205 [33]) ab, da die Faltung nicht eingehalten werden konnte, um einseitig strukturierte, gehobelte Verbindungen zu gewährleisten. Wie zuvor erwähnt ist bekannt, dass eine einseitige Strukturierung bessere Ergebnisse erzielt [3]. Das Brett wurde jedoch gedreht, um ein Fischgrätmuster zu erhalten. Aus produktionsbedingten Gründen waren die strukturgehobelten vorgefertigten Platten³ 20 mm dick und mussten nach der Verklebung auf einer normalen Dickenhobelmaschine auf 10 mm abgehobelt werden (mit einem gleichmässigen Abtrag von 5 mm auf jeder Seite). Die Verklebungsparameter sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Tabelle 2: Verklebungsparameter

Klebstoff	Geschlossene Wartezeit [min]	Jahringlage Lamellen [°]	Presszeit [min]	Pressdruck [Mpa]	Auftragsmenge [g/m ²]	Auftragungsmittel
1K PUR	0	60-85	75	0.8	125	Holzspachtel

Die Rauheitsmessung erfolgte innerhalb von 24 Stunden nach der Bearbeitung. Der Oberflächenrauheitsparameter R_a (arithmetisches Mittel der absoluten Ordinatenwerte) wurde auf einer Messlänge von 4 mm, mit einer Abschnittslänge von 0,5 mm bei einer Messgeschwindigkeit von $0,5 \text{ mm s}^{-1}$ bestimmt. Die Messung wurde mit dem Surf test SJ 210 Rauheitsmessgerät in Übereinstimmung mit DIN EN ISO 4287:2010 [34] durchgeführt.

2.2. Delaminierungsprüfung

Um die Verklebungsqualität strukturgehobelter Lamellen zu vergleichen, wurden Delaminierungstests an Buchenholz (*Fagus Sylvatica L.*) durchgeführt. Das ausgewählte Holz hatte einen flachen Jahringwinkel, wie in der Norm EN 302-2 [35] vorgegeben. Das Holz wurde zunächst im Normalklima (20 °C / 65 % relative Luftfeuchtigkeit) klimatisiert, bis die Gleichgewichtsfeuchte von 12 % erreicht war. Die gemessene durchschnittliche Dichte ρ der Bretter betrug $(687 \pm 27) \text{ kg/m}^3$. Das Holz wurde nach der Dichte sortiert und die Dichteklassen wurden wie folgt definiert:

- C1 ($627 - 662 \text{ kg/m}^3$)
- C2 ($662 - 697 \text{ kg/m}^3$)
- C3 ($697 - 732 \text{ kg/m}^3$)

Die ersten beiden Bretter stammen aus der Klasse C1, das mittlere Brett paar aus der Klasse C3 und das letzte Paar aus der Klasse C2. Dieser Aufbau wurde für alle Delaminierungsprüfkörper eingehalten. Aufgrund der Produktionskapazität war die Länge des Brett schichtholzes auf 250 mm begrenzt, und es wurde ein Delaminierungsprüfkörper aus dem Brett schichtholz entnommen.

Für die Delaminierungsprüfung wurden 1K-PUR (ohne Primer mit 10 min Offenzeit) und Melaminformaldehyd (30 min Offenzeit) gewählt.

Da beide verwendeten Klebstoffsysteme für tragende Anwendungen zugelassen sind, wurde das für Typ-I-Klebstoffe geeignete Hochtemperaturverfahren angewendet. Jedoch ist bei 1K-PUR ist die Wasserbeständigkeit der Verklebung stark vom Primer abhängig [36]. Die Prozessparameter sind in Tabelle 3 dargestellt.

³ Verklebte Bretter voraus Zugscherproben zugeschnitten werden

Tabelle 3: Verklebungsparameter

Klebstoff	Geschlossene Wartezeit [min]	Presszeit [min]	Pressdruck [N/mm ²]	Auftragsmenge [g/m ²]	Oberflächenvorbereitung	Auftragsmittel
1K PUR	0	75	0.9	125	grob- und fein	Holzspatel
	0	75	0.9	200	grob- und fein	Holzspatel
	0	75	0.9	125	normal gehobelt	Holzspatel
	0	75	0.9	200	normal gehobelt	Holzspatel
MF	0	120	1	250	grob- und fein	Holzspatel
	0	120	1	400	grob- und fein	Holzspatel
	20	120	1	250	normal gehobelt	Holzspatel
	20	120	1	400	normal gehobelt	Holzspatel

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Rauheit

Die Rauheitsanalyse der strukturierten gehobelten Oberflächen zeigt, dass die Grösse des verwendeten Musters die gemessene Rauheit erheblich beeinflussen kann. **Abbildung 1** zeigt einen Vergleich aller im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bearbeitungsmethoden. Die Grobstruktur weist den höchsten R_a -Wert auf, gefolgt von der Feinstruktur, die im Vergleich eine geringere Rauheit aufweist. Die normal gehobelte Oberfläche weist eine geringere Rauheit auf als die schlecht gehobelte und die geschliffene Oberfläche. Kläusler *et al.* [14] führten ähnliche Untersuchungen an Buchenholz (*Fagus sylvatica L.*) durch und kamen zu den gleichen Ergebnissen. Sie berichteten, dass scharfes Hobeln die glattesten Oberflächen ergibt, gefolgt von feinem Schleifen und stumpfem Hobeln. Bei ihren Untersuchungen verwendeten sie ein viel glatteres Hobeln, da der Vorschub f_z 0,5 mm betrug. Demgegenüber steht der zu 1,4 mm gewählte Vorschub bei der für dieses Projekt verwendeten Dickenhobelmaschine. Die Vierseitenhobelmaschine hatte einen weniger harten Zahnvorschub ($f_z=1,13$ mm) mit weniger tiefen Hobelschlägen, was sicherlich auch zur Glättung der Rauigkeit beigetragen hat. Obwohl die grob strukturierte Serie die raueste Oberfläche aufwies, lieferte sie nicht die besten Ergebnisse im Zugscherversuch. Dies veranschaulicht einmal mehr, warum es nicht so einfach ist, die Verklebungsqualität basierend auf der Rauheit als Oberflächenparameter vollständig vorherzusagen. Die schlecht gehobelte Oberfläche wies eine geringere Dispersion auf und war sogar glatter als das Schleifen mit einer P100-Körnung. Für beide Gruppen (PPGB, BPGB) liegen die Medianwerte recht nahe beieinander, so dass der Unterschied in Bezug auf die Rauheit nicht signifikant zu sein scheint. In der vorgenannten Studie wurde nicht mit P100-Schleifpapier geschliffen. Der mit P100-Schleifpapier erzielte Wert scheint im Vergleich zu dem von Kläusler *et al.* [14] für mit P120 geschliffene Oberflächen ermittelten Wert recht hoch zu sein. Der Unterschied ist wahrscheinlich auf unterschiedliche Schleifparameter zurückzuführen. Hernández und Cool, [37] fanden ein anderes Verhalten bei einem leichteren Hartholz – Birke. Sie berichteten, dass scharfes Hobeln eine grössere Rauheit aufweist als das Schleifen in drei aufeinanderfolgenden Stufen mit den Körnungen 100 – 120 – 150. Die Wahl einer solch feinen Körnung ist nachvollziehbar, da die genannte Studie darauf abzielte, die Holzbeschichtung zu optimieren.

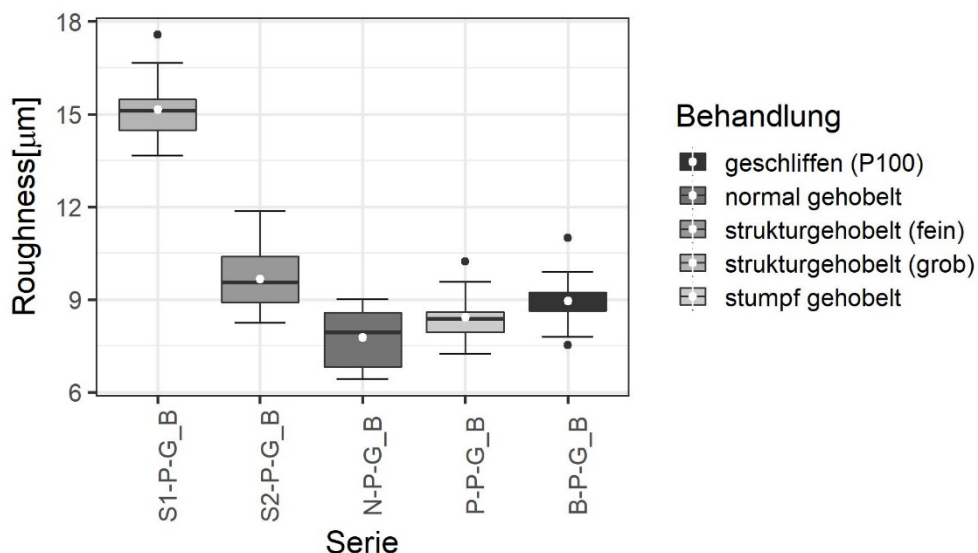


Abbildung 1: Boxplots zeigen Minimal- und Maximalwert, der weisse Punkt zeigt den arithmetischen Mittelwert, die dicke horizontale Linie den Median, die untere Linie des Kastens steht für das erste Quartil und der Obere Linie stellt das dritte Quartil dar. Die Ausreisser werden durch dunkle Punkte dargestellt.

3.2. Zugscherfestigkeit

Im trockenen Zustand schnitten die normal gehobelten Bretter am besten ab. Aber die gemessene Zugscherfestigkeit bezieht sich mehr auf das Holz, da der Holzbruchanteil sehr gross war. Die grob strukturierten Prüfkörper zeigten die zweithöchste Zugscherfestigkeit (rund 15 MPa) und die geringste Streuung (siehe **Abbildung 2**). Diese geringe Streuung ist auf den niedrigen Holzbruchanteil zurückzuführen. An dieser Stelle wurde Klebstoff effektiv geprüft. Beim Schleifen war die Streuung am grössten, obwohl der Mittelwert über der 15-MPa-Linie liegt, was sich durch die hohe Streuung beim Holzfallprozentsatz (WFP) erklären lässt. Wenn bei einer Trockenprüfung der WFP nahe bei 100 % liegt, entspricht die gemessene Zugscherfestigkeit der Holzfestigkeit. Die niedrigste WFP-Leistung wurde bei den grob strukturierten, gehobelten Proben festgestellt. Da sie recht hohe TSS-Werte aufwiesen, kann man daraus schliessen, dass diese Gruppe in der Trockenphase gut abschneidet. Die grobe Struktur scheint die Last gut auf die Schnittstelle zu verteilen. Die normal gehobelten Bretter übertrafen die anderen Gruppen bei den prozentualen Werten des Holzversagens. Die meisten Proben dieser Gruppe wiesen einen WFP von 100 % auf. Die gemeldeten hohen Widerstandswerte können mit der Holzfestigkeit in Verbindung gebracht werden. Selbst im nassen Zustand wies diese Gruppe einen höheren WFP auf. Alle Proben erfüllten die Anforderungen der Trockenprüfung. Dieses Ergebnis stimmt mit dem überein, was in früheren Forschungsprojekten bereits festgestellt wurde. Es wurde berichtet, dass selbst schlecht gehobelte Bretter in dieser Stufe gut abschnitten [14] [2]. Die Aussagekraft von einem A1 Test (nach EN 302-1 Tabelle 1) ist durch den hohen Holzbruchanteil beeinträchtigt.

Unter nassen Prüfbedingungen sind schlecht gehobelte Proben am schwächsten, da sie einen weit niedrigeren Durchschnittswert und einen dramatisch niedrigen Medianwert zusammen mit der grössten gemeldeten Dispersion aufweisen, wie in **Abbildung 2** dargestellt. Die geschliffenen Exemplare haben den Test knapp bestanden. Die meisten Gruppen haben ein WFP von Null - die Ergebnisse zeigen, dass das prozentuale Versagensverhalten des Holzes bei Einkomponenten-Polyurethan (ohne Primer) nicht zuverlässig durch die Wahl einer bestimmten Oberflächenvorbereitungsmethode beeinflusst werden kann. Diese Beobachtung wurde bereits in einer anderen Studie gemacht, die 1K-PUR untersucht hat [14]. Die geringste Streuung der Zugscherfestigkeit wurde bei grob strukturierten, gehobelten Probekörpern beobachtet. Die hohe Rauheit dieser Gruppe scheint mehr Verankerung für eine bessere Haftung zu bieten. Obwohl alle WFP gleich Null sind, ist die Haftung stabil genug, um das Bestehen der Prüfung zuverlässig zu gewährleisten. Die feinere Struktur zeigt ein anderes Verhalten mit einer recht hohen Dispersion; der zweithöchsten gemessenen Dispersion nach den stumpf gehobelten Proben. Die scharf gehobelte Ober-

fläche weist einen besseren Zugscherfestigkeits-Durchschnittswert auf als die geschliffene. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Untersuchungen überein, die an verschiedenen Holzarten durchgeführt wurden [14][15][26]. Dennoch konnten zerkleinerte Zellen nicht mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie beobachtet werden, wie es Murmanis *et al.* [26] taten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie eine sehr grobe Körnung (36) verwendeten. Die relativ aktuelle Studie von Kiliç, [15] zeigte, dass eine übermäßige Rauheit die Scherfestigkeit von PUR- und PVAc-Klebstoffen verringert, wobei die mit einer Kreissäge erzeugte Oberfläche das niedrigste Ergebnis lieferte, während die scharf gehobelte Oberfläche die beste Leistung aufwies.

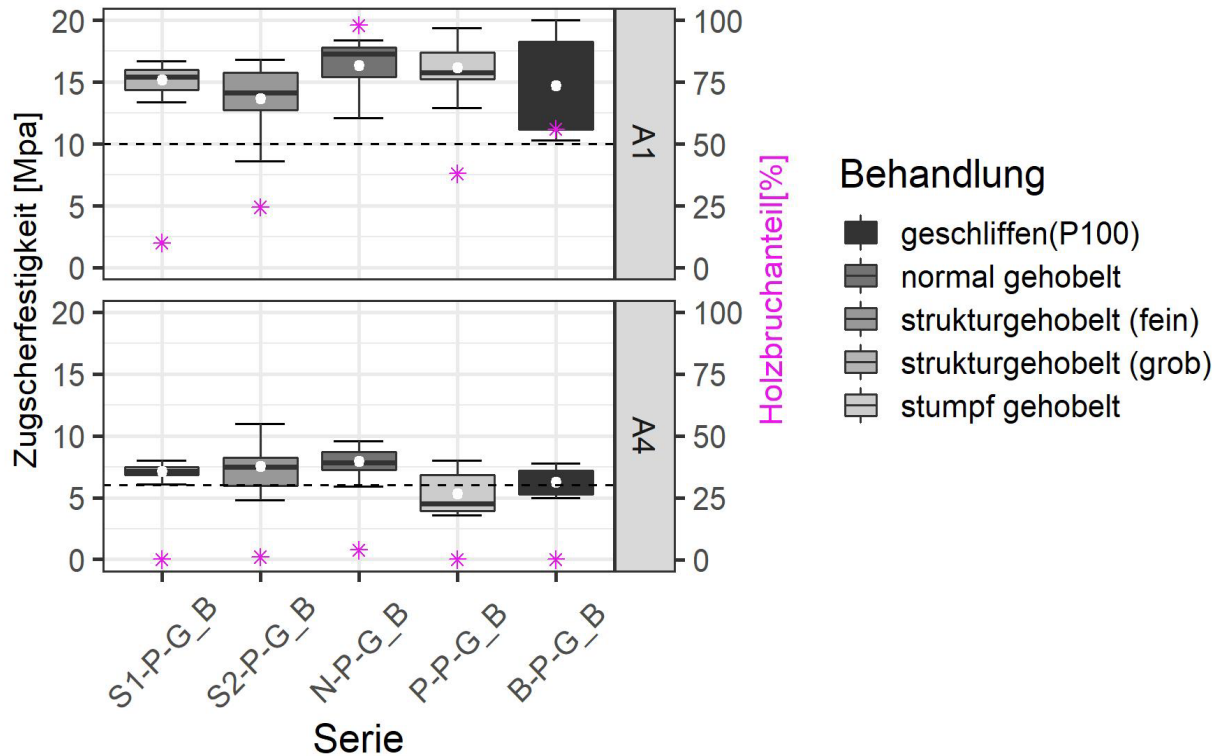


Abbildung 2: Zugscherfestigkeit nach EN 302-1 für die fünf Oberflächenbearbeitungen. Boxplots zeigen Minimal- und Maximalwert, der weiße Punkt zeigt den arithmetischen Mittelwert an, die dicke horizontale Linie stellt den Median dar. Der Holzbruchanteil wird durch einen Stern dargestellt.

3.3. Delaminierungsprüfung

Ergebnisse für 1K PUR

Die Ergebnisse wurden als Durchschnittswerte in Form von Farbbalken in einem Balkendiagramm dargestellt (vgl. Abbildung 3)

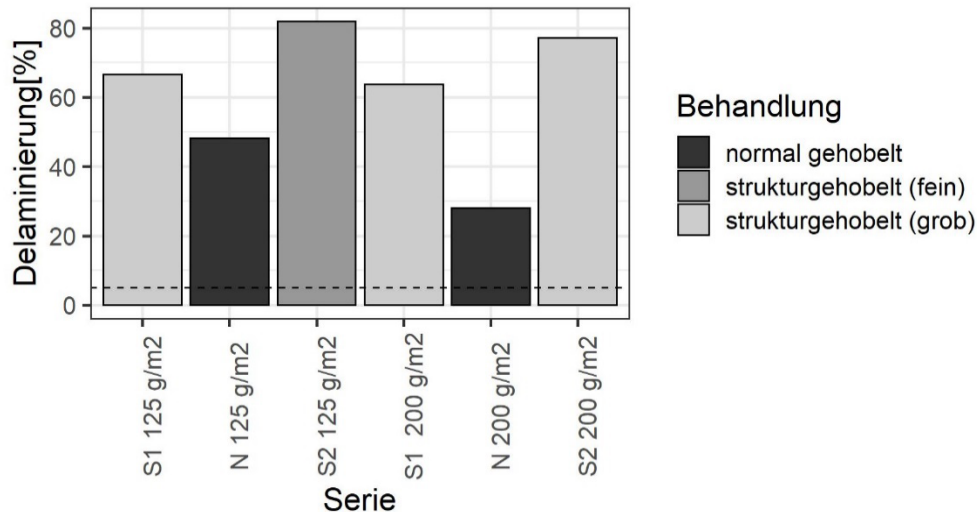


Abbildung 3: Delaminierungsergebnisse nach EN 302-2 für 1K-PUR. die gestrichelte Linie zeigt den nach der verwendeten Norm (SN EN 302-2) zulässigen Höchstwert der Delaminierung.

Keine mit PUR verklebte Probe bestand den Test. Sogar beide Referenzplatten zeigten viel höhere Delaminierungswerte als die zugelassene Delaminierung. Ein positiver Einfluss der Mikrostrukturierung konnte bei diesen Daten nicht festgestellt werden, im Gegensatz zu dem, was in der Literatur gefunden wurde [3]. Eine Primerlösung kann nicht durch das Strukturhobeln ersetzt werden. Wie erwartet, haben die normal gehobelten Oberflächen ohne Primer den Delaminierungstest eindeutig nicht bestanden. In vielen Studien wurde die Bedeutung der chemischen Vorbehandlung von Laubholz etabliert [2][12][38][39]. Dennoch ist noch nicht vollständig geklärt, warum strukturiert gehobelte Brettschichthölzer noch schlechter abschneiden als normal gehobelte Brettschichthölzer. Ein Erklärungsversuch könnte die positive Wirkung der Rauigkeit sein. De Moura und Hernández,[40] berichteten über ein besseres Alterungsverhalten für Oberflächen mit geringerer Rauigkeit, als sie geschliffene mit gehobelten Oberflächen verglichen. Die Rauigkeit ist auf die Oberfläche beschränkt, aber auch Schäden knapp unter der Holzoberfläche können die Delaminierungsbeständigkeit beeinflussen[11].

Ergebnisse für Melaminformaldehyd

Die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung für mit Melaminformaldehyd verklebten Balken ist in **Abbildung 4** zusammengefasst. Beide strukturgehobelten Leimbalken erfüllten die Delaminierungsanforderung nach EN 302-1 für Klebstoffe vom Typ I ohne geschlossene Wartezeit. Dies bestätigt die Ergebnisse von Lehmann und Volkmer, [3]. Das mit 400 g/m² geklebte Referenz-Leimholz (normal gehobelt) mit einer geschlossenen Wartezeit von 20 Minuten hat den Delaminierungsversuch nicht bestanden, da der Delaminierungswert leicht erhöht war, während ein mit nur 250 g/m² geklebtes Brettschichtholz den Test bestanden hat. Ausserdem stimmen die Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus den Zug-scherfestigkeitsprüfungen überein, die zeigten, dass fein strukturierte, gehobelte Oberflächen besser abschneiden. Es wurde auch festgestellt, dass die normal gehobelten Prüfkörper ein besseres Klebeverhalten aufweisen, wenn die Auftragsmenge des Klebstoffs abnimmt. Geringere Auftragsmengen auf strukturgehobelten Oberflächen führen zu einer noch schlechteren Delaminierungsbeständigkeit.

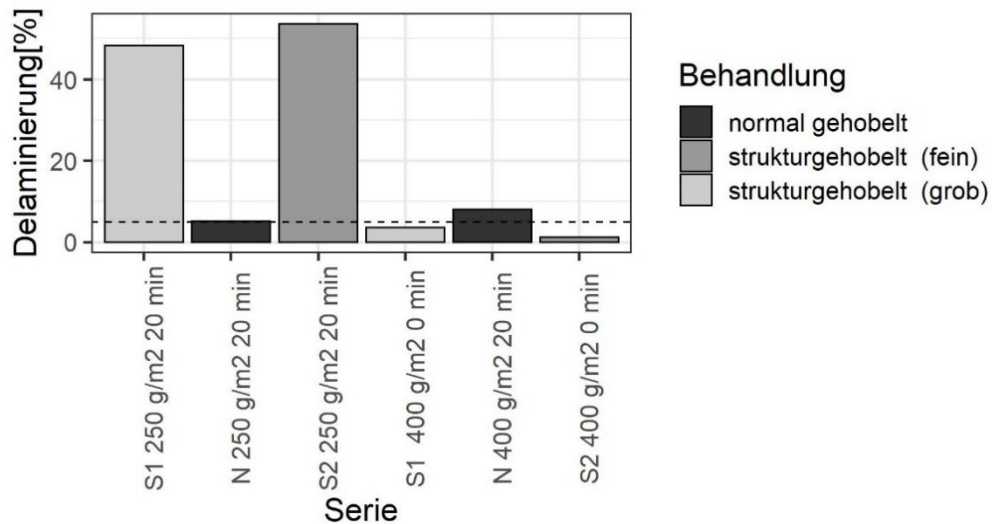


Abbildung 4: Die Balken stellen die arithmetischen Mittelwerte dar; die gestrichelte Linie zeigt den nach der verwendeten Norm (SN EN 302-2) zulässigen Höchstwert der Delaminierung.

Standzeit

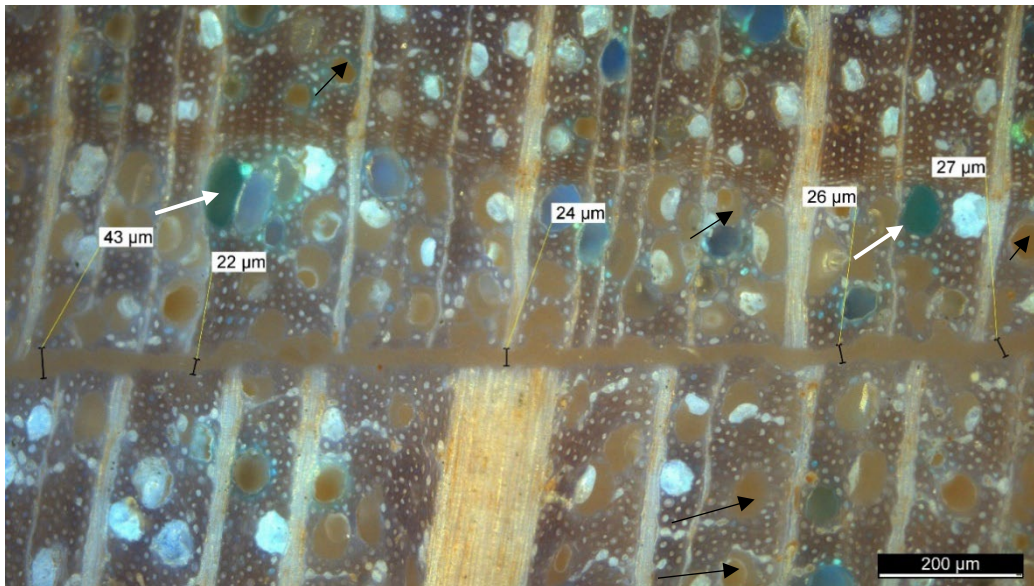


Abbildung 5: SIIMGDx4, vierte Klebefuge des Brettschichtholzes schwarze Pfeile zeigen die Eindringung des Klebstoffs. Weisse Pfeile zeigen das für das Einbetten verwendete Epoxidharz.

Die Häufigkeit, mit der die Messer gewechselt werden müssen, ist für die Industrie sehr entscheidend. Wechsel- und Rüstzeiten können die Gesamtproduktivität der Anlage erheblich beeinträchtigen. Bei diesem Projekt wurden weniger als 300 Laufmeter gehobelt. Die Beobachtung von Verschleissindikatoren bei einem so kurzen Einsatz (geringe Anzahl von gehobelten Proben) stellt eine Herausforderung für eine industrielle Umsetzung (siehe **Abbildung 6**). Die durch die Verkürzung der Verklebungszeit gewonnene Produktivität kann durch die Werkzeugwechselzeiten wieder verloren gehen.

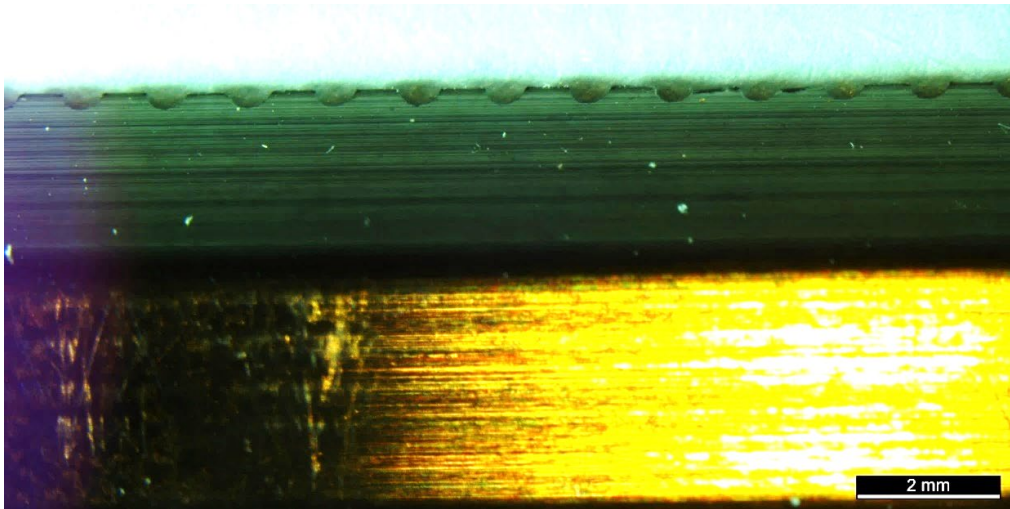


Abbildung 6: grob strukturiertes Messer unter der Lupe betrachtet. Das Vorhandensein von beschädigten Abschnitten in der Messerstruktur ist erkennbar. Die weißen Pfeile zeigen beschädigte Stellen an.

4. Schlussfolgerungen

Ziel der Masterarbeit war es, die Auswirkungen des Strukturhobelns auf Buchenholz (*Fagus Sylvatica* L.) zu bewerten. Auf der Grundlage der Ergebnisse, die bei den verschiedenen Aktivitäten dieses Projekts beobachtet wurden, können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die topografische Analyse hat gezeigt, dass das Strukturhobelns die effektive Adhäsionsfläche nicht wesentlich vergrößert. Die grobe Struktur hat eine Vergrößerung von weniger als 3% gezeigt, während die fein strukturierten gehobelten Oberflächen eine vernachlässigbare Flächenvergrößerung aufwiesen. Der Einfluss der Strukturhobelung auf die Zellen knapp unter der Holzoberfläche scheint wichtiger zu sein.

Fein strukturierte gehobelte Oberflächen haben in Kombination mit einer geringen Klebstoffmenge sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand eine schlechte Verklebungsqualität. Strukturhobelns erhöht den Prozentsatz des Holzversagens nicht effektiv. In dieser Hinsicht gleicht diese Bearbeitungsmethode den berichteten Verfahren (Schleifen, Hobeln mit scharfen Messern, Hobeln mit stumpfen Schneiden). Der Klebstoff und das Holz scheinen einen größeren Einfluss zu haben.

Im trockenen Zustand erfüllten alle Proben die Anforderungen an die Scherzugfestigkeit. Bei Melamin-Formaldehyd-Klebstoff ersetzt das Strukturhobelns die Beobachtung der geschlossenen Wartezeit. Die Mechanismen, die zu diesem Verhalten führen, sind noch unbekannt, da die Mikrostrukturierung auf den Klebeverbindungen, die den Delaminierungstest erfolgreich bestanden haben, nicht mehr sichtbar war. So ist beispielsweise noch unklar, warum die Struktur bei einigen Klebefugen mit tiefen Delaminierungsbeständigkeiten nicht zu beobachten ist, während sie bei leistungsfähigen Verklebungen vollständig in die Klebefuge übergeht. Es sollten weitere mikroskopische Analysen durchgeführt werden, um den Untergrund zu untersuchen. Auch die Auswirkungen des Drucks auf die strukturierten, gehobelten Oberflächen sollten untersucht werden.

Das Delaminierungsverhalten von Polyurethan (für ein System mit kurzer offener Zeit) in Verbindung mit Strukturhobelns wurde in der zweiten Runde der Delaminierungsversuche nicht geprüft. Die beobachteten sehr hohen Delaminierungswerte zeigten, dass das Strukturhobelns beim derzeitigen Kenntnisstand eine chemische Vorbehandlung der Laubholzoberfläche zur Verbesserung der Verklebungsqualität nicht ersetzen kann.

Das für die Herstellung der strukturierten Messer verwendete Material neigt dazu, schneller zu brechen und zu verschleissen als herkömmliche Messer. Dies stellt eine Hürde vor der industriellen Umsetzung dieser Technologie. Hochwertige Messer müssen entwickelt werden, um eine zulässige Standzeit zu gewährleisten.

5. Danksagung

Ich bedanke mich für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsprojekts durch die Innosuisse (Bern, Schweiz). Ich danke den Firmen Henkel & Cie. AG (Sempach-Station, Schweiz) und Fagus Suisse SA für die Bereitstellung der benötigten Klebstoffe und ich möchte meinem Betreuer und Zweitgutachter meine aufrichtige Anerkennung aussprechen: Prof. Dr. Frédéric Pichelin und Dr. Ing Martin Lehmann für ihre Unterstützung und Ratschläge. Mein aufrichtiger Dank geht auch an Prof. Dr. Peter Niemz für seinen Einsatz als externer Gutachter. An Prof. Dr. Thomas Volkmer möchte ich mich für seine konstruktiven Gespräche bedanken.

6. Referenzen

- [1] U.-B. Brändli, M. Abegg, and B. Allgaier Leuch, Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Bern: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2020.
- [2] J. Konnerth, M. Kluge, G. Schweizer, M. Miljković, and W. Gindl-Altmutter, «Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 74, no. 6, pp. 809–819, 2016, doi: 10.1007/s00107-016-1087-1.
- [3] M. Lehmann and T. Volkmer, «Investigation of the bond quality of hardwoods with micro structured surfaces», *Proc. 68th For. Prod. Soc. Int. Conv.*, 2014.
- [4] M. Lindner et al., «Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems», *For. Ecol. Manage.*, vol. 259, no. 4, pp. 698–709, 2010, doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.023.
- [5] O. Kläusler, P. Hass, C. Amen, S. Schlegel, and P. Niemz, «Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 72, no. 3, pp. 343–354, 2014, doi: 10.1007/s00107-014-0786-8.
- [6] D. J. Gardner, M. Blumentritt, L. Wang, and N. Yildirim, «Adhesion theories in wood adhesive bonding: A critical review», *Rev. Adhes. Adhes.*, vol. 2, no. 2, pp. 127–172, 2014, doi: 10.7569/RAA.2014.097304.
- [7] C. Frihart and R. Rowell, «Wood Adhesion and Adhesives», in *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, Second Edition, no. September 2012, 2012, pp. 255–320.
- [8] P. F. Hass, «PENETRATION BEHAVIOR OF ADHESIVES INTO SOLID WOOD AND MICROMECHANICS OF THE BONDLINE», ETH ZURICH, 2012.
- [9] M. Trouy-triboulot and D. Masson, «Matériaux dérivés du bois», *Tech. l'ingénieur*, vol. 33, no. 0, 2017.
- [10] C. R. Frihart and C. G. Hunt, «Adhesives with Wood Materials- Bond Formation and Performance», *Wood Handb. Wood as an Eng. Mater.*, no. General Technical Report FPL-GTR-190, Chapter 10, pp. 10.1-10.24, 2010.
- [11] M. Knorz, E. Neuhaeuser, S. Torno, and J. W. Van De Kuilen, «Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 40–48, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.10.003.
- [12] J. Luedtke, C. Amen, A. van Ofen, and C. Lehringer, «1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: influence of selected processing parameters», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 73, no. 2, pp. 167–178, 2015, doi: 10.1007/s00107-014-0875-8.
- [13] L. MURMANIS, B. RIVER, and H. STEWART, «Surface and subsurface characteristics related to abrasive-planing conditions», *Wood fiber Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 107–117, 1986.
- [14] O. Kläusler, K. Rehm, F. Elstermann, and P. Niemz, «Influence of wood machining on tensile shear strength and wood failure percentage of onecomponent polyurethane bonded wooden joints after wetting», *Int. Wood Prod. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 18–26, 2014, doi: 10.1179/2042645313Y.0000000039.
- [15] M. Kiliç, «Effects of machining methods on the surface roughness values of *Pinus nigra* arnold wood», *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 5596–5606, 2015, doi: 10.15376/biores.10.3.5596-5606.

- [16] A. P. Singh, C. R. Anderson, J. M. Warnes, and J. Matsumura, «The effect of planing on the microscopic structure of *Pinus radiata* wood cells in relation to penetration of PVA glue», *Holz als Roh – und Werkst.*, vol. 60, no. 5, pp. 333–341, 2002, doi: 10.1007/s00107-002-0321-1.
- [17] L. F. de Moura and R. E. Hernández, «Evaluation of varnish coating performance for two surfacing methods on sugar maple wood», *Wood Fiber Sci.*, vol. 37, no. 2, pp. 355–366, 2005.
- [18] J. Cool and R. E. Hernández, «Evaluation of four surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance», *J. Wood Sci.*, vol. 59, no. 3, pp. 185–194, 2013, doi: 10.1007/s10086-012-1318-y.
- [19] H. A. Stewart, «Some Surfacing Defects and Problems Related to Wood Moisture-Content», *Wood Fiber*, vol. 12, no. 3, pp. 175–182, 1980.
- [20] C. Gottlöber, «Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen», *Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen*, pp. 1–9, 2014, doi: 10.3139/9783446440036.fm.
- [21] R. Jokerst and H. Stewart, «Knife- Versus Abrasive-Planed Wood: Quality of Adhesive Bonds», *Wood Fiber Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 107–113, 1976.
- [22] D. Bamokina Moanda, M. Lehmann, and P. Niemz, «Investigation of the Impact of Micro-Structuring on the Bonding Performance of Beechwood (*Fagus Sylvatica* L.)», pp. 1–18, 2022.
- [23] L. F. de Moura, J. Cool, and R. E. Hernandez, «Anatomical Evaluation of Wood Surfaces Produced By Oblique Cutting And Face Milling», vol. 64, no. 2, pp. 1225–1228, 2010.
- [24] C. Bustos A, C. Moya L, J. Lisperguer M, and E. Viveros M, «Effect of knife wear on the gluability of planed surfaces of radiata pine», *Wood Fiber Sci.*, vol. 42, no. 2, pp. 185–191, 2010.
- [25] J. Sandak and M. Negri, «Wood surface roughness – what is it?», *BOKU Univ. Nat. Sources Appl. Life Sci.*, no. January, pp. 1–10, 2005.
- [26] L. Murmanis, B. H. River, and H. Stewart, «Microscopy of abrasive-planed and knife-planed surfaces in wood-adhesive bonds», *Wood Fiber Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 102–115, 1983, [Online]. Available: <http://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1181>.
- [27] M. Schmidt, P. Glos, and G. Wegener, «Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile», *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 68, no. 1, pp. 43–57, 2010, doi: 10.1007/s00107-009-0382-5.
- [28] Kipfer H. U., «Neue Entwicklungen beschichteter Holzoberflächen im Aussenbereich», vol. 42, Weinfelden, 2010, pp. 179–183.
- [29] D. Ohnesorge, K. Richter, and G. Becker, «Influence of wood properties and bonding parameters on bond durability of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) glulams», *Ann. For. Sci.*, vol. 67, no. 6, 2010, doi: 10.1051/forest/2010016.
- [30] J. Follrich, A. Teischinger, W. Gindl, and U. Müller, «Tensile strength of softwood butt end joints. Part 1: Effect of grain angle on adhesive bond strength», *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 83–89, 2007, doi: 10.1080/17480270701841043.
- [31] P. Hass, C. Müller, S. Clauss, and P. Niemz, «Influence of growth ring angle, adhesive system and viscosity on the shear strength of adhesive bonds», *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 3–4, pp. 140–146, 2009, doi: 10.1080/17480270903421529.
- [32] SN EN 302-1:2013, «Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit», SCHWEIZERISCHE NORMEN-VEREINIGUNG NORME, 2013.
- [33] SN EN 205:2016, «Klebstoffe – Holzklebstoffe für nicht tragende Anwendungen – Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebgungen im Zugversuch Adhésifs – Colles pour bois à usages non structuraux – Détermination de la résistance au cisaillement en traction des joints à reco», Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), 2016.
- [34] DIN EN ISO 4287:2010, «Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters», Dtsch. Inst. für Normung, 2010.
- [35] SN EN 302-2:2018, «Adhésifs pour structures portantes en bois – Méthodes d'essais – Partie 2 : Détermination de la résistance à la délamination Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 2 : Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit Adh», Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), 2018.)

- [36] C. Lehringer and J. Gabriel, «Review of Recent Research Activities on One-Component PUR-Adhesives for Engineered Wood Products’, in *Materials and Joints in Timber Structures*, vol. 9, Dordrecht: Springer, 2014, pp. 405–420.
- [37] R. E. Hernández and J. Cool, «Einfluss von Fräsparametern auf die Oberflächenqualität von Papierbirke, die mit Zwei Fräsverfahren Quer zur Faser Bearbeitet Wurde’, *Holz als Roh - und Werkst.*, vol. 66, no. 2, pp. 147–154, 2008, doi: 10.1007/s00107-007-0222-4.
- [38] P. Hass, O. Kläusler, S. Schlegel, and P. Niemz, «Effects of mechanical and chemical surface preparation on adhesively bonded wooden joints’, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 51, pp. 95–102, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.02.014.
- [39] G. Clerc et al., «Improvement of ash (*Fraxinus excelsior* L.) bonding quality with one-component polyurethane adhesive and hydrophilic primer for load-bearing application’, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 85, no. June, pp. 303–307, 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.06.017.
- [40] L. F. De Moura and R. E. Hernández, «Evaluation of varnish coating performance for three surfacing methods on sugar maple wood’, *For. Prod. J.*, vol. 56, no. 11–12, pp. 130–136, 2006.