

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur
Verwendbarkeit als Brettschichtholz***

der Forschungsstelle(n)

Technische Universität München

Nr. 1, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Arcisstraße 21, 80333 München

Nr. 2, Holzforschung München, Winzererstr. 45, 80797 München

Das IGF-Vorhaben 17284 N der Forschungsvereinigung iVTH – Internationaler Verein für
Technische Holzfragen e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

München, 08.10.2014

Ort, Datum

Univ. Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen
und Dip.-Ing. Jörg Schaffrath

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

iVTH - Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V.

Name der AiF-Forschungsvereinigung (FV)

17284 N

Aktenzeichen der AiF-Mitgliedsvereinigung

Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben:

**Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und
Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz**

Forschungsstelle 1

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80333 München

Forschungsstelle 2

Technische Universität München
Holzforschung München
Univ.-Prof. Dr. Klaus Richter
Winzererstraße 45
80797 München

Danksagung

Wir bedanken uns an dieser Stelle beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, der AiF und dem iVTH für die Möglichkeit der Durchführung dieses Projektes, die finanzielle Förderung sowie die organisatorische Unterstützung während der Projektlaufzeit.

Ebenfalls möchten wir uns bei allen Projektpartnern und beteiligten Unternehmen für die gute Zusammenarbeit innerhalb des Projektes bedanken. Ihnen sei auch dafür gedankt, dass sie trotz vollen Terminkalenders immer Zeit für das Projekt gefunden und an den Arbeitsgruppensitzungen teilgenommen haben.

Ganz besonderen Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern beider Forschungsstellen, die das Projekt unterstützt und möglich gemacht haben. Insbesondere danken wir (in alphabetischer Reihenfolge) Herrn Behounek, Herrn Danzer, Herrn Hofmann, Frau Full, Herrn Knorz, Herrn Lachmann, Herrn Pühler, Herrn Schlenker, Frau Dr. Windeisen und Frau Woppmann.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Forschungsthema..... | 5 |
| 2 | Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung..... | 5 |
| 2.1 | Ausgangssituation..... | 5 |
| 2.2 | Stand der Forschung und Technik | 6 |
| 3 | Grundsätzliche Angaben zum Forschungsprojekt | 6 |
| 3.1 | Ausrichtung des Forschungsvorhabens | 6 |
| 3.2 | Forschungsziel | 6 |
| 3.2.1 | Angestrebte Forschungsergebnisse | 6 |
| 3.3 | Lösungsweg..... | 7 |
| 3.4 | Projektleitung und -bearbeitung..... | 8 |
| 4 | Material | 9 |
| 4.1 | Holz..... | 9 |
| 4.2 | Klebstoffe..... | 9 |
| 5 | Arbeitsschritt 1: Labortechnische Untersuchungen | 10 |
| 5.1 | Chemische Charakterisierung | 10 |
| 5.1.1 | Allgemeines | 10 |
| 5.1.2 | Analyse Extraktstoffe (lösliche Holzinhaltstoffe)..... | 10 |
| 5.1.3 | Messung Oberflächen-pH-Wert..... | 19 |
| 5.2 | Kontaktwinkelmessung | 23 |
| 5.2.1 | Allgemeines | 23 |
| 5.2.2 | Messtechnik | 24 |
| 5.2.3 | Probenvorbereitung..... | 25 |
| 5.2.4 | Durchführung der Messung..... | 25 |
| 5.2.5 | Ergebnisse..... | 26 |
| 5.2.6 | Diskussion..... | 29 |
| 5.3 | Rheologie | 30 |
| 5.3.1 | Allgemeines | 30 |
| 5.3.2 | Rheologische Charakterisierung von Klebstoffe | 32 |
| 5.3.3 | Rheologische Messungen an Holzoberflächen..... | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.4 | Diskussion | 46 |
| 6 | Arbeitsschritt 2: Beurteilung der Klebstoffsysteme | 47 |
| 6.1 | Längszugscherversuche gemäß DIN EN 302-1 | 47 |
| 6.1.1 | Allgemeines | 47 |
| 6.1.2 | Probenherstellung | 47 |
| 6.1.3 | Versuchsdurchführung | 48 |
| 6.1.4 | Ergebnisse..... | 49 |
| 6.2 | Mikroskopische Untersuchung | 53 |
| 6.2.1 | Allgemeines | 53 |
| 6.2.2 | Versuchsdurchführung | 53 |
| 6.2.3 | Ergebnisse..... | 53 |
| 6.3 | Diskussion..... | 64 |
| 7 | Arbeitsschritt 3: Parameterstudien | 65 |
| 7.1 | Allgemeines..... | 65 |
| 7.2 | Probenherstellung | 65 |
| 7.3 | Versuchsdurchführung | 67 |
| 7.3.1 | Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A..... | 67 |
| 7.3.2 | Blockscherprüfung nach DIN EN 392 | 68 |
| 7.3.3 | Mikroskopische Untersuchungen | 69 |
| 7.4 | Ergebnisse | 70 |
| 7.4.1 | Beurteilungskriterien nach DIN EN 386..... | 70 |
| 7.4.2 | Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A..... | 70 |
| 7.4.3 | Blockscherprüfung nach DIN EN 392 | 72 |
| 7.4.4 | Mikroskopische Untersuchungen | 74 |
| 7.5 | Diskussion..... | 78 |
| 8 | Arbeitsschritt 4: Leistungstests an Kleinträgern..... | 80 |
| 8.1 | Allgemeines | 80 |
| 8.2 | Herstellung BSH-Träger | 80 |
| 8.3 | Versuchsdurchführung | 81 |
| 8.3.1 | Kurzzeitversuche | 81 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.3.2 | Dauerlastversuche..... | 81 |
| 8.4 | Ergebnisse | 83 |
| 8.4.1 | Rissanalyse | 83 |
| 8.4.2 | Vier-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 408..... | 85 |
| 8.4.3 | Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A..... | 87 |
| 8.4.4 | Blockscherprüfung nach DIN EN 392 | 89 |
| 8.5 | Diskussion..... | 90 |
| 9 | Zusammenfassung | 93 |
| 10 | Ergebnistransfer | 95 |
| | Literaturverzeichnis..... | 97 |
| | Normen, Regelwerke | 100 |
| | Abbildungsverzeichnis | 102 |
| | Tabellenverzeichnis | 107 |

Abschlussbericht

(Berichtszeitraum vom 01.10.2011 bis 31.03.2014)

1 Forschungsthema

„Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz“

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Ausgangssituation

Anhaltende Klimaveränderungen wirken sich auch auf unsere heimischen Wälder aus. In Deutschland leiden viele Wälder, die hauptsächlich aus einheitlich strukturierten Beständen von Nadelbäumen bestehen, unter schädlichen Ereignissen wie z.B. Stürme, Feuer und Insekten. Unter diesem Umstand ist der Waldumbau zu einem wichtigen Thema in der deutschen Forstwirtschaft geworden. Die Waldumbauprogramme zielen darauf ab, die anfälligen Monokulturen durch artenreichen, anpassungsfähigen und klimatoleranten Mischwälder zu ersetzen. Zukünftig muss daher mit einem anderen Rohstoffangebot aus dem Forst gerechnet werden. Dies bedeutet für die Holzverarbeitende Industrie, das mit der notwendigen Produktionsanpassung Chancen genutzt werden können, neue und verbesserte Produkte zu etablieren. Eine vielversprechende Möglichkeit bietet das Verkleben von Holzarten, die aufgrund ihrer Festigkeit und Dauerhaftigkeit gegenüber dem bisherigen „Brotbaum“ Fichte Vorteile bieten. Die jüngste Vergangenheit lässt bereits Interesse von Industrie und Forschung an Laubholzarten, wie z. B. Buche und Esche, erkennen. Die Erfahrungen lehren aber, dass das Verkleben von Holz bei mangelnder Sachkenntnis zu großen Qualitätsmängeln führen kann.

Standardmäßig werden Holzbauteile für tragende Anwendungen, wie z. B. Brettschichtholz oder Brettsperrholz, aus Fichte hergestellt. Das Verkleben im Herstellerwerk erfolgt nach den Technischen Merkblättern der Klebstofflieferanten. Diese enthalten oft nur verallgemeinernde Angaben ohne spezielle Regelungen, präzise Vorgaben für Sonderbauteile, Laubhölzer oder Nadelhölzer mit höheren Rohdichten fehlen. Die Güte der Klebstoffuge weist der Hersteller innerhalb der werkseigenen Produktionskontrolle nach. Je nach Nutzungsklasse ist entweder eine Prüfung der Delaminierung oder eine Scherprüfung vorgeschrieben. Eine Korrelation der unterschiedlichen Testmethoden ist nicht ersichtlich, die Interpretation der Ergebnisse beruht größtenteils auf den Erfahrungen mit Bauteilen aus Fichte.

2.2 Stand der Forschung und Technik

Die technischen Regeln DIN 1052 und DIN EN 14080 beschränken die Herstellung von geklebten tragenden Holzbauteilen generell auf Nadelhölzer. Für die Verwendung von Laubhölzern ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bzw. eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) notwendig.

Für die Herstellung müssen jedoch Klebstoffe verwendet werden, für die eine Eignung für den vorgesehenen Anwendungsbereich nachgewiesen wurde. Als geeignet wird ein Klebstoff angesehen, wenn es sich um ein geregeltes Bauprodukt nach DIN EN 301 und DIN 68141 handelt oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Klebstoff erwirkt wurde. In der Technischen Baubestimmung Bauregelliste A teil 1 unter der laufenden Nr. 3.5.1 werden Amino- und Phenoplaste ausgeführt. Aus diesen Klebstofffamilien haben sich in der BSH-Herstellung PRF- (Phenol-Resorcin-Formaldehydharz) und heute vor allem MUF-Klebstoffe (Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz) etabliert. Die übrigen, erst seit vergleichsweise kurzer Zeit im tragenden Holzbau angewendeten Klebstoffe, wie die PUR-Klebstoffe (Polyurethan) und EPI-Klebstoffe (Emulsion-Polymer-Isocyanate) bedürfen noch einer bauaufsichtlichen Zulassung.

Trotz innovativer Technik existiert bislang noch keine universell anwendbare Adhäsionstheorie. Insbesondere für den komplexen, natürlich gewachsenen Rohstoff Holz besteht noch hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Parameter, die die Klebstofffugenfestigkeit beeinflussen können, sind zahlreich vorhanden und von Holzart, Klebstoff und Klebeprozess abhängig. Ihre Auswirkung auf die Güte einer Verklebung wurde bislang wissenschaftlich nicht abschließend behandelt. Die existierenden Erfahrungswerte basieren häufig auf nur einer Holzart und veralteten Klebstoffsystemen.

3 Grundsätzliche Angaben zum Forschungsprojekt

3.1 Ausrichtung des Forschungsvorhabens

Das Vorhaben ist produktorientiert, der Fokus lag auf der Beschreibung der Verklebbarkeit unterschiedlicher Holzarten für die Verwendung als BSH. Durch die angestrebten wissenschaftlichen Untersuchungen wurden darüber hinaus Grundlagen für ein vertieftes Verständnis der adhäsiven Eigenschaften und der Interaktion Klebstofftyp/Holzart geschaffen.

3.2 Forschungsziel

3.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Für verschiedene Holzart-Klebstoffkombinationen sollte die Verklebbarkeit von Nadel- und Laubhölzern untersucht werden, deren Bedeutung als potentielle Holzrohstoffe künftig zunehmen wird. Dabei wurden die grundlegenden Zusammenhänge, die zu maximalen

Klebstofffugenfestigkeiten führen, in systematischen Untersuchungen ermittelt. Langzeittests führen zu Aussagen über die Dauerhaftigkeit einer Verklebung.

3.2.1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Klebstoffprüfungen in Anlehnung an die DIN EN 301/302 geben Aufschluss über die Möglichkeit der Verklebung verschiedener Holzarten. Die Bedeutung verklebungsrelevanter Einflussgrößen wurde in Abhängigkeit von der Holzart und Klebstoff ermittelt. Die Ursachen für die Güte einer Verklebung wurden anhand der labortechnischen Untersuchungen aufgedeckt. Neue Erkenntnisse zum Abbindeverhalten der Klebstoffe und zur Ausbildung der Adhäsionkräfte waren zu erwarten. Das Langzeitverhalten einer Verklebung zeigte sich in den Dauerstandsversuchen. Eine mögliche Korrelation mit den Kurzzeittests wurde dargestellt.

3.2.1.2 Wirtschaftliche Ergebnisse

Detaillierte Informationen zu den Möglichkeiten der Flächenverklebung von Bauteilen in Abhängigkeit von Holzart und Klebstoff sollten präsentiert werden. Dies könnte zu neuen bzw. verbesserten Produkten führen.

3.3 Lösungsweg

Systematische Untersuchungen wurden an den Holzarten Buche, Douglasie, Esche, Fichte, Lärche und den Klebstoffgruppen MUF, EPI, PUR, PRF durchgeführt. Während die Holzarten Buche und Douglasie im Rahmen des Klimawandels zunehmend Bedeutung erlangen, wird die Lärche aufgrund ihrer hohen Dauerhaftigkeit mit zunehmendem Potential in Außenanwendungen in das Prüfprogramm einbezogen. Eschenholz hat wie die Buche eine hohe Festigkeit und ist von hohem Interesse für den Ingenieurholzbau, da sich mit den höheren Materialkennwerten Bauteile bzw. freie Überspannungen realisieren lassen, die mit Fichte nicht möglich sind. Verklebungen von Fichte mit PRF-Klebstoff, deren langjährige Verwendung zu einem hohen Erfahrungsstand geführt hat, dienen zur Generierung von Referenzwerten.

In aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten (AS) wurden die Faktoren betrachtet, die die Güte einer Klebfuge maßgeblich beeinflussen und ihre Bedeutung für die Ausbildung der Klebfugenfestigkeit festgestellt. Die Grundlage bildeten die labortechnischen Untersuchungen, die das Abbindeverhalten des Klebstoffs, die Benetzbarkeit der Holzoberflächen und für die Verklebung relevante chemische Beschaffenheit der Holzarten darstellten. Mit der gewonnenen Kenntnis über den Einfluss der Verklebungsparameter werden in Anlehnung an die Prüfverfahren der DIN EN 302, DIN EN 391 und DIN EN 392 Delaminierungsprüfungen, Zug- und Druckscherprüfungen durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen Herstellparametern und der Festigkeitsentwicklung der Klebfuge wurden aufgezeigt. Mit erfolgter Auswertung wurden die Verklebungsbedingungen festgestellt, die zu leistungsfähigen Verbindungen führen. In

Dauerstandsversuchen, frei bewittert und im Labor, sollte das Langzeitverhalten jeder Holzart/Klebstoffkombination anhand von Kleinträgern beurteilt werden. Die Laborversuche wurden in einer Klimakammer durchgeführt, die durch zweckmäßig ausgewählte Klimazyklen eine reale Beanspruchung im Zeitraffer abbildeten. Abbildung 1 stellt den Ablauf des angestrebten Forschungsvorhabens schematisch dar.

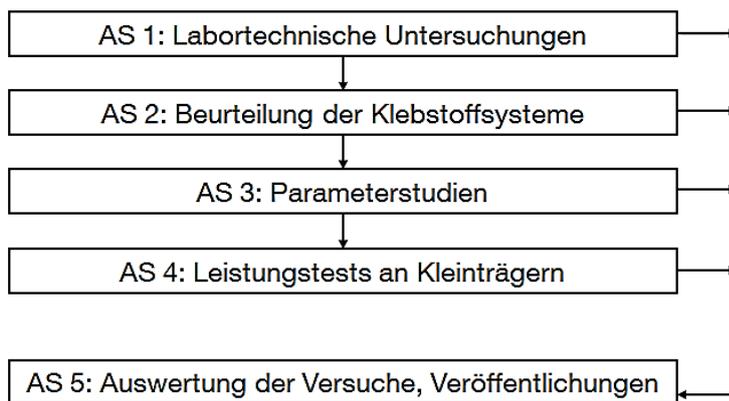


Abbildung 1: Ablaufdiagramm der geplanten Arbeitsschritte (AS)

3.4 Projektleitung und -bearbeitung

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Jörg Schaffrath

Univ. Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen

Projektbearbeitung:

Yuan Jiang M.Sc.

4 Material

4.1 Holz

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden mit den Holzarten Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), Buche (*Fagus silvatica*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) durchgeführt. Schnitthölzer mit Abmessungen von etwa 5000 mm Länge und 40 mm Dicke wurden von den Industriepartnern zur Verfügung gestellt oder von einem regionalen Sägewerkbezogen. Vor der Verwendung wurden die Schnitthölzer über mehrere Monate im Normalklima bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(65 \pm 5)\%$ relativer Luftfeuchte gelagert. Die zu erwartende Holzfeuchtigkeit betrug ca. 12 %. Die Herkunft und die durchschnittlichen Rohdichten der Schnitthölzer werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Herkunft und Rohdichte der Hölzer

| Holzart | Herkunft | Rohdichte in kg/m^3 (12 % Holzfeuchte) |
|-----------|--------------------------------|---|
| Esche | Baden Württemberg, Deutschland | 638 ± 32 |
| Buche | Baden Württemberg, Deutschland | 728 ± 34 |
| Douglasie | Rheinland-Pfalz, Deutschland | 531 ± 46 |
| Lärche | Steiermark, Österreich | 576 ± 42 |
| Fichte | Lenzing, Österreich | 414 ± 58 |

4.2 Klebstoffe

Nach Rücksprache mit den Klebstoffherstellern (Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses) wurden vier handelsübliche Klebstoffe ausgewählt, die die Leistungsanforderungen an den Klebstofftyp I nach DIN EN 301 und DIN EN 15425 erfüllen und für die Herstellung von geklebten tragenden Holzbauteilen zugelassen sind. Die Produktnamen und die zugehörigen Klebstofffamilien werden in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Produktname und Art der Klebstoffe

| Klebstoff | Härter | Klebstofffamilie |
|-------------------|---------------|---|
| Aerodux 185 | HRP 155 | Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Klebstoff (PRF) |
| Prefere 6151 | Prefere 6651 | Emulsion-Polymer-Isocyanat Klebstoff (EPI) |
| Kauramin Leim 690 | Hardener 1690 | Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff (MUF) |
| Jowapur 686.60 | - | 1K-Klebstoff auf Polyurethanbasis (PUR) |

5 Arbeitsschritt 1: Labortechnische Untersuchungen

5.1 Chemische Charakterisierung

5.1.1 Allgemeines

Chemische Eigenschaften von Holz, wie z. B. der Gehalt an löslichen Holzinhaltstoffen (Extraktstoffgehalt) und der pH-Wert, spielen bei der Verklebung eine wichtige Rolle. Eine chemische Charakterisierung der hierbei betrachteten Holzarten sollte einen vertieften Einblick in die Wechselwirkungen von Holz mit den verschiedenen Klebstoffen ermöglichen.

5.1.2 Analyse Extraktstoffe (lösliche Holzinhaltstoffe)

5.1.2.1 Grundlagen

Lösliche Holzinhaltstoffe nehmen bei den meisten mitteleuropäischen Holzarten einen Anteil von 0,5 bis 10 % ein (Fengel und Wegener 1984) und sind stark geprägt durch ihre chemische Vielfalt. Zu den löslichen Holzinhaltstoffen gehören vor allem die niedermolekularen organischen Bestandteile des Holzes. Zu den überwiegend hydrophoben Verbindungen zählen Harzsäuren, Fette und Öle, Wachse sowie Terpene. Daneben existieren noch eine Vielzahl von phenolischen Verbindungen, u.a. Gerbstoffe (Tannine), Zucker und Zuckerderivate, welche einen hydrophilen Charakter besitzen. In Abhängigkeit von ihrer Polarität können diese Holzinhaltstoffe mit organischen Lösungsmitteln oder Wasser aus dem Holz extrahiert werden (Wagenführ 2012).

Obwohl die Extraktstoffe nur einen geringen Anteil der Holzmasse ausmachen, haben sie einen großen Einfluss auf die Verklebbarkeit des Holzes. Es wurde von Chen (1970) bestätigt, dass die Benetzbarkeit des Holzes durch Entfernung der Extraktstoffe deutlich verbessert und durch Applikation von Extraktstoffen wieder verschlechtert wurde. Zeppenfeld und Grunwald (2005) wiesen darauf hin, dass beim Kleben Probleme durch Holzinhaltstoffe stets dann zu erwarten sind, wenn ihr Gehalt (örtlich) über 5 % ansteigt.

Im Allgemeinen wurde der Einfluss der Extraktstoffe auf die Holzverklebung wie folgt zusammengefasst (Popper 1974; Hse u. Kuo 1988):

- Reduzierung der Benetzbarkeit der Holzoberfläche durch Anreicherung von hydrophoben Substanzen (wie. z. B. Harze, Fette und Öle);
- Änderung des Abbindeverhaltens der säure-/basenkatalysierten Klebstoffe beim Vorhandensein von sauren Substanzen (wie. z. B. Carbonsäuren).

5.1.2.2 Probenvorbereitung

Angesichts der Tatsache, dass die Verteilung der Extraktstoffe im Baum über den Stammquerschnitt und die Stammhöhe stark variieren kann, erfolgte die Entnahme der

charakteristischen Holzproben je Holzart an fünf Schnitthölzern. Die Proben nahe den Stirnseiten des Schnittholzes (s. Abbildung 2) wurden in kleine Würfel zersägt. Vor der weiteren Bearbeitung wurden sie je nach Holzart und Entnahmestelle in luftdicht verschlossene Plastikbeutel bei 20 °C aufbewahrt.

Zur Bestimmung des Gehalts an Extraktstoffen wurde feines Holzmehl für das anschließende Extraktionsverfahren verwendet. Dazu wurden die Holzwürfel in einer Schlagkreuzmühle mit einem Bodensieb von 0,5 mm Siebweite unter Trockeneiskühlung gemahlen und anschließend luftgetrocknet.

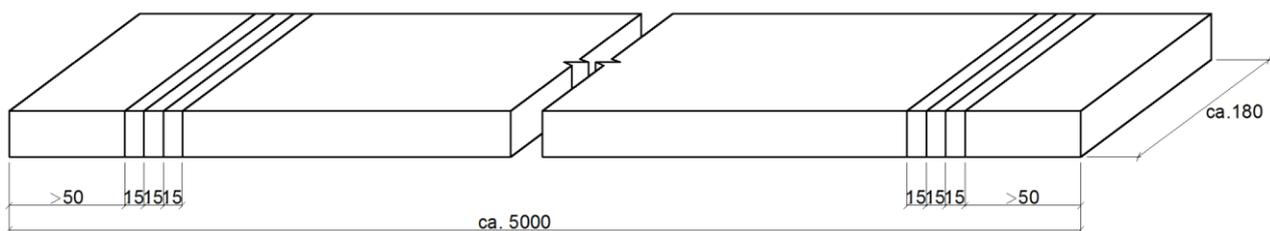


Abbildung 2: Probenentnahme aus dem Schnittholz, Abmessungen in mm

5.1.2.3 Durchführung der Extraktion

Die sog. Kaltwasserextraktion erfolgte mit deionisiertem Wasser als Lösungsmittel bei Raumtemperatur. Dazu wurden etwa 2 g lufttrockenes Holzmehl mit 300 ml Wasser versetzt und 48 h bei Raumtemperatur digeriert. Nach der Extraktion wurde der Extrakt über Glasfritten abfiltriert. Der pH-Wert der Lösung wurde im Filtrat mit einer pH-Elektrode (InLab®Science-Elektrode, Fa. Mettler-Toledo) und einem pH-Meter (Digitalanalyzer Model 601, Fa. Orion) ermittelt. Das Filtrat wurde mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gefriergetrocknet. Anschließend wurde der Extrakt im Vakuumtrockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet und daraus der Extraktgehalt ermittelt.

Die Gewinnung der Extraktstoffe in organischen Lösungsmitteln erfolgte sukzessive im Soxhletextraktor (100 ml) mittels Petrolether, Aceton und Methanol. Ca. 5 g lufttrockenes Holzmehl wurde in die Extraktionshülse eingewogen, mit einem Faltenfilter bedeckt und mit ca. 170 ml des jeweiligen organischen Lösungsmittels 6 h extrahiert. Nach jeder Extraktion wurde das Lösungsmittel am Rotationsverdampfer abdestilliert. Der Rückstand wurde im Vakuumtrockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Das extrahierte Holzmehl wurde im Abzug über Nacht luftgetrocknet und mit dem nächsten Lösungsmittel erneut extrahiert.

Der Extraktstoffgehalt, der sich auf das in den Kolben eingewogene (atro) Holzmehl bezieht, ergibt sich wie folgt:

$$\text{Extraktstoffgehalt} = \frac{m_{\text{Kolben mit Extrakt}} - m_{\text{Leerkolben}}}{m_{\text{Holzmehl}}} \times 100\% \quad \text{in \%} \quad [1]$$

5.1.2.4 Analytische Methoden

Die durch die Extraktionsvorgänge gewonnenen Extraktstoffgemische wurden anhand ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften in Einzelkomponenten getrennt und charakterisiert. Gängige Analysemethoden, wie Spektroskopie und Chromatographie, kamen zum Einsatz.

Für die Trennung und Strukturaufklärung der Extraktstoffe in organischen Lösungsmitteln diente v.a. die GC/MS-Analyse. Unter GC/MS versteht man die Gerätekoppelung eines Gaschromatographens (GC) mit einem Massenspektrometer (MS). Das Stoffgemisch wird dabei im GC durch ein Temperaturgradientenprogramm getrennt und die jeweiligen Substanzen im MS detektiert und als Massenspektren wiedergegeben.

Vor der Analyse wurden die Holzextrakte mit einer Konzentration von 4 mg/ml in Dimethylformamid (DMF) gelöst und silyliert. Hierzu werden 200 µl des in DMF gelösten Extrakts mit 50 µl BSTFA mit 1 % TMSCI (Fluka 15239) versetzt und für 1 h bei 80 °C erhitzt. 1 µl der Probelösung wird mittels automatischen Probengebers in den Injektor (320 °C) eines GC/MS (Agilent Technologies 5975C Series GC/MSD) injiziert und mit folg. Temperaturzeitprogramm (T1 = 100 °C (1 min); R = 10 °C/min; T2 = 320 °C (7min)) gemessen.

Im Chromatogramm wurde für jede getrennte Komponente der Substanzmischung ein Peak erhalten. In Abbildung 3 wird das Chromatogramm des Acetonextraktes vom Lärchenholz beispielhaft dargestellt.

Für jeden Peak wurde ein eigenes Massenspektrum erhalten. Die Massenspektren der Substanzpeaks mit signifikanten Flächen wurden interpretiert und mit vorhandenen Datenbanken (NIST, HFM2) abgeglichen. In Abbildung 4 und Abbildung 5 werden die Massenspektren des ersten und fünften Peaks des Gaschromatogramms gezeigt, welche als Arabinose und Taxifolin identifiziert werden konnten.

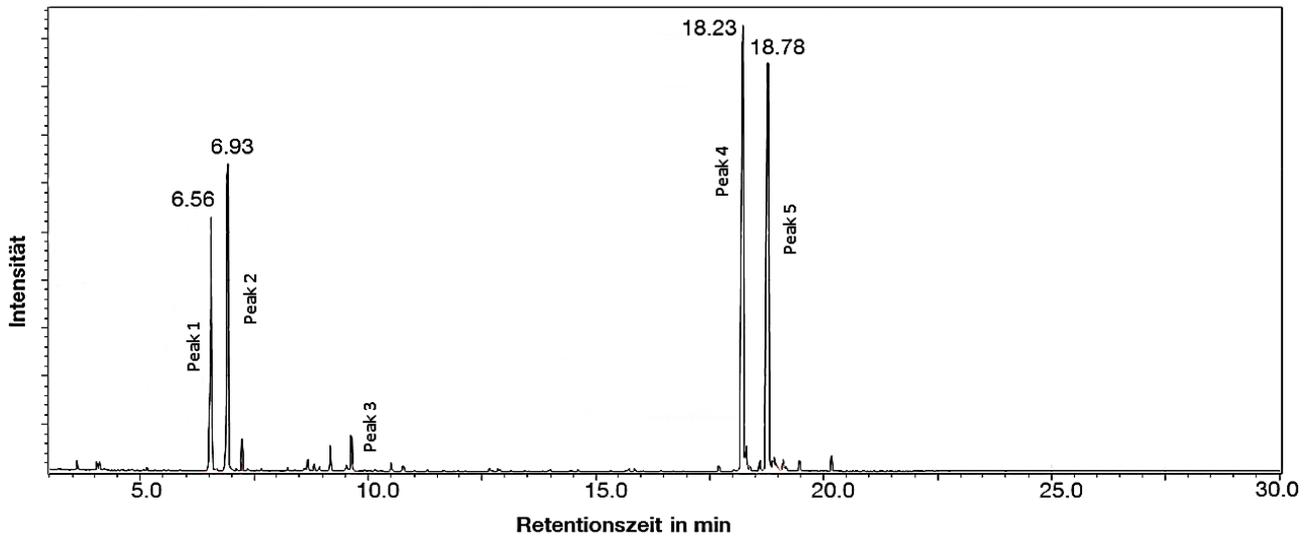


Abbildung 3: Chromatogramm des Acetonextrakts vom Lärchenholz

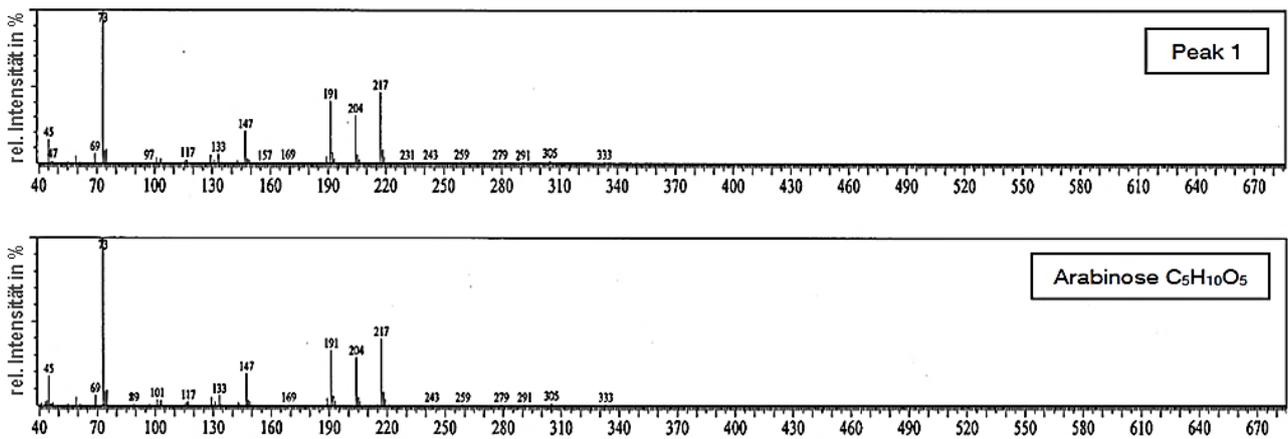


Abbildung 4: Massenspektrum des Peaks 1 (oben) und Vergleichsspektrum von Arabinose (unten)

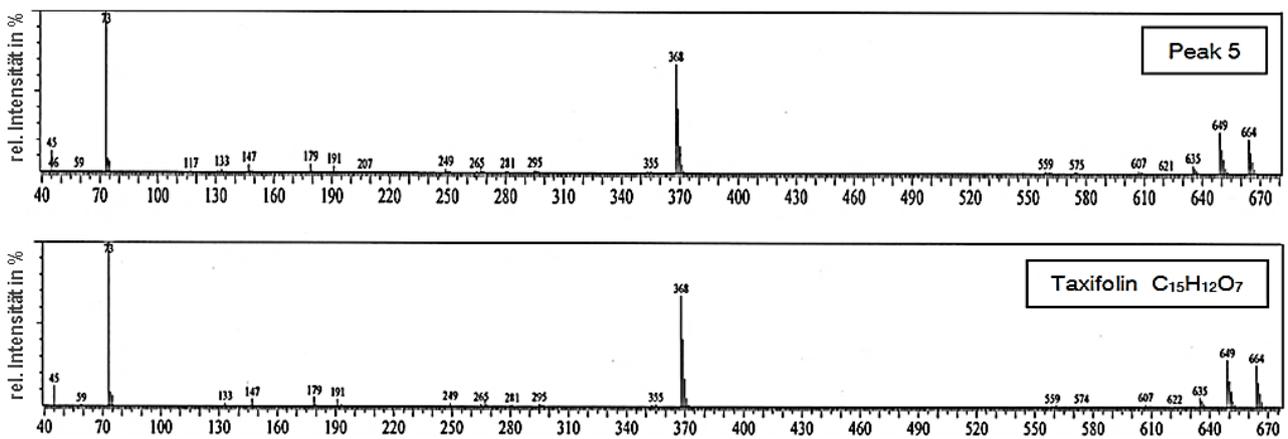


Abbildung 5: Massenspektrum des Peaks 5 (oben) und Vergleichsspektrum von Taxifolin (unten)

Anhand der GC/MS-Analyse wurde eine Identifizierung der Hauptverbindungen in den Extraktstoffgemischen größtenteils ermöglicht.

Bei nicht ganz eindeutigen Massenspektren wurde in einigen Fällen zur Überprüfung die Dünnschichtchromatographie (DC) eingesetzt, wobei mit dem Extraktstoffgemisch auf eine DC-Platte (DC Kieselgel 60 F254, Fa. Merck) ausgewählte Referenzsubstanzen aufgetragen wurden und die Übereinstimmung der Retentionszeiten ermittelt wurde.

Da v.a. die Zucker im Extraktstoffgemisch auch mittels DC-Platten nicht eindeutig identifizierbar waren, wurde eine Zuckeranalyse mittels Ionenaustauschchromatographie durchgeführt. Dazu wurde eine bestimmte Menge des Kaltwasserextraktes in destilliertem Wasser gelöst, zentrifugiert und in einem automatischen Zuckeranalysator (Eppendorf LC 3000, Fa. Eppendorf-Biotronik) analysiert.

In Abbildung 6 sind die Chromatogramme zweier Standardzuckergemische (Standard Nr. 5 u. Standard B) und der Kaltwasserextrakte vom Lärchenholz dargestellt. Die einzelnen Peaks der freien Zucker in den Kaltwasserextrakten wurden anhand der Retentionszeiten und durch Vergleich mit den unter denselben Bedingungen analysierten Standardzuckergemischen identifiziert.

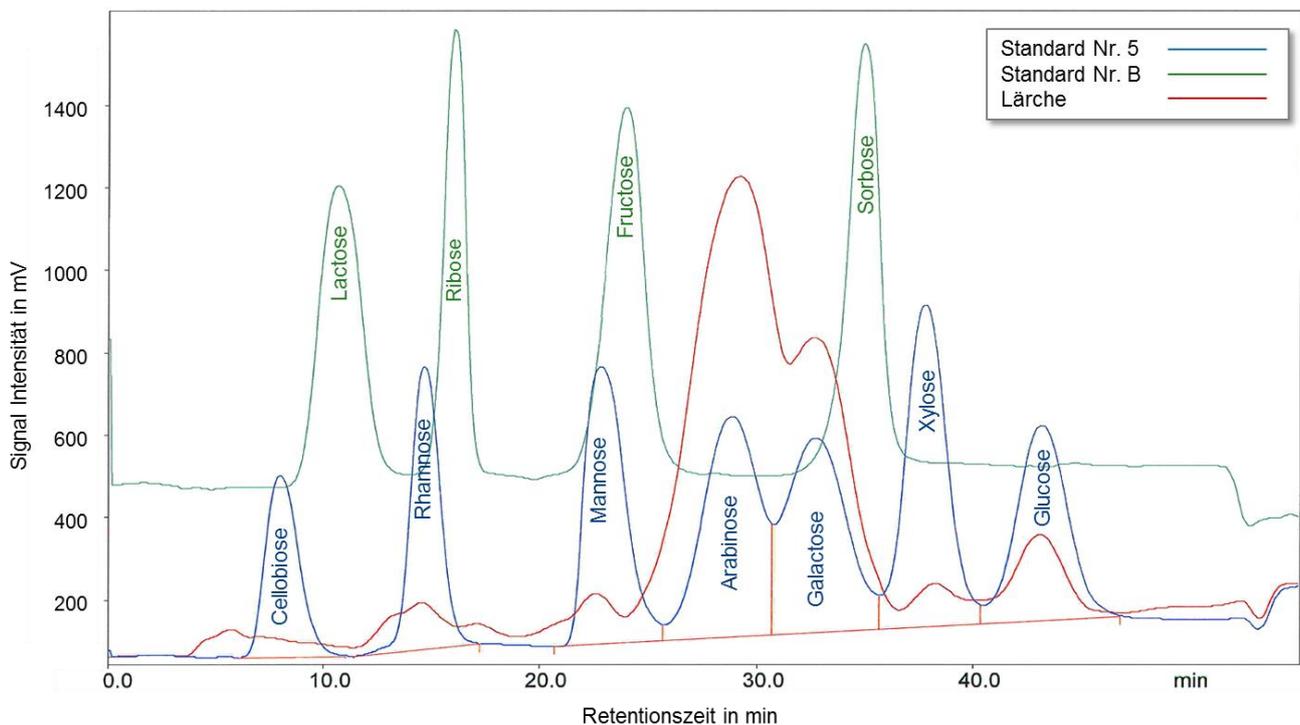


Abbildung 6: Chromatogramme der Standardzuckergemische und des Kaltwasserextrakts vom Lärchenholz

5.1.2.5 Ergebnisse

Die Extraktstoffgehalte und die bei der Kaltwasserextraktion gemessenen pH-Werte der fünf Holzarten werden in Tabelle 3 angegeben. Die Literaturwerte werden als Referenz in Klammern unter den gemessenen Werten aufgelistet (Wagenführ 2007, Fengel und Wegener 1984, Kürschner 1962). Eine grafische Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 7 zu finden.

Die in der Literatur angegebenen Werte schwanken um $\pm 2\%$ und können nur zur ersten Orientierung dienen. Für alle hier betrachteten Holzarten wurden schwach saure pH-Werte von 4,5 bis 5,7 gemessen. Die Werte von Lärche und Douglasie lagen deutlich unter denen der drei anderen Holzarten, was mit den Angaben aus der Literatur gut übereinstimmt.

Tabelle 3: Gehalte der Extraktstoffe in % und pH-Werte der fünf Holzarten

| Holzart | Organische Lösemittel | | | Summe organischer Lösemittel | Kaltwasser | pH-Wert |
|-----------|-----------------------|--------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Petrolether | Aceton | Methanol | | | |
| Esche | 0,17 | 2,49 | 2,75 | 5,41 (4,4...5,4) | 4,87 (1,4...5,2) | 5,49 (etwa 5,8) |
| Buche | 0,05 | 0,69 | 1,04 | 1,78 (0,6...1,9) | 1,84 (etwa 0,64) | 5,69 (5,06...5,13) |
| Lärche | 0,54 | 1,48 | 1,91 | 3,93 (1,4...3,1) | 10,21 (9,1...10,6) | 4,96 (5,2...5,4) |
| Douglasie | 0,32 | 1,64 | 1,47 | 3,43 (1,6...4,4) | 2,87 (2,2...3,5) | 4,53 (3,3...5,8) |
| Fichte | 0,27 | 0,57 | 0,65 | 1,49 (0,6...2,3) | 1,07 (1,1...1,4) | 5,66 (4,0...5,3) |

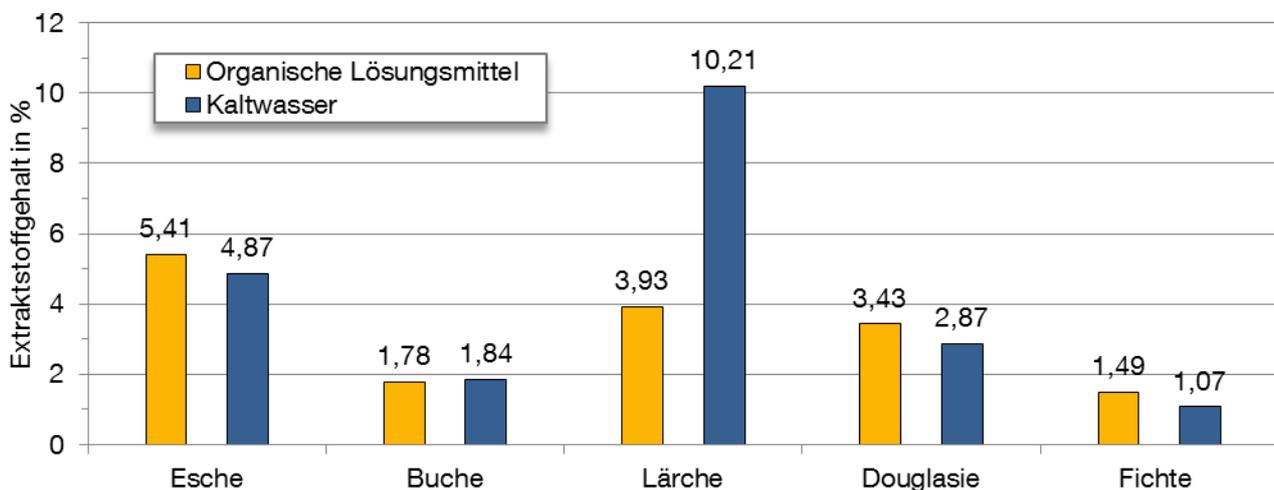


Abbildung 7: Gehalte an Extraktstoffen der fünf Holzarten in %

Anhand der chromatographischen Trennverfahren wurden die in den fünf Holzarten hauptsächlich enthaltenen Extraktstoffe identifiziert und den entsprechenden Stoffgruppen zugeordnet. Die detektierten Hauptsubstanzen der Holzextrakte sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Die hydrophilen Extraktstoffe setzten sich in Nadelhölzern hauptsächlich aus den freien Zuckern sowie phenolischen Substanzen zusammen. Übereinstimmend mit den Literaturangaben wurde für Lärche bei der Extraktion mit Kaltwasser ein hoher Extraktstoffgehalt von über 10 % ermittelt. Mittels GC/MS und Zuckeranalyse wurden eine Reihe von freien Zuckern in den Kaltwasserextrakten identifiziert (s. auch Abbildung 6), v.a. Arabinose und Galactose, welche typischerweise in Lärche als Arabinogalactan vorliegen. Für Douglasie und Fichte wurden wesentlich niedrigere Gehalte an wasserlöslichen Extraktstoffen ermittelt, wobei Arabinose den größten Anteil der freien Zucker ausmachte.

Zusätzlich wurde das Vorkommen vieler phenolischer Extraktstoffe in Nadelhölzern bestätigt. Die Flavonoide Dihydrokaempferol und Taxifolin waren sowohl in Douglasien- als auch in Lärchenholzextrakten nachzuweisen. Im Fichtenholz konnten die Lignane Hydroxymatairesinol und Isolariciresinol identifiziert werden.

Die hydrophoben Verbindungen in Nadelhölzern setzten sich aus zahlreichen Fett-/Harzsäuren sowie Steroiden zusammen. Aus dem Lärchenholz wurden Extraktstoffe mit einem Anteil von knapp 4 % mit den organischen Lösungsmitteln gewonnen. Für Douglasie wurde ein ähnlicher Wert ermittelt. Die GC/MS-Analyse der Extraktstoffgemische führte zur Identifizierung gleicher Fett-/Harzsäuren in den beiden Nadelhölzern: Linolsäure, Ölsäure, Dehydroabietinsäure sowie Isopimarsäure. Die Extraktstoffe in organischen Lösungsmitteln machten nur ca. 1,5 % der Trockenmasse vom Fichtenholz aus. Obwohl die drei Fettsäuren Linolsäure, Ölsäure und Isopimarsäure ebenfalls im Fichtenholz zu finden waren, wurde der höchste Anteil von der Harzsäure Dehydroabietinsäure bestimmt.

Der Extraktstoffgehalt vom Eschenholz lag sowohl bei der Kaltwasserextraktion als auch bei der Extraktion mit organischen Lösungsmitteln bei ca. 5 %. Im Vergleich dazu wurden Inhaltsstoffe aus dem Buchenholz nur in sehr geringer Menge (< 2 %) extrahiert.

In den Kaltwasserextrakten wurden für die beiden Laubholzarten zwei Monosaccharide, Glucose und Fructose, als freie Zucker detektiert. Zusätzlich dazu wurde Saccharose (Disaccharid aus Glucose und Fructose) im Eschenholz nachgewiesen. Weitere hydrophile Inhaltsstoffe, wie das der Stoffgruppe der Phenole zuzuordnende Tyrosol (4-(2-Hydroxyethyl)phenol) und Coniferylalkohol, waren im Eschenholz vorhanden. Im Buchenholz waren derartige Substanzen kaum zu finden.

Darüber hinaus wurde die hydrophobe Substanz Sitosterol für alle hierbei betrachteten Nadel- und Laubholzarten identifiziert.

Tabelle 4: Wichtige Inhaltsstoffe der fünf Laub- und Nadelholzarten

| Holzart | Substanz | Zucker | Phenolische Verbindungen | Fett-/ Harzsäuren | Steroide |
|-----------|---------------------|--------|--------------------------|-------------------|----------|
| Esche | Glucose | x | | - | |
| | Fructose | x | | | |
| | Saccharose | x | | | |
| | Tyrosol | | x | | |
| | Coniferylalkoholol | | x | | |
| | Sitosterol | | | | x |
| Buche | Glucose | x | - | - | |
| | Fructose | x | | | |
| | Sitosterol | | | | x |
| Lärche | Arabinose | x | | | |
| | Galactose | x | | | |
| | Taxifolin | | x | | |
| | Dihydrokaempferol | | x | | |
| | Linolsäure | | | x | |
| | Ölsäure | | | x | |
| | Dehydroabietinsäure | | | x | |
| | Isopimarsäure | | | x | |
| | Sitosterol | | | | x |
| Douglasie | Arabinose | x | | | |
| | Taxifolin | | x | | |
| | Dihydrokaempferol | | x | | |
| | Linolsäure | | | x | |
| | Ölsäure | | | x | |
| | Dehydroabietinsäure | | | x | |
| | Isopimarsäure | | | x | |
| | Sitosterol | | | | x |
| Fichte | Arabinose | x | | | |
| | Hydroxymatairesinol | | x | | |
| | Isolariciresinol | | x | | |
| | Dehydroabietinsäure | | | x | |
| | Sitosterol | | | | x |

5.1.2.6 Diskussion

Je nach Art und Menge der Extraktstoffe sowie dem verwendeten Klebstoff kann der Mechanismus der Verklebung durch Holzinhaltstoffe stark variieren (Popper 1974).

Wie bereits erwähnt wirken die in den organischen Lösungsmitteln löslichen Substanzen teilweise hydrophobisierend. Es wurde in der Literatur mehrfach bestätigt, dass die Anreicherung derartiger Holzinhaltstoffe zur Herabsetzung der Benetzbarkeit (Chen 1970, Nguyen u. Johns 1979, Hillis 1986) und Sorptionskapazität (Waangard u. Granados 1967) des Holzes führen kann. Dies hätte zur Folge, dass die Viskosität und das Fließ- und Eindringverhalten des Klebstoffs verändert würden (Narayanamurti 1957, Wellons u.a. 1977, Hse u. Kuo 1988). Für die hierbei betrachteten fünf Nadel- und Laubholzarten wurde ein relativ hoher Anteil an hydrophoben Extraktstoffen bei Esche, Lärche und Douglasie festgestellt. Der Einfluss der hydrophoben Verbindungen wurde im Abschnitt 5.2 anhand der Kontaktwinkelmessung und im Abschnitt 5.3 anhand rheologischer Messungen näher betrachtet.

Der Einfluss der niedermolekularen hydrophilen Holzinhaltstoffe auf die Verklebung ist nicht immer bekannt. Popper (1974) behauptet, dass die freien Zucker keinen negativen Einfluss auf die Verklebbarkeit des Holzes ausüben. Diese Aussage beschränkt sich jedoch nur auf die Verklebung mit Polykondensationsharzen auf Formaldehydbasis. Künniger u.a. (2006) berichten über den lärchenholzspezifischen Extraktstoff Arabinogalactan (AG) und seinen Einfluss auf die mit dem 1K-PUR-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen. Es wurde darauf hingewiesen, dass bei einem hohen Anteil an AG (20 % oder mehr) die Klebeverbindungen vom 1K-PUR-Klebstoff stark beeinträchtigt werden können, insbesondere wenn hohe Feuchtebelastungen auftreten. Aber bei einem Anteil unter 10 % schien der Einfluss moderat zu sein. Eine mögliche Erklärung dazu war, dass das AG eine Sperrschicht an den Holzoberflächen bilden kann, die das Eindringen des Klebstoffs in das Holzgewebe und die Bildung mechanischer Verankerungen behindert. Zusätzlich kann das AG eine chemische Reaktion mit den freien Isocyanatgruppen des Polyurethans eingehen und durch das Aufnehmen des freien Wassers den Härtingsprozess des Klebstoffs hemmen. Das AG gehört zu den Holzpolyosen (Sammelbegriff: Hemicellulosen), welche mit Ausnahme des Arabinogalactan, i.d.R. sehr schwer oder gar nicht in Wasser löslich sind. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde in den Lärchenextrakten ein hoher Gehalt an den AG Grundbausteinen Arabinose und Galactose festgestellt, weshalb angenommen wird, dass auch das AG in großen Mengen vorhanden war. Die sauer wirkenden phenolischen Verbindungen können einen Einfluss auf den pH-Wert ausüben (Popper 1974). In diesem Fall ist vor allem das pH-abhängige Abbinden der Polykondensationsklebstoffe auf Formaldehydbasis, wie z. B. die PRF- und MUF-Klebstoffe, betroffen. Die Arbeiten von Plomley u.a. (1976) zeigten, dass die kondensierten Tannine mit Formaldehyd chemisch reagieren konnten. Es trug dazu bei, dass die Gelierzeit des Phenol-Formaldehyd-Klebstoffs (PF) verkürzt und die Festigkeit der Verklebung erhöht wurden. Hingegen wurde bei einer hohen Konzentration von hydrolisierbaren Tanninen

eine wasserlösliche Schicht zwischen dem Holz und Klebstoff gebildet, wodurch die Festigkeit der Klebeverbindung herabgesetzt wurde.

Anhand der anschließenden Untersuchungen wurden die oben aufgeführten Aspekte näher betrachtet.

5.1.3 Messung Oberflächen-pH-Wert

5.1.3.1 Grundlagen

Die chemische Zusammensetzung einer durch Bearbeitung hergestellten Holzoberfläche unterscheidet sich infolge der Anreicherung von polaren und unpolaren Substanzen deutlich von der des Vollholzes (Zavarin 1984). Dunky und Niemz (2002) wiesen darauf hin, dass wasserlösliche und dampfflüchtige Holzinhaltstoffe, wie z.B. die hydrophoben Harz- und Fettsäuren, während der Trocknung und Lagerung an die Oberfläche des Holzes diffundieren und eine sogenannte „chemical weak boundary layer“ (chemisch geschwächte Grenzflächen) bilden können. Diese Schicht kann vor allem die vollständige Benetzung der Holzoberfläche verhindern.

Es wird daher häufig empfohlen, die verunreinigten Oberflächenschichten vor der Verklebung durch leichtes Hobeln oder Schleifen zu entfernen. Die DIN EN 386 für die Herstellung von Brettschichtholz schreibt unter dem Punkt 6.4.1.5 vor, dass die Zeitspanne zwischen der Herstellung der frischen Oberflächen und der Verklebung 24 h nicht überschreiten darf. Bei harzreichen Holzarten sollte sich die Zeitspanne noch einmal auf 6 h reduziert werden.

Mit Hilfe der Oberflächen-pH-Wert-Messungen wurde die Beschaffenheit der Holzoberflächen untersucht. Der Einfluss der Lagerung frisch hergestellter Holzoberflächen wurde quantifiziert.

5.1.3.2 Probenvorbereitung

Insgesamt wurden je Holzart zehn Holzwürfel ausgesucht, welche jeweils aus der linken und rechten Seiten der fünf Schnitthölzer entnommen wurden. Mit Hilfe eines Mikrotoms wurden von jedem Holzwürfel drei dünne Furniere mit einer Dicke von 1 mm präpariert (s. Abbildung 9).

Ein Furnier wurde direkt nach dem Abtrennen vom Holzwürfel im „frischen“ Zustand gemessen. Die anderen zwei Furniere wurden vor den Messungen 24 h oder 7 Tage im Normalklima gelagert. Die oberste Schicht des Holzwürfels wurde aufgrund der Alterung der Oberfläche entfernt.

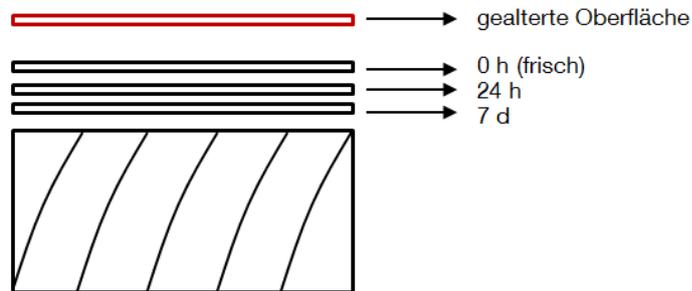


Abbildung 8: Abtrennung der Furniere von einem Holzklötzchen

5.1.3.3 Durchführung der Messungen

Die Bestimmung des Oberflächen-pH-Wertes erfolgte in Anlehnung an die im Merkblatt V/17/80 des Vereins Zellcheming beschriebene Methode. Unter Raumtemperatur wurde das Holzfurnier in einen dafür vorgesehenen Behälter aus Teflon platziert (s. Abbildung 9, links). Um den Einfluss der Umgebungsluft möglichst auszuschließen wurde die komplette Vorrichtung mit Schraubzwingen zusammengehalten.

150 µl reines Wasser wurde mit einer Hamilton Mikroliterspritze auf das jeweilige Holzfurnier aufgetragen. Eine pH-Flachmembranelektrode (InLab® Surface-Elektrode, Fa. Mettler-Toledo) gelangte über eine mittig positionierte Öffnung im Deckel des Teflonbehälters an die Oberfläche des Furniers (s. Abbildung 9, rechts). Der Innendurchmesser der Öffnung wurde genau an den Außendurchmesser der pH-Elektrode angepasst. Der Oberflächen-pH-Wert wurde am pH-Meter (Digitalanalyzer Model 601, Fa. Orion) nach dem Erreichen eines konstanten Wertes abgelesen. Je nach Holzart dauerte dies 2 bis 8 min.

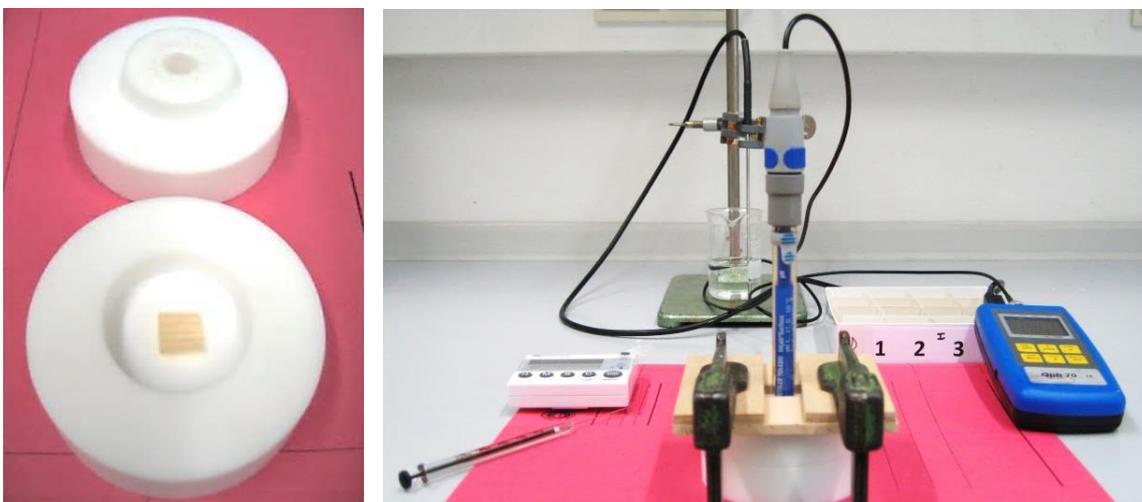


Abbildung 9: Teflonbehälter im geöffneten Zustand (links) und die gesamte Messapparatur (rechts)

5.1.3.4 Ergebnisse

Die an den Holzoberflächen gemessenen pH-Werte werden in Abbildung 10 grafisch dargestellt. Eine Zusammenstellung sämtlicher Messergebnisse ist Anlage 1 zu entnehmen. In Tabelle 5 werden die nach einer 48-stündigen Extraktion mit Kaltwasser im Filtrat gemessenen pH-Werte (s. Abschnitt 5.1.2.3) den an den frischen Holzoberflächen ermittelten Oberflächen-pH-Werten gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Messungen ergaben, dass die Oberflächen-pH-Werte der fünf untersuchten Holzarten erheblich von 3,4 für Douglasie bis 5,2 für Esche variierten. Im Vergleich zu den im Filtrat der Kaltwasserextraktion gemessenen pH-Werten wurden viel niedrigere Werte an den Holzoberflächen ermittelt.

Zusätzlich wurde für alle fünf Holzarten ein leichter Anstieg der pH-Werte durch Alterung der Holzoberflächen beobachtet.

Tabelle 5: Gegenüberstellung von den bei der Kaltwasserextraktion und an den frischen Holzoberflächen gemessenen pH-Werten

| Holzart | Kaltwasserextraktion | Holzoberfläche | Differenz |
|-----------|----------------------|----------------|-----------|
| Esche | 5,7 | 5,2 | 0,5 |
| Buche | 5,8 | 4,9 | 0,9 |
| Lärche | 5,0 | 4,0 | 1,0 |
| Douglasie | 4,5 | 3,4 | 1,1 |
| Fichte | 5,7 | 4,6 | 1,1 |

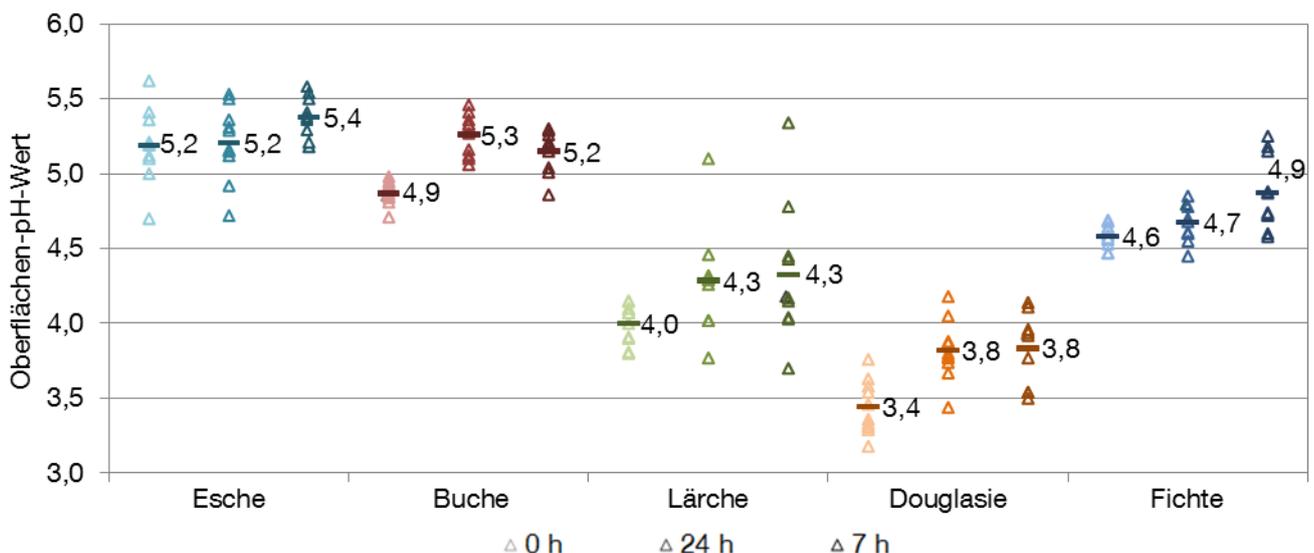


Abbildung 10: Oberflächen-pH-Werte der frischen und gealterten Holzoberflächen

5.1.3.5 Diskussion

Der pH-Wert des Holzes ist im Wesentlichen von der chemischen Zusammensetzung und Konzentration der Extraktstoffe abhängig (Koch u. Reinsch 2010).

Vergleichsweise niedrige Werte wurden für die Nadelholzarten Douglasie und Lärche gemessen, die hohe Konzentrationen an wasserlöslichen phenolischen Verbindungen besitzen. Einen relativ hohen Oberflächen-pH-Wert (5,2) wies die extraktstoffreiche Esche auf. Eine mögliche Erklärung ist ihre hohe Konzentration an pH-neutralen freien Zuckern und der geringe Gehalt an wasserlöslichen sauer wirkenden Extraktstoffen.

Die extraktstoffarmen Hölzer Buche (Oberflächen-pH-Wert 4,9) und Fichte (Oberflächen-pH-Wert 4,6) reagierten ebenfalls schwach sauer.

Der leichte Anstieg der Oberflächen-pH-Werte nach einer 24-stündigen und 7-tägigen Lagerung kann auf Oxidationsreaktionen an der Holzoberfläche oder während der Verdunstung des Kapillarwassers an die Oberfläche diffundierte Holzinhaltstoffe zurückgeführt werden. Ihr Einfluß auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen und das Abbindeverhalten der Klebstoffe wurden weiterhin anhand der Kontaktwinkelmessung im Abschnitt 5.2 und rheologischen Messungen im Abschnitt 5.3 untersucht.

In Abhängigkeit von den verwendeten Messmethoden wurden erhebliche Unterschiede zwischen den gemessenen pH-Werten festgestellt. Die Ursache dafür ist die Zugänglichkeit zu den Extraktstoffen, welche durch die verwendeten Messmethoden bestimmt wurden. Bei der Kaltwasserextraktion lagen die Proben als feines Holzmehl vor. Die 48-stündige Extraktion führte dazu, dass die im Holz vorhandenen Extraktstoffe gut gelöst werden konnten. Die an den Holzoberflächen gemessenen pH-Werte resultierten aus den leicht löslichen Extraktstoffen an der Oberfläche die innerhalb der wenigen Minuten im Wasser gelöst werden konnten.

5.2 Kontaktwinkelmessung

5.2.1 Allgemeines

Die Reichweite der für die Adhäsion maßgeblichen Kräfte beschränkt sich auf einen Nano- bis Mikrometerbereich. Um die Ausbildung adhäsiver Bindungskräfte zu ermöglichen, sollen die an einer Klebung beteiligten Komponenten Klebstoff und Füge­teil möglichst nah aneinander gebracht werden (Habenicht 2009). Dies erfordert eine ausreichende Benetzbarkeit der Füge­teiloberflächen.

Die Benetzbarkeit einer Füge­teiloberfläche lässt sich am Beispiel eines Klebstofftropfens darstellen (s. Abbildung 11). Man bringt einen flüssigen Klebstofftropfen auf die Füge­teiloberfläche. Zwischen der im Berührungspunkt (A) der drei Phasen fest, flüssig und gasförmig an die Flüssigkeitsoberfläche angelegten Tangente und der Festkörperoberfläche bildet sich ein Winkel, welcher als Kontaktwinkel bezeichnet wird.

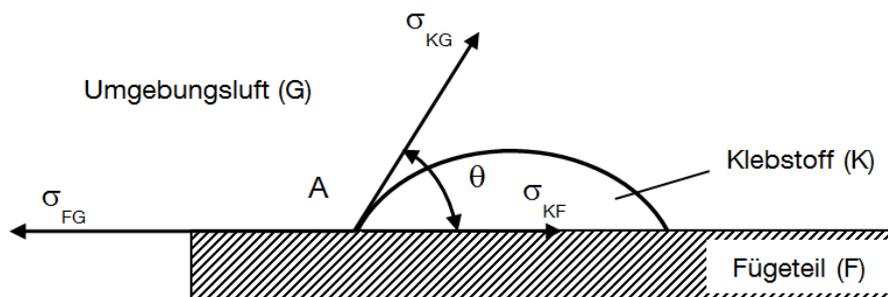


Abbildung 11: Benetzung der Füge­teiloberfläche von einem Klebstofftropfen

Die Größe des Kontaktwinkels wird durch die Oberflächen­spannung des Füge­teils (σ_{FG}), die Oberflächen­spannung des flüssigen Klebstoffes (σ_{KG}) und die Grenzflächen­spannung zwischen Füge­teiloberfläche und flüssigem Klebstoff (σ_{KF}) bestimmt. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Faktoren wird in der *Youngschen Gleichung* (s. Gl. [2]) beschrieben.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{FG} - \sigma_{KF}}{\sigma_{KG}} \quad [2]$$

Der Kontaktwinkel kann je nach vorliegendem Energiezustand verschiedene Größen annehmen und wird als Maß zur Beurteilung der Benetzbarkeit von Oberflächen herangezogen (Scheikel und Dunky 1996). Ist die Oberflächen­spannung des Füge­teils (σ_{FG}) größer als die

Grenzflächenspannung (σ_{KF}), ergibt sich ein Kontaktwinkel kleiner 90° . Dort findet eine gute Benetzung statt. Je kleiner der Kontaktwinkel, umso besser ist die Fügeiteiloberfläche durch die Flüssigkeit benetzt.

Anhand dieser Methode sollte der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen betrachtet werden. Hauptaugenmerk wurde auf das Oberflächenalter und die Bearbeitungsmethode der Holzoberfläche gelegt.

5.2.2 Messtechnik

Die Bestimmung der Kontaktwinkel auf der Holzoberfläche erfolgte nach der sogenannten dynamischen Methode, welche im Vergleich zu der konventionellen statischen Methode Vorteile bietet.

Bei der statischen Methode wird ein Flüssigkeitstropfen mit Hilfe einer Spritze auf die Oberfläche aufgesetzt. Die Messung erfolgt, nachdem die Spritzennadel den Flüssigkeitstropfen verlassen hat. Allerdings ist diese Methode für das saugfähige Material Holz nicht besonders geeignet. Die dabei ermittelten Kontaktwinkel sind stark zeitabhängig und können innerhalb weniger Sekunden von der Oberfläche verschwinden.

Hingegen verbleibt die Spritzennadel bei der dynamischen Messmethode während der gesamten Messung im Tropfen. Das Volumen des auf die Oberfläche aufgetragenen Tropfens wird durch ständige Flüssigkeitszufuhr kontinuierlich vergrößert (Habenicht 2009). Durch die Volumenvergrößerung des Tropfens wird laufend „frische“ Oberfläche benetzt (Scheikel und Dunky 1996). Mehrere reproduzierbare Ergebnisse lassen sich während der fortschreitenden Bewegung des Tropfens über die feste Oberfläche messen (s. Abbildung 12).

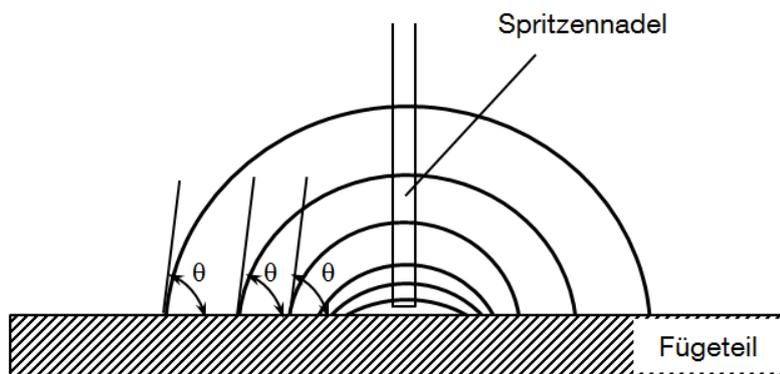


Abbildung 12: Schematische Darstellung der dynamischen Kontaktwinkelmessung

5.2.3 Probenvorbereitung

Jeweils fünf Prüfkörper mit den Abmessungen 40mm × 5mm x 100 mm (B x D x L) wurden für sechs Versuchsreihen angefertigt. Die wichtigen Oberflächenmerkmale der einzelnen Versuchsreihen sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Die ersten Messungen erfolgten an den frisch gehobelten Radialschnittflächen (H0). Bei den Messungen zur Bestimmung des Einflusses des Oberflächenalters wurden die gehobelten Radialschnittflächen vor den Messungen 24 h (H24) oder 7 Tage (H7) lang im Normalklima gelagert. Das Schleifen wurde als eine weitere konventionelle Oberflächenbearbeitungsmethode in den Messungen berücksichtigt (S0). Unmittelbar vor der Messung wurden die Radialschnittflächen mit dem Schleifpapier der Körnung P100 manuell geschliffen und mit Druckluft entstaubt. Die Messungen an den Tangentialschnittflächen wurden getrennt in den Früh- und Spätholzzonen (TF, TS) der gehobelten Holzoberflächen durchgeführt.

Tabelle 6: Versuchsreihen der Kontaktwinkelmessung (R-Radialschnittfläche, T-Tangentialschnittfläche)

| Bez. Versuchsreihe | Schnitttrichtung | Messzone | Methode Oberflächenherstellung | Alter Oberfläche |
|--------------------|------------------|----------|--------------------------------|------------------|
| H0 | R | - | Hobeln | 0 h |
| S0 | R | - | Schleifen | 0 h |
| H24 | R | - | Hobeln | 24 h |
| H7 | R | - | Hobeln | 7 d |
| TF | T | Frühholz | Hobeln | 0 h |
| TS | T | Spätholz | Hobeln | 0 h |

5.2.4 Durchführung der Messung

Die Kontaktwinkelmessung wurde anhand der dynamischen Messmethode mit jeweils fünf Prüfkörpern gleicher Oberflächenbeschaffenheit vorgenommen. Als Testflüssigkeit wurde hochreines, destilliertes Wasser verwendet. Mit Hilfe einer automatischen Dosiereinheit des Kontaktwinkelmessgeräts (EasyDrop, Fa. Krüss) (s. Abbildung 13) wurde der Wassertropfen softwaregesteuert auf die Holzoberfläche aufgebracht und mit konstantem Volumenstrom langsam vergrößert. Die gesamten Dosierungs- und Ausbreitungsvorgänge des Wassertropfens auf der Holzoberfläche wurden von einer CCD-Videokamera dokumentiert. In definierten Zeitabständen von 0,5 Sekunden wurden für jeden Wassertropfen 20 aufeinanderfolgende Bilder aufgenommen. Die Blickrichtung der Kamera war senkrecht zur Faserrichtung.

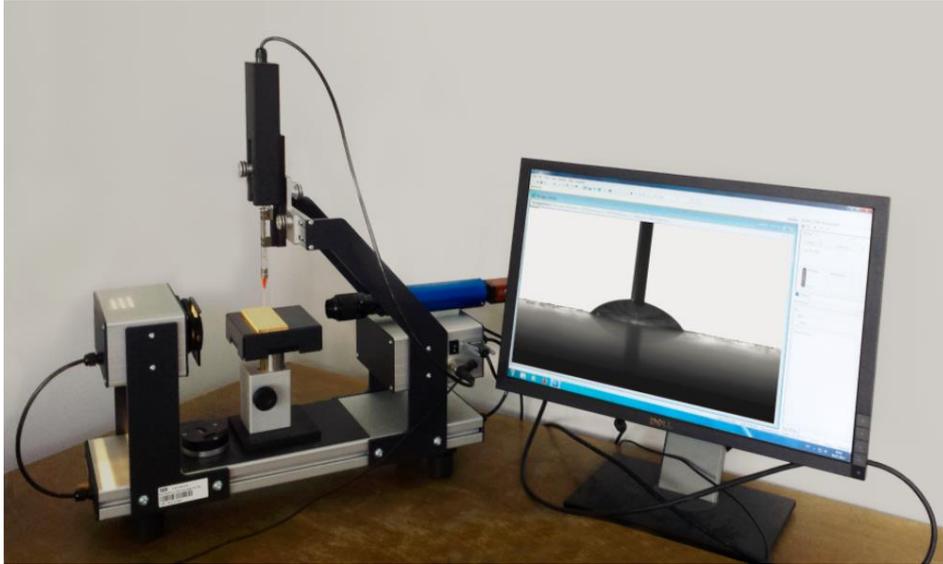


Abbildung 13: Kontaktwinkelmessgerät EasyDrop der Firma Krüss

5.2.5 Ergebnisse

Die Auswertung der Bilder erfolgte mit der PC-basierten Bildbearbeitungssoftware DSA4. Die Kontaktwinkel wurden jeweils an den linken und rechten Berührungspunkten des liegenden Tropfens gemessen. Bei 20 Bildern standen für jeden Wassertropfen 20 Paare von Messergebnissen zur Auswertung zur Verfügung.

In den ersten drei bis fünf Bildern ließen sich stets größere Winkel mit starker Differenz zwischen den linken und rechten Kontaktwinkeln eines Tropfens messen. Dies lag daran, dass die Spritznadel in der Anfangsphase einen relativ starken Einfluss auf die Form des Tropfens hatte. Die Messergebnisse waren nur dann als gültig anzusehen, wenn eine gleichmäßige Ausbreitung des Wassertropfens erreicht wurde. Der mittlere Kontaktwinkel auf einer Holzoberfläche ergab sich aus zehn Paaren von aufeinanderfolgenden gültigen Messungen. Für die Holzoberflächen gleicher Oberflächenbeschaffenheit wurde der Mittelwert aus den mittleren Kontaktwinkeln auf fünf Holzoberflächen gebildet. Sämtliche Einzelergebnisse der Kontaktwinkelmessung sind Anlage 2 bis Anlage 7 zu entnehmen.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Kontaktwinkel von Wassertropfen auf den frisch gehobelten Radialschnittflächen. Generell wiesen die Kontaktwinkel von Wassertropfen mit Werten kleiner als 90 Grad auf eine ausreichende Benetzung der fünf Holzarten hin. Bei den Holzarten Esche, Lärche und Fichte wurden Kontaktwinkel von etwa 40° ermittelt. Größere Kontaktwinkel von bis zu ca. 60 Grad wurden für Buche und Douglasie gemessen.

Tabelle 7: Kontaktwinkel von Wasser auf frisch gehobelten Radialschnittflächen

| Holzart | Kontaktwinkel in Grad |
|-----------|-----------------------|
| Esche | 37,8 ± 6,2 |
| Buche | 52,4 ± 2,6 |
| Lärche | 42,1 ± 5,6 |
| Douglasie | 55,9 ± 1,4 |
| Fichte | 41,1 ± 2,7 |

In Abbildung 14 ist der Einfluss des Oberflächenalters auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen dargestellt. An den „gealteten“ Holzoberflächen wurden tendenziell größere Kontaktwinkel gemessen und damit eine reduzierte Benetzbarkeit bestimmt. Die Messungen nach 24-stündiger Lagerung der Eschenholzoberflächen zeigten, dass der mittlere Kontaktwinkel um 24 % erhöhte. Bei Buche und Lärche war eine leichte Steigerung von bis zu 10°% zu erkennen. Besonders erwähnenswert für Fichte ist, dass sich die Herabsetzung der Benetzbarkeit erst nach einer 7-tägigen Lagerung der Holzoberflächen feststellen ließ.

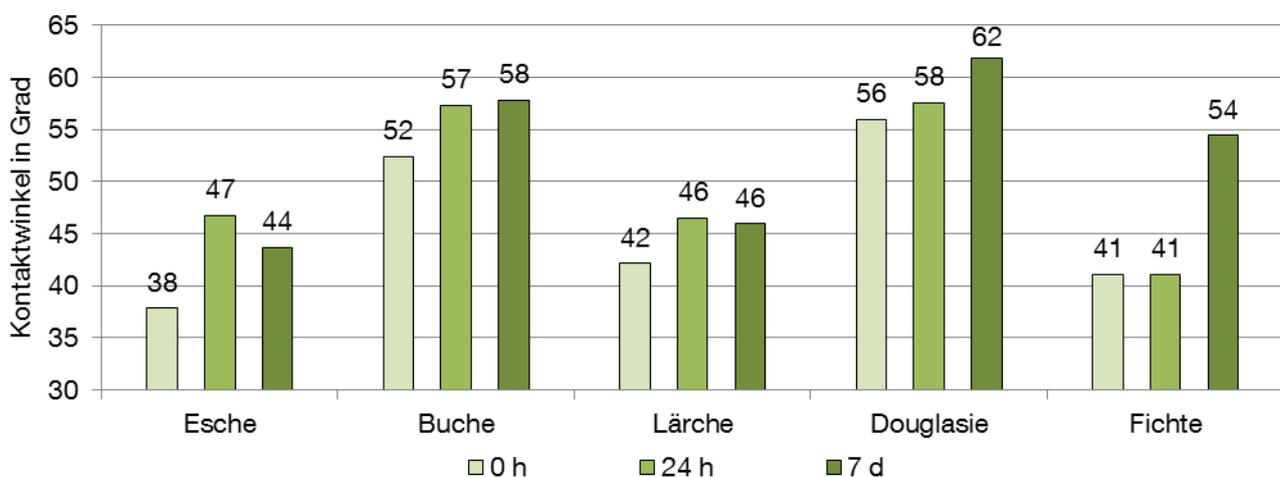


Abbildung 14: Einfluss des Oberflächenalters auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen

In Abbildung 15 ist der Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenherstellungsmethoden auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen dargestellt. Das Schleifen führte dazu, dass die Oberflächenspannung der Holzoberflächen deutlich erhöht wurde. Im Vergleich zu den gehobelten Holzoberflächen ließen sich die geschliffenen Flächen deutlich leichter benetzen und sehr flache Winkel von 10 bis 20 Grad wurden gemessen. Der Unterschied zwischen den an den geschliffenen und gehobelten Holzoberflächen gebildeten Winkeln betrug bei Lärche, Douglasie und Fichte rund 60 % und bei den beiden Laubholzarten bis zu 80 %.

In Abbildung 15 rechts sind Beispiele für „an frisch gehobelten und geschliffenen Holzoberflächen gebildeten Kontaktwinkel gegenübergestellt. Erwähnenswert ist hierzu, dass sich der Wassertropfen an den geschliffenen Holzoberflächen während der Dosierung sehr schnell ausbreitete und innerhalb weniger Sekunden vom Holz vollständig aufgenommen wurde. Die gebildeten Kontaktwinkel waren so klein, dass sie sich zum Teil schwer von der Bildauswertungssoftware erfassen ließen.

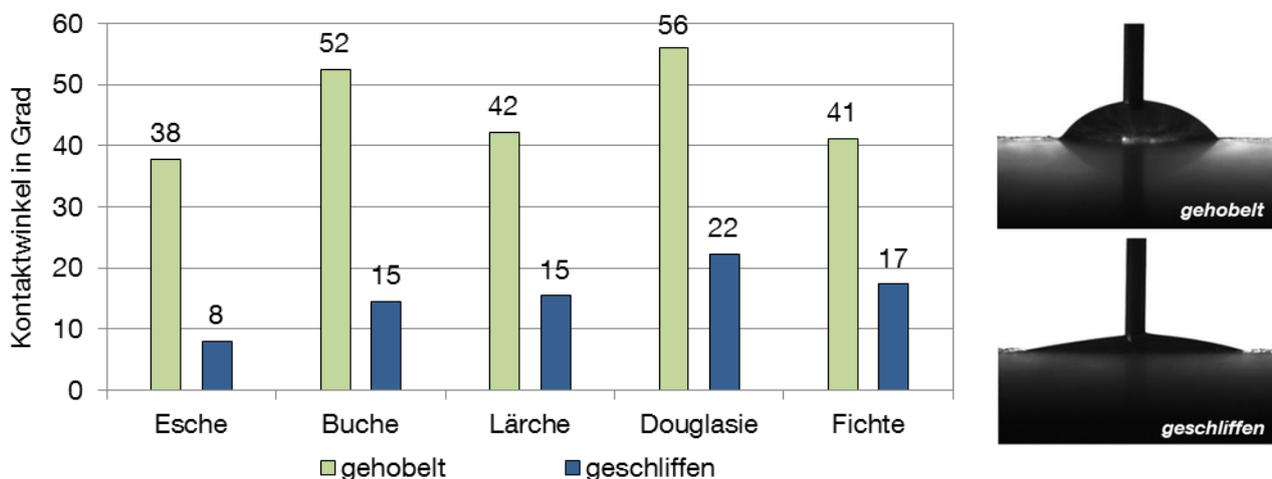


Abbildung 15: Einfluss der Methode der Oberflächenherstellung auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen

Die an Radialschnittflächen und Früh-/Spätholzzonen der Tangentialschnittflächen gemessenen Kontaktwinkel werden in Abbildung 16 gegenübergestellt.

Auf den Tangentialflächen ergaben sich größere Winkel in den Spätholzzonen. Die einzige Ausnahme bildete die Esche. Dabei lag die besondere Oberflächenstruktur von Eschenholz zu Grunde. Die Frühholzzone vom Eschenholz unterscheidet sich mit ihren mehrreihigen Porenriden sehr deutlich von den Spätholzzonen mit glatten Oberflächen. Dies hatte während der Dosierung zur Folge, dass die Ausbreitung des Wassertropfens auf den Frühholzoberflächen von den Porenriden verhindert wurde. Bei Fichte war der Einfluss des Früh- und Spätholzes fast kaum zu erfassen.

Ein Vergleich zwischen den an den Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen gemessenen Kontaktwinkeln zeigte, dass die Tangentialschnittflächen von Lärche und Douglasie ein wenig leichter zu benetzen sind. Hingegen wurden für Esche kleinere Winkel an Radialschnittflächen gemessen. Bei Buche und Fichte war ein ähnliches Benetzungsverhalten für die Radialschnittflächen und Spätholzzonen der Tangentialschnittflächen festzustellen.

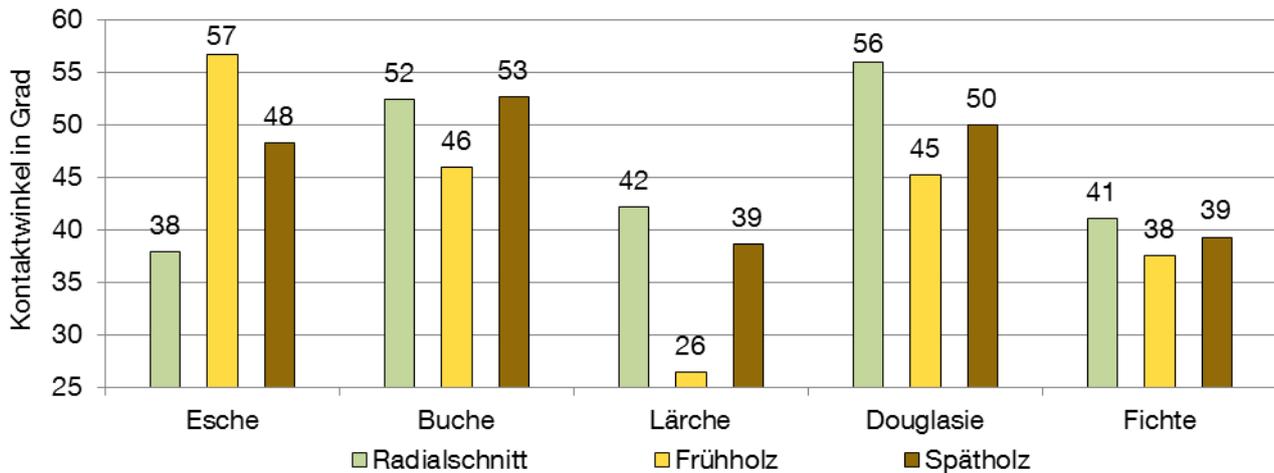


Abbildung 16: Einfluss der Schnittrichtung auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen

5.2.6 Diskussion

Die Benetzbarkeit der Holzoberfläche ist im Wesentlichen von ihrer chemischen Zusammensetzung, der Konzentration der hydrophoben Holzinhaltstoffen und der Anatomie abhängig.

Der Einfluss der Anreicherung von hydrophoben Holzinhaltstoffen auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen wurde im Abschnitt 5.1.2.6 bereits erwähnt und anhand der Messungen an Oberflächen unterschiedlicher Alter bestätigt. Die hydrophobe Wirkung derartiger Extraktstoffe ist bei den inhaltstoffarmen Holzarten Buche und Fichte besonders augenfällig. Größere Winkel wurden für Buche mit einem relativ hohen Anteil an organischen Extraktstoffen gemessen.

Neben den hydrophoben Inhaltstoffen stellt das Lignin eine andere wichtige Quelle der hydrophoben Verbindungen dar. Die Tangential- und Radialschnittflächen des Holzes verfügen über einen hohen Anteil an freigelegten Mittellamellen (ML) (Dunky und Niemz 2002), welche Ligninkonzentrationen von 70 bis 88 % aufweisen (Wagenführ 2012).

Für die meisten hierbei betrachteten Holzarten wurden flachere Winkel in den Frühholz zonen der Tangentialschnittflächen ermittelt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Ligninkonzentration der ML des Frühholzes niedriger als die des Spätholzes ist (Wagenführ 2012).

5.3 Rheologie

5.3.1 Allgemeines

In der DIN EN 923, Abschnitt 2.6.8 wird das Abbinden von Klebstoffen definiert als „Vorgang, bei dem ein Klebstoff seine Kohäsionsfestigkeit gewinnt und die Klebung ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften entwickelt“.

Dieser Vorgang ist in den meisten Fällen zeitabhängig und einhergehend mit einem Viskositätsanstieg. Habenicht (2006) beschrieb das zeitabhängige Abbinden eines Reaktionsklebstoffs folgendermaßen: „Die chemischen Reaktionen beginnt unmittelbar nach dem Mischen der Ausgangskomponenten des Klebstoffs. Während der fortschreitenden Reaktion steigt die Viskosität der Klebstoffmischung in Folge der Kettenverlängerung und/oder Molekülvernetzung an. Die Endfestigkeit des Klebstoffs wird nach dem endgültigen Reaktionsablauf bei höherem Vernetzungsgrad erreicht.“

Das Fließ- und Abbindeverhalten von Klebstoffen kann anhand rheologischer Messungen mit Hilfe der Oszillationsrheometrie charakterisiert werden. In der Praxis zeigen die realen Substanzen gleichzeitig viskoses und elastisches Verhalten und werden als viskoelastisch bezeichnet. Der Vorteil der Oszillationsmessmethode gegenüber den konventionellen Rotationsmessungen liegt darin, dass die elastischen und viskosen Materialeigenschaften vom Klebstoff getrennt betrachtet werden können.

Die beim Oszillationsversuch für die Beschreibung des rheologischen Verhaltens einer Messprobe charakteristischen Begriffe lassen sich grundlegend mit Hilfe des Zwei-Platten-Modells (s. Abbildung 17) erklären (Mezger 2010, DIN 54458).

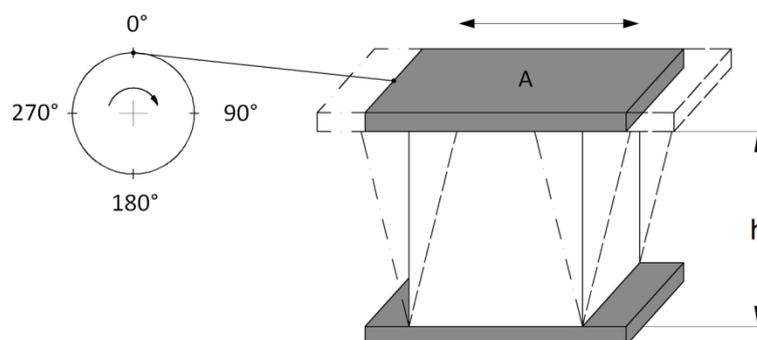


Abbildung 17: Zwei-Platten-Modell für Oszillationsversuche (Mezger 2010)

Zwischen zwei Platten mit einer Fläche A und einem Spaltabstand h befindet sich die Messprobe, die an beiden Platten Wandhaftung hat. Die obere Platte wird durch ein sich drehendes

Antriebsrad in eine schwingende Bewegung versetzt. Die untere Platte bleibt dabei unbewegt. Während der Hin- und Herbewegung der oberen Platte wird die Messprobe geschert. Die sinusförmige Veränderung der Deformation der Messprobe wird mathematisch folgendermaßen vorgegeben (s. GL. [3] u. Abbildung 18):

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin \omega t \quad [3]$$

Dabei ist

- $\gamma(t)$ die Deformation zum Zeitpunkt t ;
- γ_A die maximale Deformation (Deformationsamplitude);
- ω die Kreisfrequenz, in rad/s, mit $\omega = 2 \pi f$;
- f die Frequenz, in Hz.

Als Antwort der im Scherspalt befindlichen Probe ergibt sich die zur Deformation phasenverschobene Sinusfunktion der Schubspannung wie folgt:

$$\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad [4]$$

Dabei ist

- $\tau(t)$ die Schubspannung zum Zeitpunkt t ;
- τ_A die maximale Schubspannung (Schubspannungsamplitude)
- ω die Kreisfrequenz, in rad/s, mit $\omega = 2 \pi f$;
- f die Frequenz, in Hz;
- δ die Phasenverschiebung (Verlustwinkel) (s. Abbildung 18).

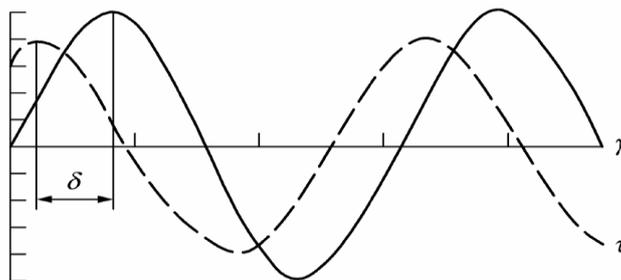


Abbildung 18: Vorgegebene Funktion der Deformation $\gamma(t)$ und resultierende Schubspannungsfunktion $\tau(t)$ (Mezger 2010)

Die Materialeigenschaften der viskoelastischen Flüssigkeit werden anhand folgender Kenngrößen beschrieben:

Der Speichermodul G' gilt als Maß für die während des Scherprozesses im Probenmaterial gespeicherten Energie, die nach der Entlastung vollständig für die Rückdeformation zur Verfügung steht. G' beschreibt das elastische Verhalten der Messprobe. Der Verlustmodul G'' gilt als Maß für die während des Scherprozess im Probenmaterial verbrauchten Energie, die bei der Veränderung der Probenstruktur aufgebraucht und/oder an die Umgebung dissipiert wird. Die beiden Kenngrößen werden wie folgt errechnet:

$$G' = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \cos \delta \quad \text{in Pa} \quad [5]$$

$$G'' = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \sin \delta \quad \text{in Pa} \quad [6]$$

Am Übergangspunkt zwischen Flüssig- und Gel-Zustand des Probenmaterials, auch „Gel-Punkt“ genannt, gilt:

$$G' = G''$$

Der komplexe Schubmodul G^* besteht aus den elastischen und viskosen Anteilen der Messprobe und berechnet sich aus Speichermodul G' und Verlustmodul G'' nach folgender Formel:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad \text{in Pa} \quad [7]$$

Der Komplexe Viskosität η^* ergibt sich wie folgt:

$$\eta^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t)} \quad \text{in Pa}\cdot\text{s} \quad [8]$$

5.3.2 Rheologische Charakterisierung von Klebstoffe

5.3.2.1 Messtechnik

Die in diesem Arbeitsschritt durchgeführten Oszillationsmessungen erfolgte mit einem computer gesteuerten Standardrheometer (Physica MCR301, Fa. Anton Paar).

Es wurde ein Platte-Platte-Messsystem verwendet, welches aus einer oberen beweglichen und einer unteren feststehenden Metallplatte besteht. Der sich im Spalt zwischen den Platten befindende Klebstoff wurde in eine sinusförmige Schwingung mit vorgegebener Deformationsamplitude und Frequenz versetzt. Auf die Messprobe wirkte kein Pressdruck (Normalkraft = 0). Das für die Verformung der Probe aufgebrauchte Drehmoment wurde von einem empfindlichen Kraftaufnehmer gemessen. Aus den Werten von Deformation, Schubspannung und Verlustwinkel wurden alle wichtigen rheologischen Größen von der Datenerfassungssoftware (RheoPlus, Fa. Anton Paar) zugleich ermittelt.

5.3.2.2 Klebstoffvorbereitung

Bei der rheologischen Charakterisierung von Klebstoffen wurde die Wirkung des Holzes auf das Abbindeverhalten zunächst ausgeschlossen. Dadurch wurden Referenzwerte für die anschließenden Messungen an Holzoberflächen generiert.

Voruntersuchungen zeigten, dass das Platte-Platte-Messsystem für das Klebstoffsystem PUR nicht gut geeignet war. Während der Aushärtereaktion ist bei diesem Klebstoff mit starkem Aufschäumen durch die Bildung von CO₂ zu rechnen. Der Messstempel des Rheometers wurde während der Messung nach oben gedrückt (Normalkraft > 0). Wiederholbare Messbedingungen ließen sich nur schwer realisieren.

Hingegen ließ sich der MUF-Klebstoff sehr gut anhand der Oszillationsmessungen charakterisieren. Darüber hinaus darf sein Mischungsverhältnis in einem großen Bereich variiert werden. Durch das Variieren des Anteils vom Härter wurden genauere Materialkenntnisse über den verwendeten Klebstoff gewonnen. Zu erwähnen ist ebenfalls, dass der Klebstoff im Vergleich zu den PUR- und EPI-Klebstoffen eine flexible Handhabbarkeit aufwies. Der nach den Messungen an den Metallplatten des Messsystems haftende MUF-Klebstoff konnte durch Wasserspülung leicht entfernt werden. Daher wurde der MUF-Klebstoff als Standardmessprobe verwendet.

Laut dem technischen Merkblatt des Klebstoffs sind Mischungsverhältnisse im Bereich von 100:20 bis 100:100 (Gew.-%) zulässig. Folgende Mischungsverhältnisse wurden im Rahmen der rheologischen Charakterisierung des Klebstoffs betrachtet: 100:20, 100:50, 100:80 und 100:100 (Gew.-%).

Um eine mögliche Verfälschung der Messergebnisse durch Lufteinschlüsse zu vermeiden, wurde das Klebstoffgemisch unmittelbar vor der Messung im Exsikkator für 1 min entlüftet.

5.3.2.3 Durchführung rheologischer Messungen

Die rheologischen Messungen erfolgten im Normalklima bei 20 °C und 65 % rF. Eine ausreichende Menge an Klebstoff wurde in das Messsystem eingebracht. Nach dem Auftragen des Klebstoffs wurde der Spaltabstand H (s. Abbildung 22) des Platte-Platte-Messsystems

elektronisch gesteuert auf 0,3 mm eingestellt. Der überschüssige, aus den Seiten ausgetretene Klebstoff wurde entlang des Randes mit einem Spachtel sorgfältig abgestreift („Trimmen“). Das Messsystem wurde mit einer Haube über dem Versuchsaufbau vor äußeren Einwirkungen geschützt. In der Haube wurde der Versuchsaufbau auf 20 °C gekühlt.

Die Deformationsamplitude von 0,1 % und Kreisfrequenz von 10 rad/s wurden für die Oszillationsmessungen vordefiniert. Die gesamte Messdauer pro Versuch betrug 5 h. Es wurden drei Messwerte pro Minute erhoben.

5.3.2.4 Ergebnisse

In Abbildung 19 ist die Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff bei verschiedenen Mischungsverhältnissen dargestellt. Die Grafik veranschaulicht, dass die Viskosität des Klebstoffs über den erfassten Zeitraum hin anstieg. Unter dem Anstieg dieser Werte ist die zunehmende Steifigkeit in Form eines höheren Widerstands gegen Deformation zu verstehen.

Vergleicht man die Steigerungsraten bei verschiedenen Mischungsverhältnissen, so lässt sich eine schnellere Härtung des Klebstoffs durch Erhöhung des Anteils an Härter erkennen. Mit dem Mischungsverhältnis von 100:20 (Gew.-%) wurde eine Viskosität von 17.400 Pa·s nach 300 min Härtungszeit gemessen. Die gleichen Werte wurden beim Mischungsverhältnis 100:50 nach 200 min, bei 100:80 nach 187 min und bei 100:100 nach 180 min erreicht.

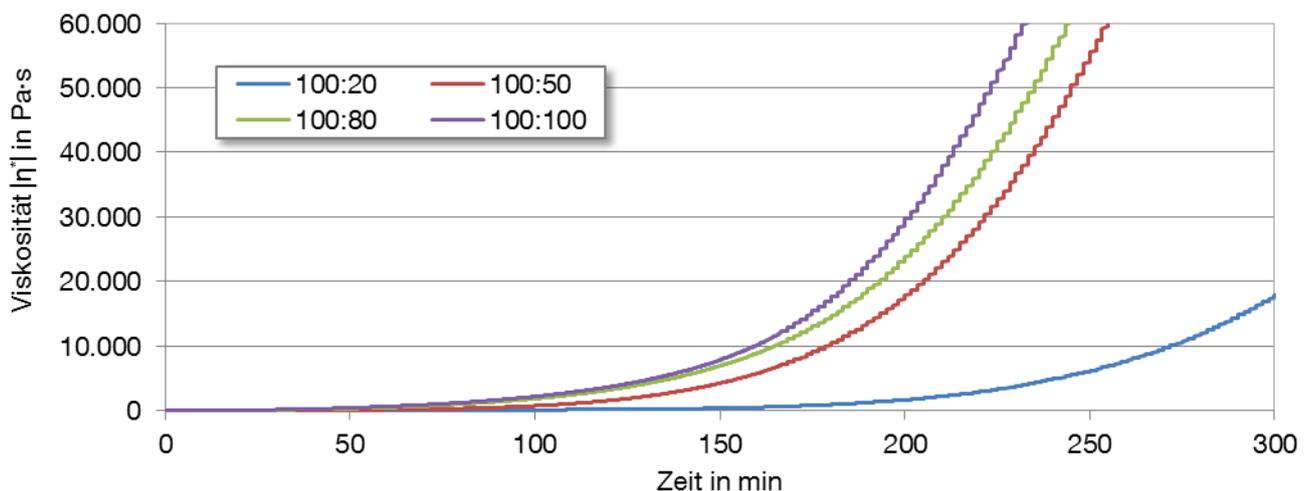


Abbildung 19: Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff bei verschiedenen Mischungsverhältnissen

Die Entwicklung des Speichermoduls (G') und Verlustmoduls (G'') vom MUF-Klebstoff wird in Abbildung 20 in Abhängigkeit von den Mischungsverhältnissen graphisch dargestellt.

Die Kurven des Speicher- und Verlustmoduls weisen über den erfassten Zeitraum eine steigende Tendenz auf. In der Anfangsphase zeigte der Klebstoff mit $G' < G''$ ein typisches Verhalten einer viskoelastischen Flüssigkeit. Nach Ablauf einer gewisser Zeitspanne wurden die Gel-Punkte erreicht, wobei der Klebstoff beginnt, vom flüssigen in den festen Zustand überzugehen. Witt (2004) schlug aufgrund seiner Versuche vor, die Zeitspanne bis $G' = G''$ als Maß für die maximale offene Wartezeit heranzuziehen, in der der Klebstoff eine optimale Benetzung der zu verleimenden Fügeiteiloberflächen anbieten kann.

Mit dem steigenden Anteil an Härter reduzierte sich die Zeitspanne zum Erreichen des Gelpunktes. Beim Mischungsverhältnis von 100:20 (Gew.-%) lief die Polykondensationsreaktion sehr langsam ab. Der Gel-Punkt wurde erst nach knapp 3 h erreicht. Verdoppelte sich der Gewichtsanteil des Härter (beim Mischungsverhältnis 100:50 Gew.-%) wurde die Zeit auf ca. 40 min verkürzt. Bei 100:100 (Gew.-%) wurde den Gel-Punkt bereits nach 20 min erreicht.

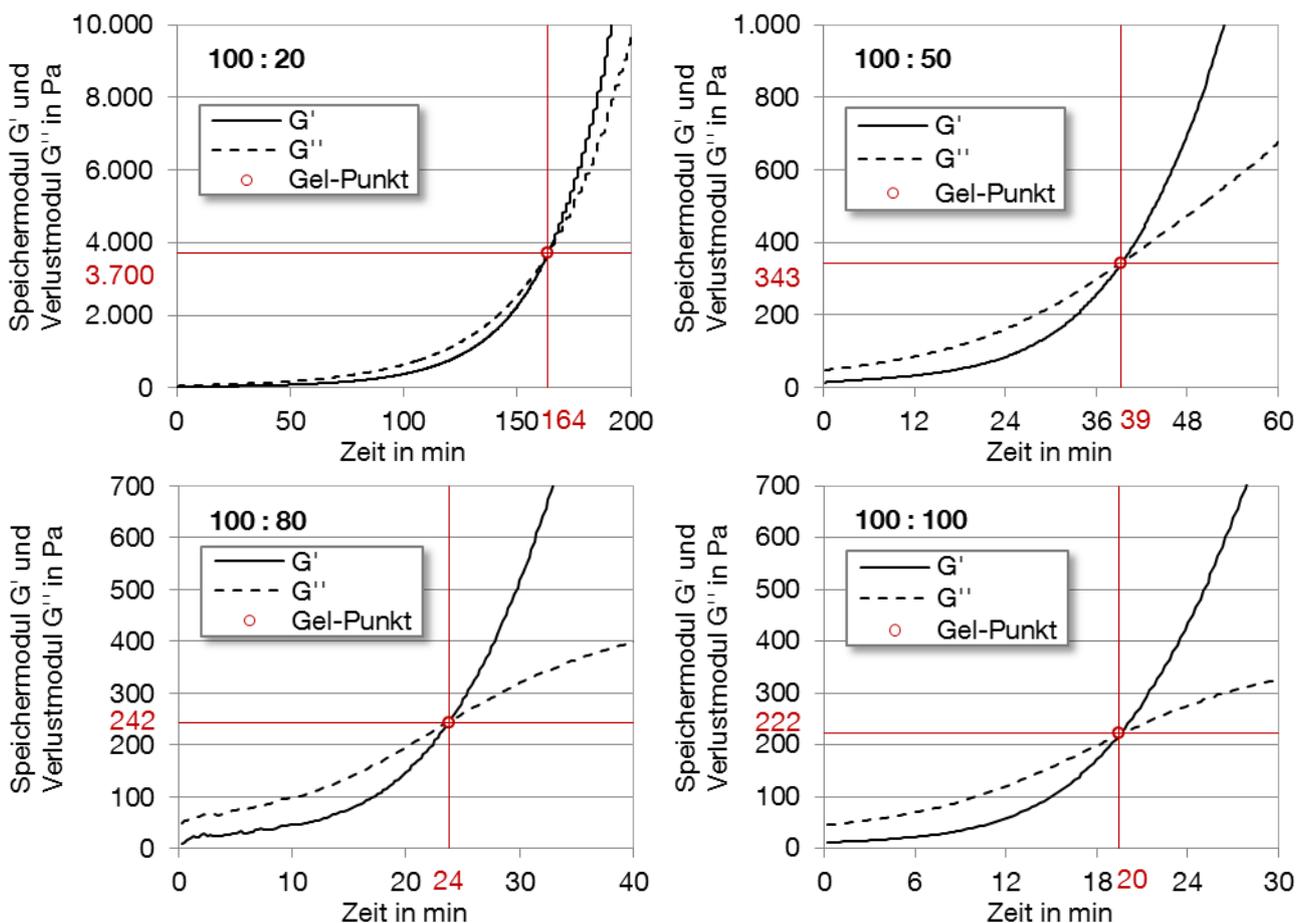


Abbildung 20: Härungsverhalten vom MUF-Klebstoff bei verschiedenen Mischungsverhältnissen

5.3.3 Rheologische Messungen an Holzoberflächen

5.3.3.1 Messtechnik

Zur Quantifizierung der Einflüsse des verwendeten Holzes, der Jahrringlage und der Holzfeuchte auf das Abbindeverhalten von Klebstoffen wurde das Platte-Platte-Messsystem, wie in Abbildung 21 dargestellt, modifiziert (Schmidt u.a. 2010). Die Metallplatten wurden durch einen Holzprüfkörper ersetzt, welcher aus einem auf der Grundplatte des Rheometers fixierten Basisstück und einem mit dem Messstempel verschraubten beweglichen Gegenstück bestand. Das Basisstück hatte eine quadratische Oberfläche mit den Abmessungen 30 mm x 34 mm. Das obere Gegenstück verfügte über eine zylindrische Scheibe mit einem Durchmesser von 25 mm (s. Abbildung 22).

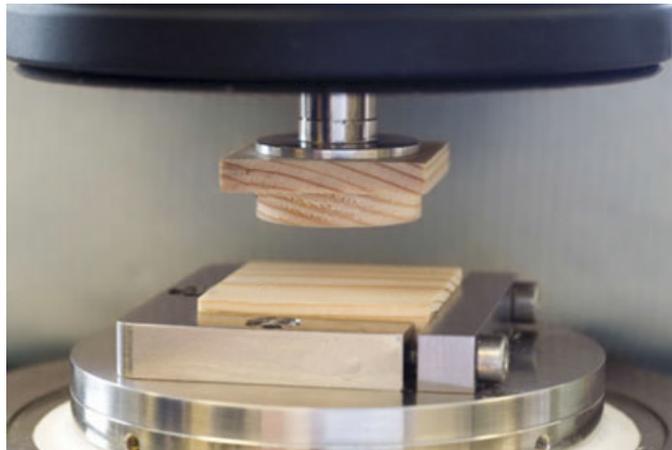


Abbildung 21: Modifiziertes Platte-Platte-Messsystem mit Prüfkörper aus Holz (Schmidt u.a. 2010)

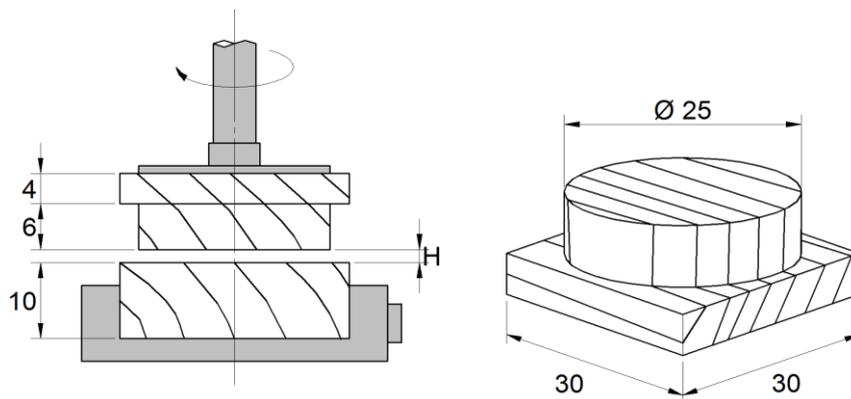


Abbildung 22: Abmessungen des Holzprüfkörpers in mm (Schmitt u.a. 2010)

5.3.3.2 Probenvorbereitung

Unter Berücksichtigung des großen Umfangs der im Arbeitsschritt durchzuführenden Versuche wurden die Messungen auf die Holzarten Esche, Buche und Fichte beschränkt, um ein möglichst breites Wissen über die Verklebung von Laubholzarten zu erhalten.

Es kamen ausschließlich fehlerfreie und geradfaserige Holzleisten zum Einsatz. Das Basis- und das dazugehörige Gegenstück wurden aus der gleichen Holzleiste hergestellt. Die Anordnung der Prüfkörper auf der Leiste wird in der Abbildung 23 dargestellt.

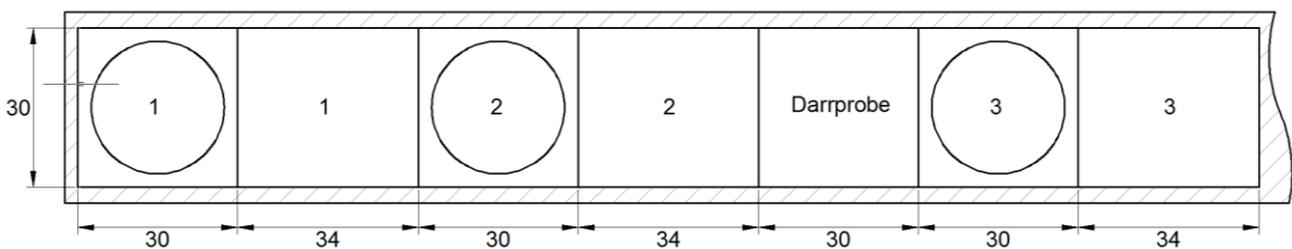


Abbildung 23: Anordnung der rheologischen Prüfkörper in der Holzleiste

Für jede Holzart wurden jeweils zehn Prüfkörper mit Radial- oder Tangentialschnittflächen unmittelbar vor den rheologischen Messungen angefertigt. Die dafür verwendeten Holzleisten wurden im Normalklima bei 20 °C/65 % rF über mehrere Monate gelagert und waren somit ausklimatisiert.

Zusätzlich wurden Holzleisten mit Tangentialschnittflächen bei 20 °C/45 % rF bzw. 20 °C/75 % rF klimatisiert. Damit sollten Holzfeuchten von ca. 8 % und ca. 15 % erreicht werden, welche in der DIN EN 386 als Minimal- und Maximalwerte der Rahmenbedingungen zur Herstellung von Brettschichtholz angegeben sind. Aus jeder Leiste wurde eine Darrprobe zur Ermittlung der Rohdichte und Holzfeuchte bereitgestellt. Die durch die Konditionierung erreichten tatsächlichen Holzfeuchten von den Holzproben werden in Abbildung 27 dargestellt. Obwohl die gewünschten Holzfeuchten bis zur Durchführung der rheologischen Messungen nicht erreicht wurden, waren Holzfeuchtegefälle zwischen den einzelnen Versuchsreihen zu erkennen.

Der MUF-Klebstoff mit dem Mischungsverhältnis von 100:50 (Gew.-%) wurde weiterhin als Standard-Messprobe verwendet. Die einzelnen Komponenten des MUF-Klebstoffs waren nur für relativ kurze Zeit lagerfähig (Leim ca. 3 Monate und Härter ca. 6 Monate). Aufgrund der langen Messdauer und großen Anzahl von Prüfkörpern wurden die Messungen bezüglich der verschiedenen Schnittrichtungen und Holzfeuchten mit dem Klebstoff aus unterschiedlichen Chargen durchgeführt. Dies führte letztendlich zu Abweichungen bei den Messergebnissen.

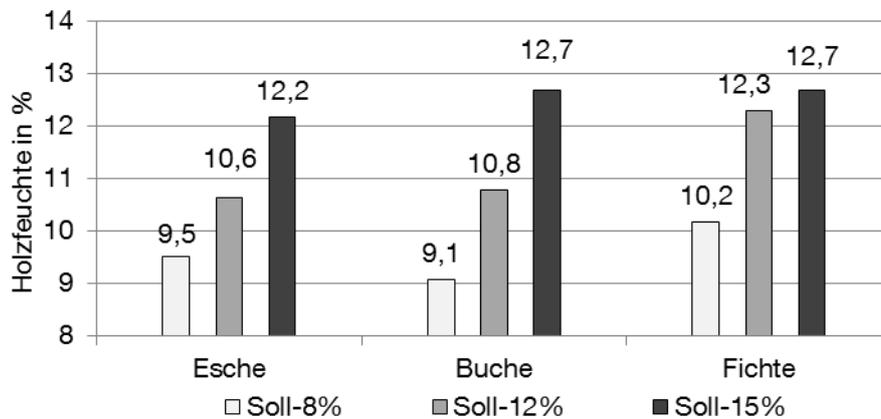


Abbildung 24: Tatsächliche Holzfeuchte der Prüfkörper

5.3.3.3 Durchführung rheologischer Messungen

Die rheologischen Messungen an Holzoberflächen erfolgten analog zum Abschnitt 5.3.2.3. Vor dem Start der Messungen wurde darauf geachtet, dass die Holzfasern der oberen und unteren Holzstücke parallel verliefen. Die Messdauer pro Versuch betrug bei den Messungen bezüglich des Einflusses verschiedener Schnittrichtungen 2 h und verschiedener Holzfeuchten 3 h.

5.3.3.4 Durchführung Scherversuche

Die vom MUF-Klebstoff nach 3 h Härtingszeit erreichten Festigkeiten wurden in Druckscherversuchen ermittelt. Der Versuchsaufbau entsprach dem in DIN 52367 beschriebenen Standardverfahren zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Spanplatten (s. Abbildung 25). Die Vorschubgeschwindigkeit der Prüfmaschine betrug 1,0 mm/min.

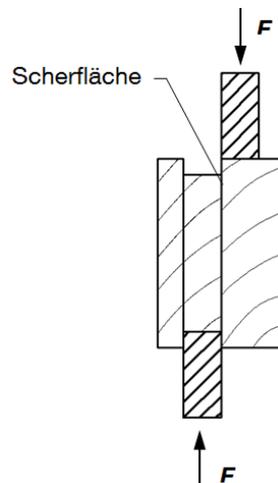


Abbildung 25: Versuchsaufbau Druckscherversuche mit eingesetztem Prüfkörper

Das typische Bruchbild der Holzprüfkörper ist in Abbildung 26 dargestellt. Aufgrund der relativ kurzen Abbindezeit fand das Versagen der Klebeverbindungen entweder in der Klebstofffuge oder zwischen den Klebstofffugen und Holzoberflächen statt. Der zurückgebliebene Klebstoff war nach den Druckscherversuchen gelartig oder sogar noch leicht klebrig. Ein Belag von feinen Holzfasern auf den Klebstofffilmen war nicht zu beobachten.



Abbildung 26: Typisches Bruchbild der Klebstofffuge

5.3.3.5 Ergebnisse

In Abbildung 27 ist die Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff an den Oberflächen unterschiedlicher Holzarten in Abhängigkeit von den Schnittrichtungen dargestellt. Die Kurve, die sich aus den mit dem Klebstoff beim Mischungsverhältnis 100:50 (Gew.-%) ohne Holzproben gemessenen Werten ergab, wird zum Vergleich gegenübergestellt.

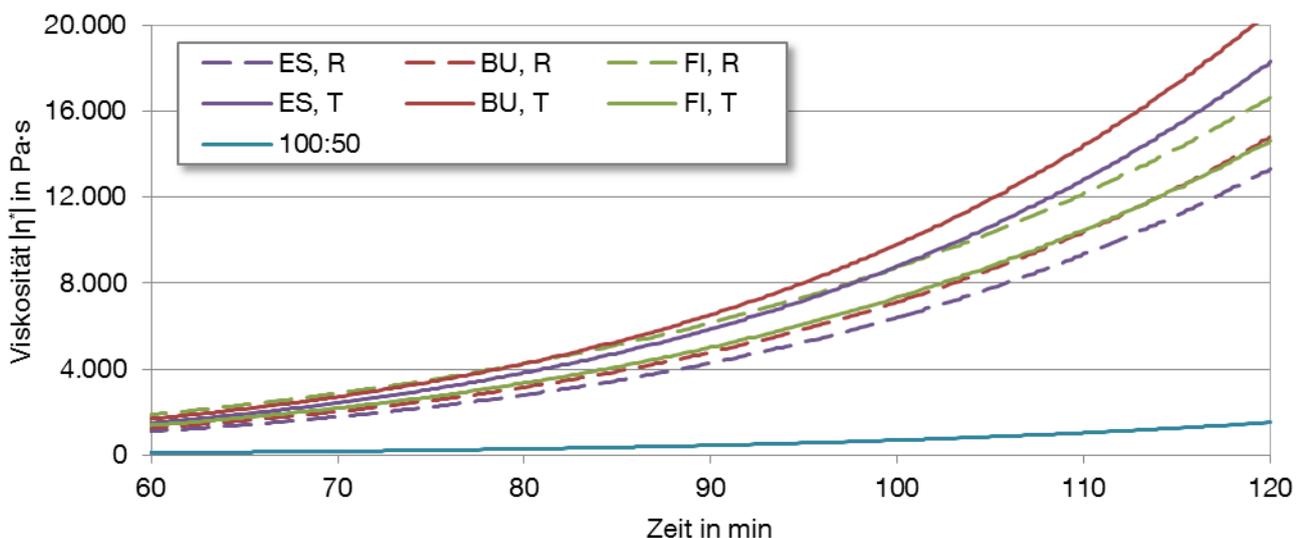


Abbildung 27. Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen

Beim Ansatz von Prüfkörpern aus Holz war ein deutlich schneller Härtingsprozess durch steileren Anstieg von den Viskositätskurven zu erkennen. Die geringste mittlere Viskosität nach einer Härtingszeit von 120 min wurde an den Radialschnittflächen des Eschenholzes gemessen, welche jedoch knapp 9-fach so hoch wie die des ohne Holzprobe ermittelten Werts war.

Bei den beiden Laubholzarten Esche und Buche wurde eine schnellere Aushärtung des Klebstoffs an den Tangentialschnittflächen festgestellt. Hingegen ergab sich für Fichtenholz eine steile Kurve an den Radialschnittflächen. Begründen lässt sich dieses Verhalten vermutlich mit der anisotropen Wasseraufnahme des Holzes. Je schneller das während der Polykondensationsreaktion des MUF-Klebstoffs entstandene Wasser von der Klebstoffuge abgeleitet und vom Holz aufgenommen wird, desto schneller härtet der Klebstoff.

Die Fähigkeit des Holzes Wasser durch Kapillarkräfte aufzunehmen wird mit dem Begriff Wasseraufnahmevermögen beschrieben. Kenngröße dafür ist der Wasseraufnahmekoeffizient, welcher nach DIN EN ISO 15148 bestimmt wird. Die Werte in Tabelle 8 wurden nach einigen Messungen für die Holzarten Buche, Lärche und Fichte angegeben.

Tabelle 8: Wasseraufnahmekoeffizienten in $\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$ (Wagenführ 2012)

| Holzart | Radiale Richtung | Tangentiale Richtung |
|---------|------------------|----------------------|
| Buche | 0,005 | 0,004 |
| Lärche | 0,002 | 0,0021 |
| Fichte | 0,003 | 0,004 |

Für Buche wurde ein höherer Wasseraufnahmekoeffizient in radialer Richtung und für Fichte in tangentialer Richtung gemessen. Die obigen Ergebnisse stimmen demnach mit den theoretischen Erwartungen überein. Für Esche liegen noch keine Werte vor. Allerdings kann man von ihren dem Buchenholz ähnelnden Verläufen der Viskositätsentwicklung davon ausgehen, dass die Esche ebenfalls über einen höheren Wasseraufnahmekoeffizient in radialer Richtung verfügt.

In Abbildung 28 wird die Entwicklung des Speichermoduls (G') und Verlustmoduls (G'') vom MUF-Klebstoff an den Tangentialschnittflächen in Abhängigkeit von den Holzarten graphisch dargestellt. Zum Vergleich wird die Kurve gegenübergestellt, die sich aus den ohne Holzproben mit dem MUF-Klebstoff beim Mischungsverhältnis 100:50 (Gew.-%) gemessenen Werten ergab.

Bei den Messungen an Holzoberflächen wurden bis zum Erreichen des Gel-Punkts kürzere Zeitspannen mit einer Reduktion um 10 bis 20 min beobachtet. Das bedeutet für eine optimale Benetzung der Holzoberfläche, dass eine offene Wartezeit von 20 min nicht überschritten werden darf. Bei geringerer Auftragsmenge sollte diese Zeitspanne noch einmal reduziert werden.

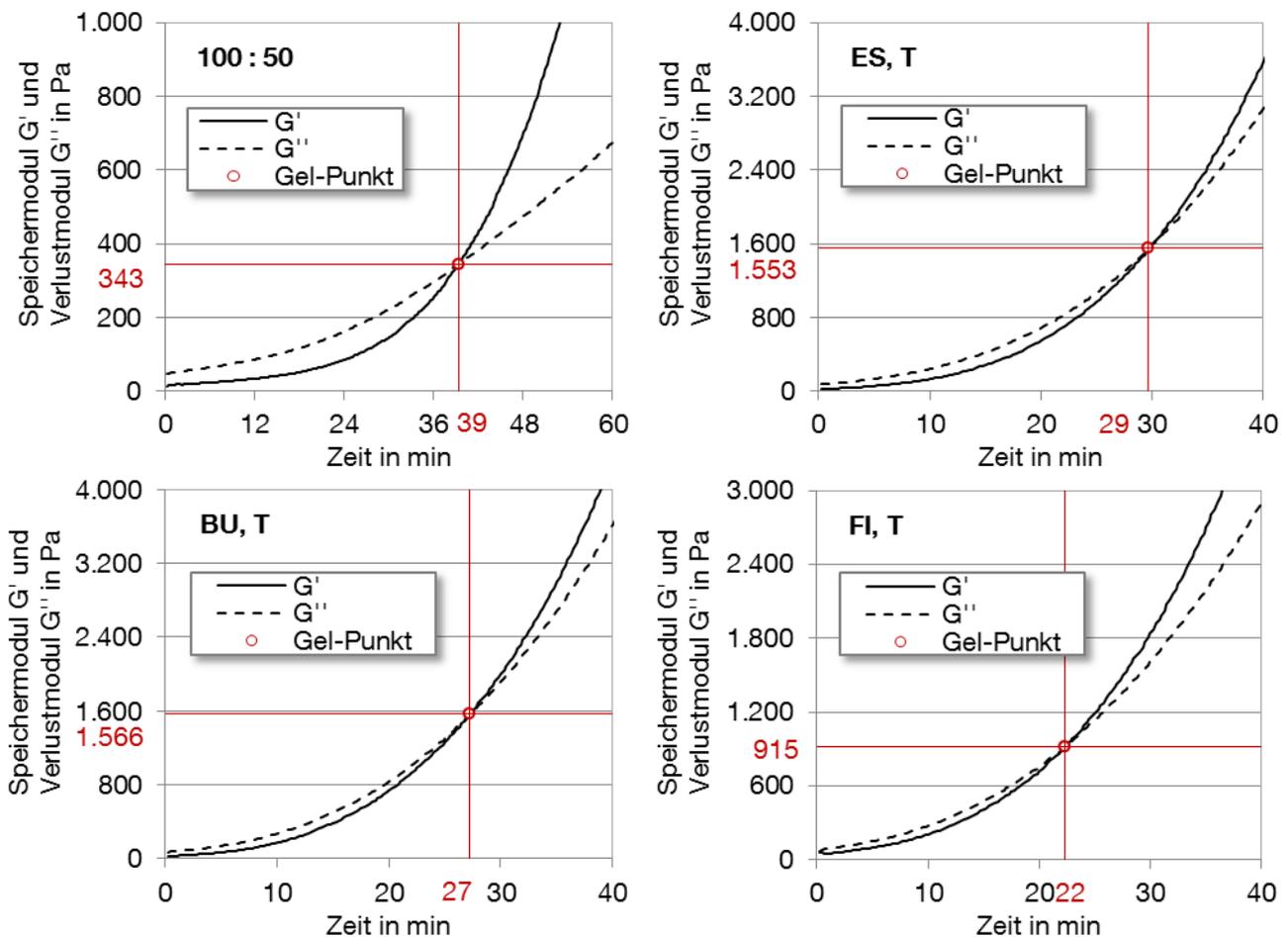


Abbildung 28: Härungsverhalten vom MUF-Klebstoff ohne/mit Holzprüfkörpern bei einem Mischungsverhältnis 100:50

Die vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen nach einer Härungszeit von 2 h erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten werden in Abbildung 29 zusammenfassend dargestellt. Die Abhängigkeit zwischen der Viskosität und Scherfestigkeit wurde veranschaulicht. Mit steigender Viskosität war tendenziell eine zunehmende Scherfestigkeit zu erwarten.

Bei den beiden Laubholzarten Esche und Buche waren wegen der verzögerten Wasseraufnahme in tangentialer Richtung durchschnittlich geringere Viskositäten an den Radialschnittflächen der Holzprüfkörper zu messen. Dementsprechend verfügten die damit gebildeten Klebeverbindungen über geringere Scherfestigkeiten. Im Vergleich dazu war beim Fichtenholz der Einfluss der Schnittrichtung wenig ausgeprägt. Trotz der höheren Viskosität wurden geringere mittlere Scherfestigkeiten mit den gebundenen Radialschnittflächen erzielt. Die mittleren Scherfestigkeiten der Klebeverbindungen sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

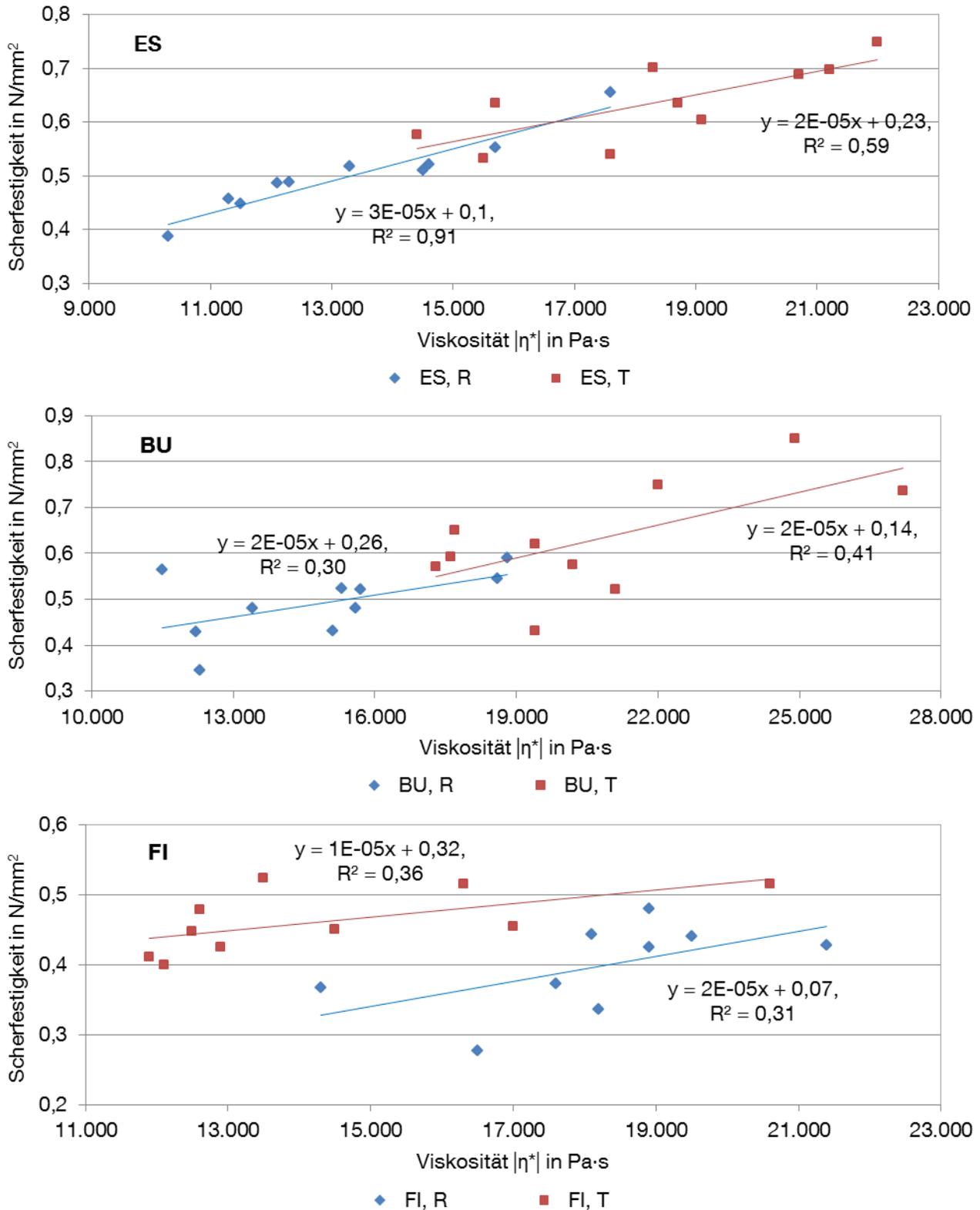


Abbildung 29: Gegenüberstellung der vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen nach 2 h Härtingszeit erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten

Tabelle 9: Mittlere vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen nach 2 h Härtingszeit erreichten Scherfestigkeiten in N/mm^2

| Holzart | Radialschnittfläche (R) | Tangentialschnittfläche (T) |
|---------|-------------------------|-----------------------------|
| Esche | 0,50 | 0,64 |
| Buche | 0,49 | 0,63 |
| Fichte | 0,38 | 0,46 |

Abbildung 30 zeigt die Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff in Abhängigkeit von der Holzfeuchte. Insgesamt wiesen die Messungen an Buchenholzoberflächen auf einen schnelleren Härtingsprozess hin. Dies ließ sich anhand ihrer im Vergleich zu der des Fichtenholzes höheren Wasseraufnahmekapazität erklären.

Trotz der relativ kleinen Holzfeuchtegefälle zwischen den einzelnen Versuchsreihen wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf den Härtingsprozess des Klebstoffs, insbesondere für das Buchenholz, festgestellt. Das aus der Polykondensationsreaktion entstehende Wasser und der Wasseranteil des Klebstoffs wurden von den Prüfkörpern mit niedrigerer Holzfeuchte schneller aufgenommen. Dementsprechend war ein steiler Anstieg der Viskosität zu beobachten. Dieses Phänomen war beim Eschen- und Fichtenholz weniger ausgeprägt.

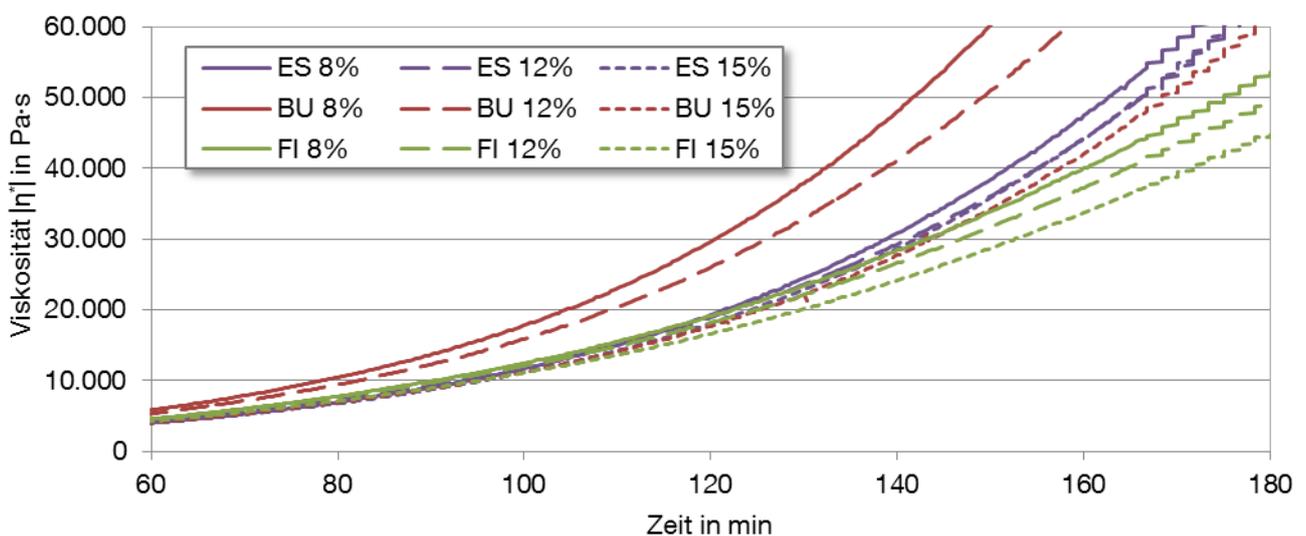


Abbildung 30: Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchte

In Abbildung 31 werden die vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchte nach 3 h Härtingszeit erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten gegenübergestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Viskosität und Scherfestigkeit wurde noch einmal bestätigt. Mit steigender Viskosität nahm die Scherfestigkeit zu. Bei einer tatsächlichen Holzfeuchte von rund

12 % wurde unabhängig von den Holzarten eine nahezu gleiche Steigerung festgestellt. Beim Eschenholz war der Einfluss der Holzfeuchte auf den Anstieg sogar vernachlässigbar.

Zu erwähnen ist ebenfalls, dass die mit Eschen- und Buchenholz geringerer Holzfeuchte erzielten Viskositäten und Scherfestigkeiten mit einer großen Streuung verbunden waren. Bei erhöhter Holzfeuchte war die Streuung reduziert. Bei Fichte war kein direkter Einfluss der Holzfeuchte auf die Streuung der Werte zu erkennen.

Die mittleren Scherfestigkeiten der Klebeverbindungen sind der Tabelle 10 zu entnehmen. Durchschnittlich höhere Scherfestigkeiten wurden bei der Versuchsreihe mit geringerer Holzfeuchte erzielt.

Tabelle 10: Mittlere vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchten (HF) nach 3 h Härtingszeit erreichten Scherfestigkeiten in N/mm²

| Holzart | 8 % | 12 % | 15 % |
|---------|------------------|------------------|------------------|
| Esche | 1,20 (9,5 % HF) | 0,94 (10,6 % HF) | 1,02 (12,2 % HF) |
| Buche | 1,87 (9,1 % HF) | 1,35 (10,8 % HF) | 1,24 (12,7 % HF) |
| Fichte | 1,30 (10,2 % HF) | 1,26 (12,3 % HF) | 1,13 (12,7 % HF) |

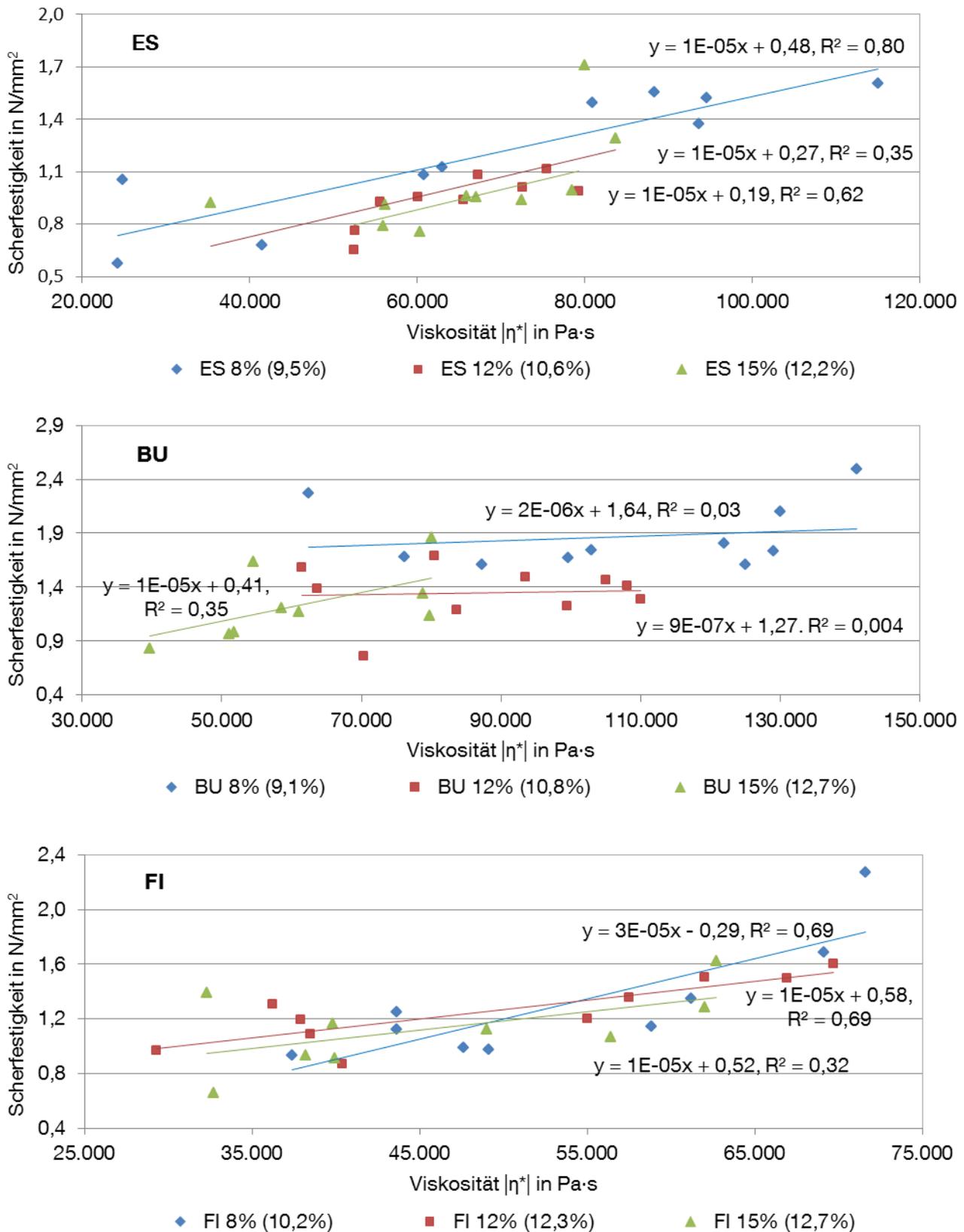


Abbildung 31: Gegenüberstellung der vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchte („Ist-Holzfeuchte“) nach 3 h Härungszeit erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten

5.3.4 Diskussion

Die rheologischen Messungen ergaben, dass der Härtingsprozess des MUF-Klebstoffs über die gesamte Abbindezeit mit einem Viskositätsanstieg einhergeht und durch Erhöhung des Härter-Anteils beschleunigt werden kann. Die beschleunigende Wirkung trägt dazu bei, dass die Zeitspanne zum Erreichen des Gel-Punkts wesentlich verkürzt werden kann. Dementsprechend ist bei der Verklebung eine Reduzierung der offenen Wartezeit erforderlich, um zu garantieren, dass beim Zusammenfügen der Fügeiteiloberflächen der Klebstoff ein ausreichendes Benetzungsvermögen gewährleistet.

Die Messungen an Holzoberflächen wiesen darauf hin, dass die Wasseraufnahmekapazität des Holzes beim Härtingsprozess vom MUF-Klebstoff eine entscheidende Rolle spielt. Hölzer mit hohem Wasseraufnahmevermögen können in kurzer Zeit das Kondensationswasser durch Kapillarkräfte aus der Klebstoffuge ableiten und aufnehmen. Dadurch wird der Härtingsprozess des MUF-Klebstoffs noch einmal beschleunigt. Weiterhin ist die Wasseraufnahmekapazität des Holzes von der Holzart, der Jahrringlage und dem Holzfeuchtegehalt abhängig. Waangard u. Granados (1967) berichten über den Einfluss der Extraktstoffgehalte auf das Wasseraufnahmevermögen des Holzes. Sie zeigten, dass die Extraktstoffe das Wasser daran hindern können, den gleichen Raum einzunehmen. Daher sollte man bei den inhaltstoffreichen Holzarten, wie z. B. Lärche, mit einer eventuell geringeren Wasseraufnahmekapazität rechnen. Bei der Verklebung relativ trockener Hölzer oder Hölzer mit geringem Wasseraufnahmevermögen ist die offene Wartezeit entsprechend zu reduzieren. Bei Verklebung von Hölzern mit erhöhter Holzfeuchte oder hohem Wasseraufnahmevermögen kann eine entsprechend verlängerte offene Wartezeit verwendet werden.

Es wurde mehrfach bestätigt, dass zwischen der Viskosität der Klebstoffe und den Scherfestigkeiten der damit gebildeten Klebeverbindungen ein enger Zusammenhang besteht. Mit steigender Viskosität nahm die Scherfestigkeit zu. Die höchsten durchschnittlichen Scherfestigkeiten wurden zum großen Teil für die Versuchsreihen festgestellt, bei welchen eine schnelle Härtung des Klebstoffs erfolgte.

6 Arbeitsschritt 2: Beurteilung der Klebstoffsysteme

6.1 Längszugscherversuche gemäß DIN EN 302-1

6.1.1 Allgemeines

Die Verklebbarkeit der fünf Holzarten mit den gewählten Klebstoffsystemen ließ sich grundsätzlich anhand der Längszugscherversuche nach DIN EN 302-1 überprüfen und vergleichen. Diese gängige Prüfmethode bot sich aufgrund ihres vergleichsweise geringen Versuchsaufwands bei der Herstellung der Probekörper an.

6.1.2 Probenherstellung

Es wurden zwei 5 mm starke Holzplatten mit einer Länge von 300 mm und Breite von 130 mm aus demselben Brett herausgeschnitten. Der Winkel zwischen den Jahrringen und der zu verklebenden Fläche lag zwischen 30° und 90°. Die zu verklebenden Holzoberflächen wurden unmittelbar vor der Verklebung unter Verwendung vom Schleifpapier der Körnung P100 leicht geschliffen. Schleifstaub wurde mittels Druckluft sorgfältig entfernt.

Die Verklebung erfolgte im Normalklima nach den Angaben und Erfahrungen der Klebstoffhersteller. Die gemischten oder einkomponentigen Klebstoffe wurden manuell mittels einer Spachtel aufgetragen. Der Pressdruck von 0,8 N/mm² für Nadelholzarten und 1 N/mm² für Laubholzarten wurde mit der Presse (Toni Technik U4600 P+, Fa. Zwick Roell) aufgebracht. Um den Einfluss der Presszeit auf die Endfestigkeit der Verklebung auszuschließen, wurden alle verklebten Teile unabhängig von der Holzart und dem verwendeten Klebstoff über Nacht gepresst. In Tabelle 11 werden die für die entsprechenden Klebstoffe eingesetzten Verklebungsparameter aufgeführt.

Nach dem Pressen und vor der Prüfung wurden die verklebten Platten 7 Tage im Normalklima gelagert. Drei Tage nach dem Verkleben wurden aus jedem geklebten Teil 10 Probekörper geschnitten (s. Abbildung 32). Durch parallele Sägeschnitte quer zur Holzfaser, jeweils einer auf jeder Seite, wurde eine definierte Scherfläche von 200 mm² erzeugt.

Tabelle 11: Verklebungsparameter zur Herstellung der Zugscherprüfkörper

| Klebstoffsysteme | PRF | EPI | MUF | PUR |
|---|---------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Mischungsverhältnis Harz zu Härter (Gew.-%) | 100:20 | 100:15 | 100:50 | - |
| Klebstoffauftrag | Untermischverfahren | | | - |
| Auftragsmenge in g/m ² | 450 beiderseitig | 250 einseitig | 300 einseitig | 200 einseitig |
| Offene Wartezeit in min | < 5 | < 1-2 | 15 | 20 |
| Geschlossene Wartezeit in min | 15 | 15 | 15 (NH) 30 (LH) | 10 |
| Pressdruck in N/mm ² | 0,8 (NH) / 1 (LH) | | | |
| Presszeit | über Nacht | | | |

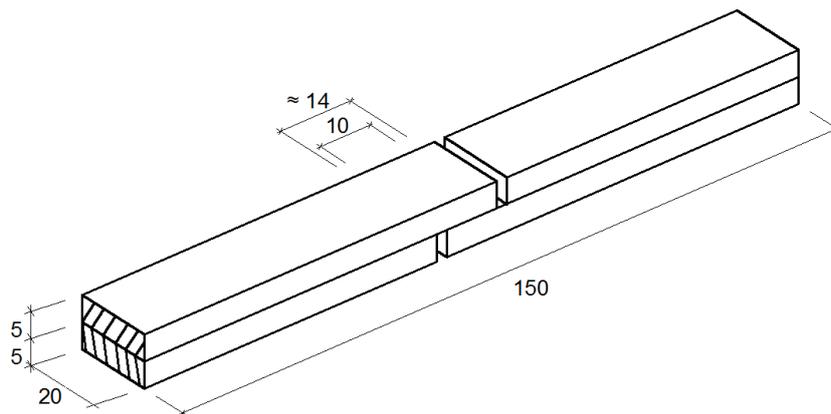


Abbildung 32: Zugscherprüfkörper, Abmessungen in mm

6.1.3 Versuchsdurchführung

Nach der 7-tägigen Lagerung im Normalklima wurden 10 Prüfkörper jeder Kombination von Holzart und Klebstoff einer der folgenden Behandlungsmethode in Anlehnung an DIN EN 302-1 unterzogen:

- A1 – ohne weitere Konditionierung
- A2 – 4 Tage untergetaucht in Wasser bei $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, geprüft in feuchtem Zustand
- A4 – 6 h in kochendem Wasser, 2 h untergetaucht in Wasser bei $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, geprüft in feuchtem Zustand

Nach den entsprechenden Behandlungen wurden die Prüfkörper in die Einspannbacken symmetrisch eingelegt, mit ihrer Längsachse parallel zur Krafrichtung ausgerichtet und in der Universalprüfmaschine (Zwick Z 600, Fa. Zwick Roell) eingespannt. Die Zugkraft wurde bis zum Bruch des Prüfkörpers aufgebracht. Die Vorschubgeschwindigkeit der Prüfmaschine betrug 0,5 mm/min.

Die Zugscherfestigkeit der Prüfkörper wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Zugscherfestigkeit} = \frac{\text{Bruchkraft}}{200} \quad \text{in N/mm}^2 \quad [9]$$

6.1.4 Ergebnisse

6.1.4.1 Referenzwerte

Als erste Referenzwerte zur Beurteilung der Verklebbarkeit der fünf Holzarten mit den gewählten Klebstoffen wurden die Mindestanforderungen an die nach DIN EN 302-1 mit Prüfkörpern aus Buche ermittelten Zugscherfestigkeiten für Klebstofftyp I nach DIN EN 301 herangezogen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendeten Klebstoffe wurden im Rahmen des Zulassungsverfahrens bereits geprüft und für die entsprechende Anwendung zugelassen. Daher sollten die damit hergestellten Klebeverbindungen aus Buche die entsprechenden Leistungsanforderungen nach DIN EN 301 (s. Tabelle 12) erfüllen.

Tabelle 12: Mindestwerte der mittleren Zugscherfestigkeit für dünne Klebstofffugen an Prüfkörpern aus Buche in N/mm²

| Behandlung Nr. | Typ I |
|----------------|-------|
| A1 | 10,0 |
| A2 | 6,0 |
| A4 | 6,0 |

Darüber hinaus wurden Prüfkörper aus Vollholz mit gleichen Abmessungen, wie in Abbildung 32 dargestellt, hergestellt. Unmittelbar vor den Bruchlastversuchen wurden die Vollholzproben den gleichen Behandlungsmethoden (s. Abschnitt 6.1.3) unterzogen. Die damit ermittelten Zugscherfestigkeiten dienten als weitere Referenzwerte.

Sämtlichen Ergebnisse der Längszugscherversuche sind Anlage 8 bis Anlage 12 zu entnehmen.

6.1.4.2 Buchenholzverklebung

Abbildung 33 gibt einen Überblick über die mittleren Zugscherfestigkeiten der Prüfkörper aus Buche.

Die Ergebnisse der ersten Versuche waren zum großen Teil zufriedenstellend. Die Vollholzprüfkörper erreichten eine mittlere Zugscherfestigkeit von 11,6 N/mm² in trockenem Zustand. Unter Verwendung von PRF-, EPI- und PUR-Klebstoffen wurde die Mindestanforderung an die mittlere Zugscherfestigkeit nach Behandlung A1 von 10 N/mm² erfüllt. Die höchste Abweichung zur Zugscherfestigkeit der Vollholzproben betrug weniger als 15 %. Hohe Holzbruchanteile von 90 bis 100 % wurden ermittelt.

Die Mindestanforderung an die Klebstoffugen nach Behandlung A2 (6 N/mm²) wurde von allen Kombinationen von Holzart und Klebstoff erfüllt. Nach Behandlung A4 wurden befriedigende Ergebnisse lediglich von den mit PRF- und EPI-Klebstoffen hergestellten Proben erzielt. Jedoch lagen die Zugscherfestigkeiten der Klebeverbindungen in feuchtem Zustand stets unter denen der Vollholzproben. Für die Vollholzproben wurden mittlere Zugscherfestigkeiten von jeweils 9,3 N/mm² nach A2 bzw. 7,7 N/mm² nach A4 ermittelt.

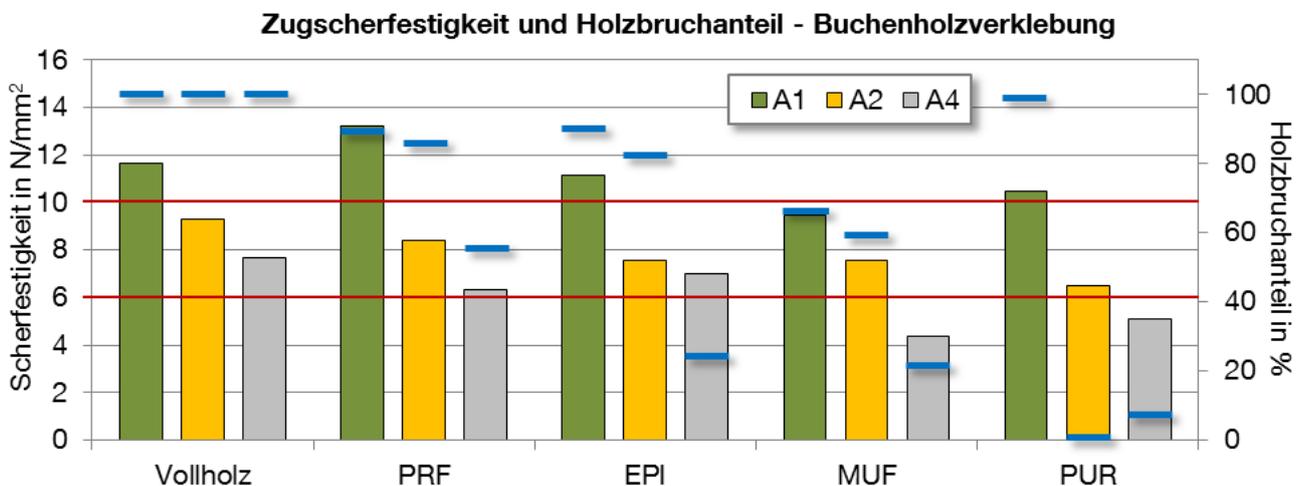


Abbildung 33. Mittlere Zugscherfestigkeit (Säulen) und Holzbruchanteil (blaue Markierungen) der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper aus Buche nach Behandlung A1, A2 und A4

Unzureichende Zugscherfestigkeiten wurden in den ersten Versuchen vor allem mit dem MUF-Klebstoff bei den Behandlungen A1 und A4, bzw. PUR-Klebstoff bei der Behandlung A4 ermittelt. Die entsprechenden Versuche wurden mit gleichen Verklebungsparametern wiederholend durchgeführt. Beim Wiederholungsversuch mit PUR-Klebstoff wurde eine zufriedenstellende Zugscherfestigkeit von 6,3 N/mm² nach der Behandlung A4 ermittelt. Bei der Verklebung mit dem

MUF-Klebstoff versagten die Klebeverbindungen noch einmal bei niedrigen Werten. Dies wies darauf hin, dass Anpassungsbedarf hinsichtlich der bei der Verklebung verwendeten Parameter bestand.

Nach Rücksprache mit dem Klebstoffhersteller wurde die Auftragsmenge des MUF-Klebstoffs erhöht bzw. die offene Wartezeit während der Verklebung reduziert. Mit den angepassten Parametern wurden die entsprechenden Versuche zum zweiten Mal wiederholt. Die späteren Ergebnisse waren zufriedenstellend. Die Mindestleistungsanforderungen nach DIN EN 301 für die Klebeverbindungen im trocknen und nassen Zustand wurden erfüllt. Die Ergebnisse der Wiederholungsversuche werden in Abbildung 34 angezeigt.

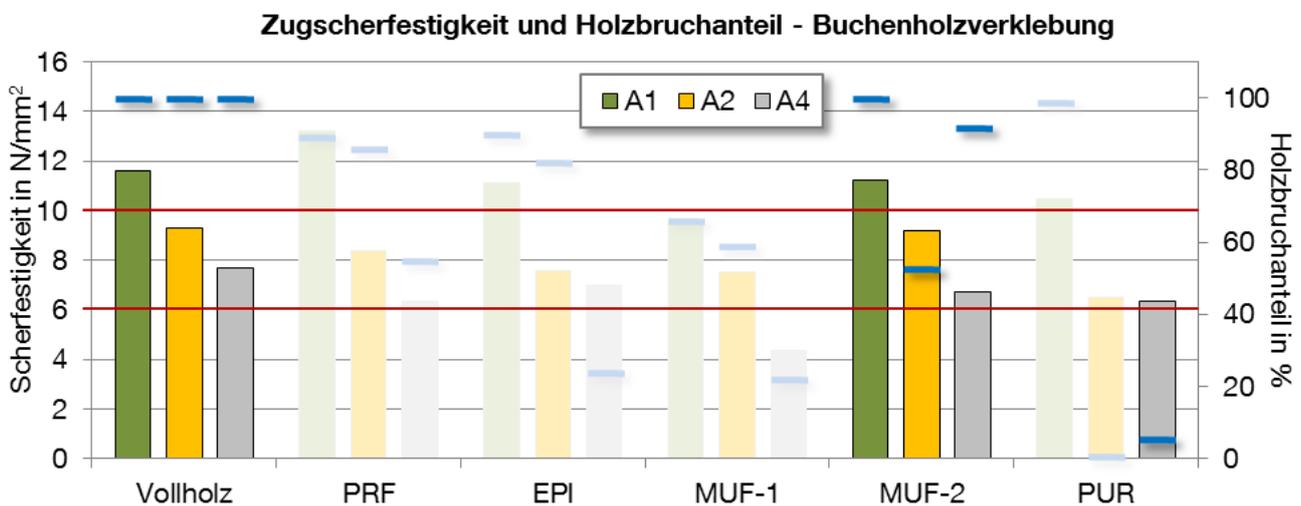


Abbildung 34: Ergebnisse der Wiederholungsversuche mit MUF- und PUR-Klebstoffen: mittlere Zugscherfestigkeit (Säulen) und Holzbruchanteil (blaue Markierungen) der Prüfkörper aus Buche

6.1.4.3 Verklebung anderer Holzarten

In Abbildung 35 werden die Ergebnisse der Zugscherversuche mit den Prüfkörpern aus den anderen Holzarten (außer Buche) dargestellt. Zu erwähnen ist ebenfalls, dass mit den angepassten Verklebungsparametern vom MUF-Klebstoff kein Wiederholungsversuch für die anderen vier Holzarten durchgeführt wurde. Die in diesem Abschnitt aufgeführten Ergebnisse der mit MUF-Klebstoff hergestellten Verklebungen beziehen sich auf die ersten Versuche.

Beim Eschenholz wurden hohe Zugscherfestigkeiten von über 10 N/mm² von den mit PRF-, MUF- und PUR-Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen in trockenem Zustand erzielt. Verklebt mit dem EPI-Klebstoff wurde eine relativ geringe Festigkeit von 9,2 N/mm² ermittelt. Die für die Buchholzverklebung gesetzte unterste Grenze nach Behandlung A2 von 6 N/mm² wurde lediglich unter der Verwendung des PRF-Klebstoffs überschritten. Die anderen Prüfkörper versagten

bereits bei rund 5 N/mm². Die mit den Vollholzproben ermittelten Zugscherfestigkeiten lagen weit über denen der Klebeverbindungen.

Im trocknen Zustand verfügten die meisten Lärchenholzverklebungen über eine Zugscherfestigkeit von knapp über 8 N/mm², welche nah an den Werten der Vollholzproben lagen. Bei der Verklebung mit dem PUR-Klebstoff wurden höhere Festigkeitswerte von sogar 10,3 N/mm² ermittelt. Für die Klebeverbindungen aus Douglasie wurden Zugscherfestigkeiten von ca. 8 N/mm² ermittelt. Die Zugscherfestigkeiten der Klebeverbindungen aus Fichte lagen zwischen 6 bis 8 N/mm². Im nassen Zustand wurden ebenfalls niedrigere Zugscherfestigkeiten von 4 bis 6 N/mm² für die drei Nadelholzarten ermittelt.

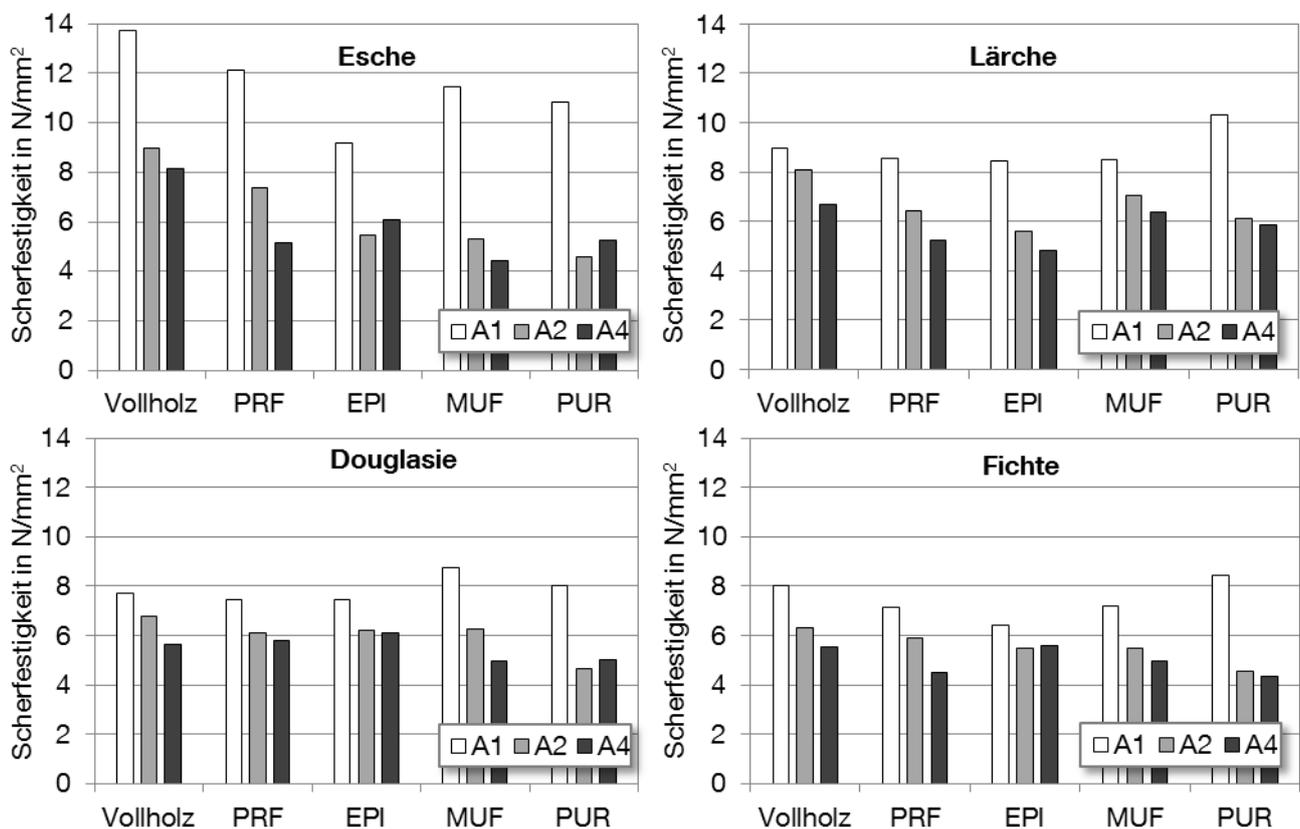


Abbildung 35: Mittlere Zugscherfestigkeiten der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Proben

6.2 Mikroskopische Untersuchung

6.2.1 Allgemeines

Die Verklebungen aus verschiedenen Holzarten in Kombination mit vier Klebstoffen wurden anhand der mikroskopischen Untersuchungen qualitativ ausgewertet. Das Hauptaugenmerk wurde auf die Topologie der Klebeverbindung gelegt. Als Beurteilungskriterium dienten die Dicke der Klebfugen und das Eindringverhalten der Klebstoffe.

6.2.2 Versuchsdurchführung

Mikrotom-Schnitte mit Dicken von etwa 20 μm wurden quer zu den Klebfugen an den Stirnflächen der Zugscherprüfkörper entnommen. Zur besseren Differenzierung zwischen den farblosen Klebstoffen und den Holzgeweben wurden die mikroskopischen Schnitte mit Safranin angefärbt. Die verfärbten Holzzellwände waren durch einen rosa Farbton gekennzeichnet.

Der ausgehärtete MUF-Klebstoff war ziemlich spröde, was die Präparation dünner Mikrotom-Schnitte sehr schwierig machte. Zur Messung der Klebstofffugendicke wurden die Stellen ausgesucht, an welchen die Klebfugen möglichst wenig durch die Präparation zerstört wurden.

Die Mikroskopische Untersuchung erfolgte mit Hilfe eines Durchlichtmikroskops (Axiophot, Fa. Zeiss) und der integrierten digitalen Bildauswertungssoftware (Axio Vision 4.8.3.0, Fa. Zeiss).

6.2.3 Ergebnisse

6.2.3.1 Verklebung der Nadelholzarten

Der PRF-Klebstoff verfügte über ein sehr gutes Eindringvermögen. In Abbildung 36 wird die mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung dargestellt. Zwischen den Frühholzgeweben wurde eine Klebfugendicke von 74 μm gemessen. Der Klebstoff drängt in einige Zellreihen tief ein (ca. 119 μm). Ähnliche Bilder ergaben sich aus den mit dem Douglasien- und Fichtenholz hergestellten Klebeverbindungen (s. Abbildung 37 u. Abbildung 38). Klebfugen mit einer durchschnittlichen Stärke von ca. 90 μm wurden gebildet. Das Eindringen vom Klebstoff in die Frühholzgewebe war bis zu einer Tiefe von ca. 100 μm zu messen. In den Spätholzbereichen aller drei Nadelholzarten zeigte der Klebstoff nur ein sehr begrenztes Eindringverhalten.

Bei der Verklebung mit dem EPI-Klebstoff wurden dickere Klebfugen von ca. 130 μm bei Lärche und Douglasie gebildet (s. Abbildung 39 u. Abbildung 40). Das Eindringen vom Klebstoff fand nur in der ersten Reihe der Holzzellen statt. Die zu erkennende Stauchung und Abtrennung der Frühholzzellen von der Klebstofffuge entstand erst während der Präparierung dünner Mikrotom-Schnitte. In Abbildung 41 wird die Klebfuge der Fichtenholzverklebung angezeigt. Die schmalen

Spätholzbereiche ermöglichten ein relativ gleichmäßiges Eindringen des Klebstoffs entlang der Fügeiteiloberflächen. Die Messung der Klebfugendicke ergab, dass es sich hierbei um eine dünnere Klebfuge von ca. 50 μm handelt.

Bei den mit geringeren Auftragsmengen und längeren offenen Wartezeiten hergestellten Nadelholzverklebungen zeigte der MUF-Klebstoff nur ein sehr begrenztes Eindringvermögen (s. Abbildung 42, Abbildung 43 u. Abbildung 44). Im Frühholzbereich waren mit Klebstoff gefüllte Holzzellen nur vereinzelt zu beobachten. Bei Douglasie mit großem Spätholzanteil fand das Eindringen von Klebstoff kaum noch statt. Infolgedessen wurde trotz der relativ geringen Auftragsmenge eine Klebstofffuge bis zu einer Dicke von 136 μm gebildet.

In Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 werden die mikroskopischen Aufnahmen der mit dem PUR-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen aus Lärche, Douglasie und Fichte dargestellt. Das typische schwache Eindringvermögen dieses Klebstoffsystems wurde bestätigt. Auch in den Frühholzbereichen fand fast kein optisch erfassbares Eindringen statt. Dementsprechend ließ sich eine dicke Klebstofffuge von bis zu 200 μm bei der Fichtenholzverklebung messen.

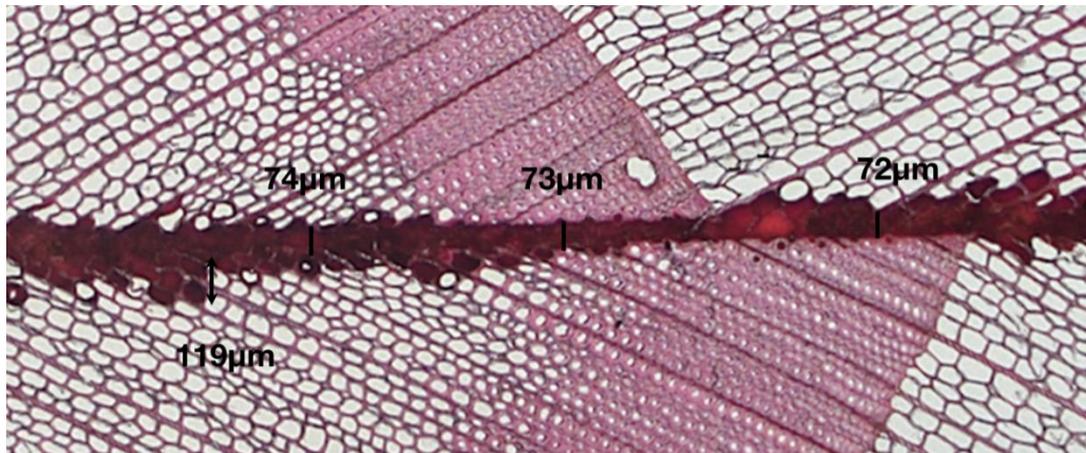


Abbildung 36: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung

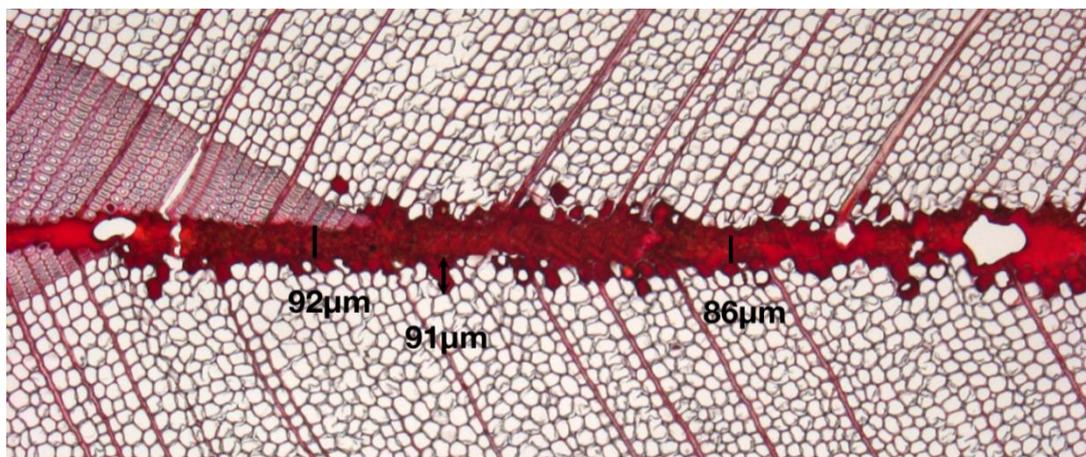


Abbildung 37: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie

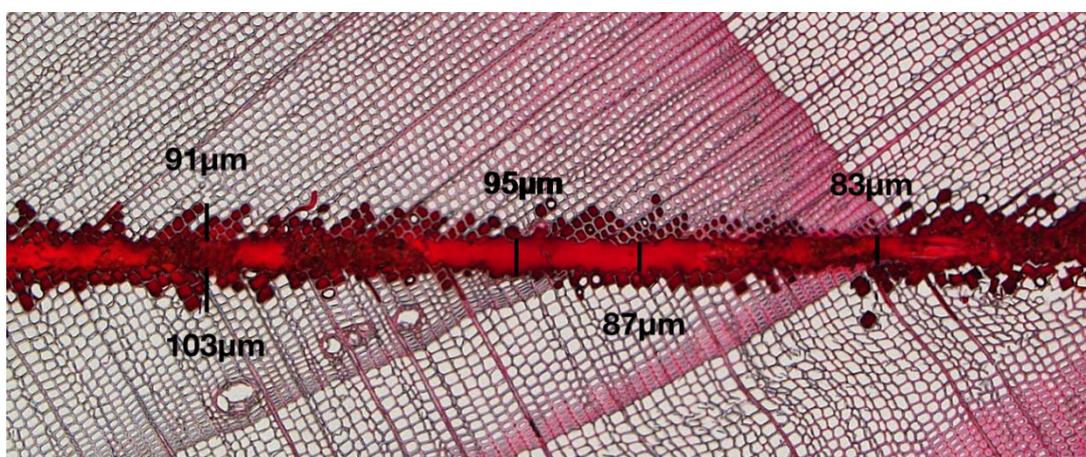


Abbildung 38: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung

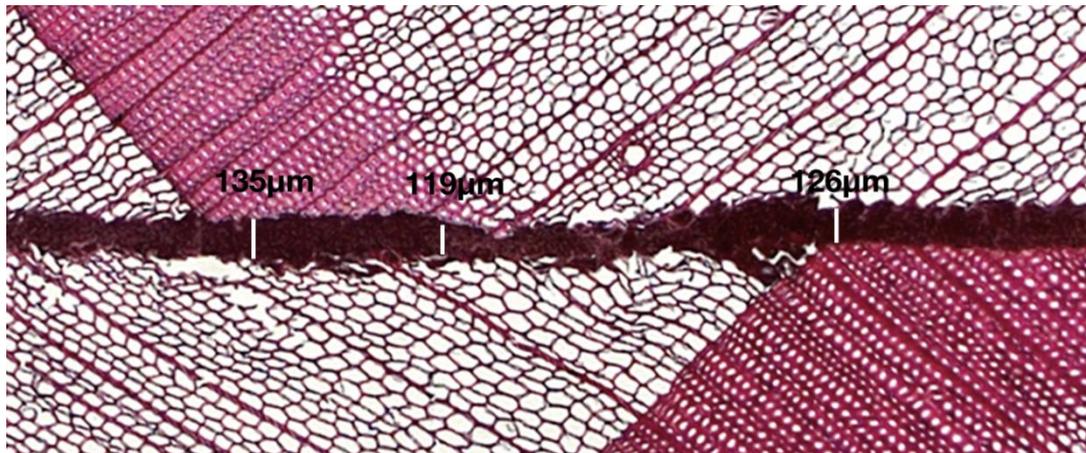


Abbildung 39: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung

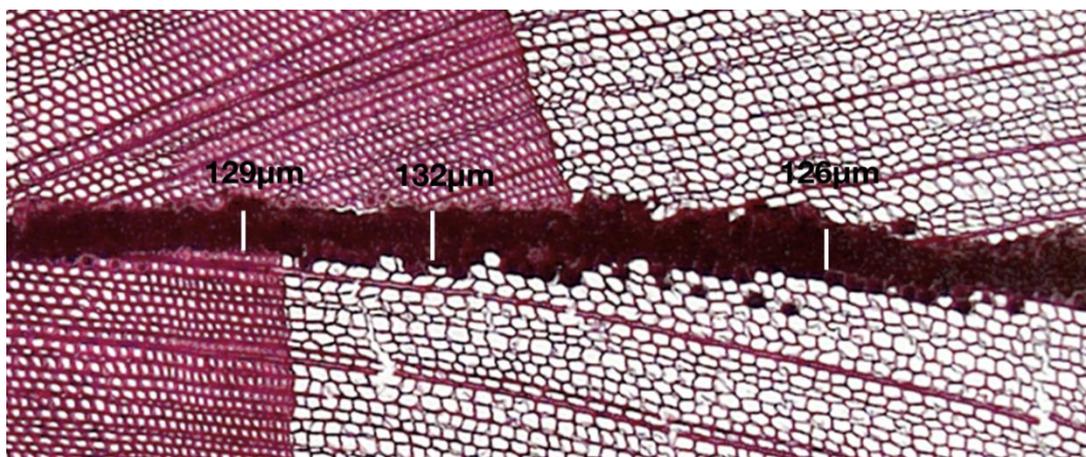


Abbildung 40: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie

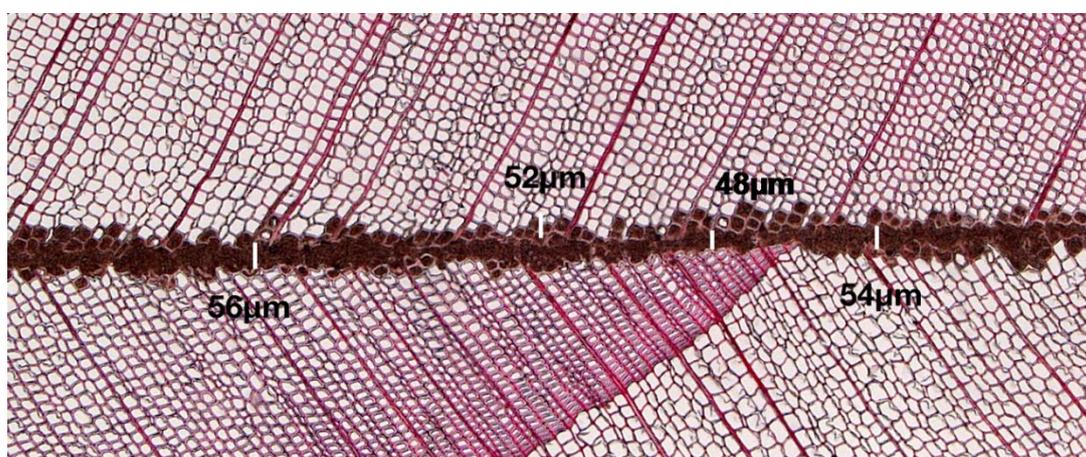


Abbildung 41: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung

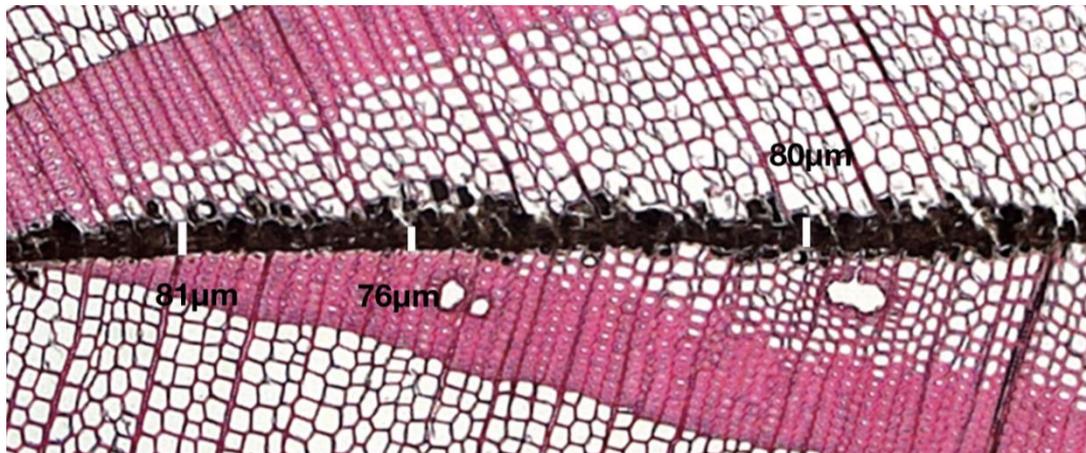


Abbildung 42: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung

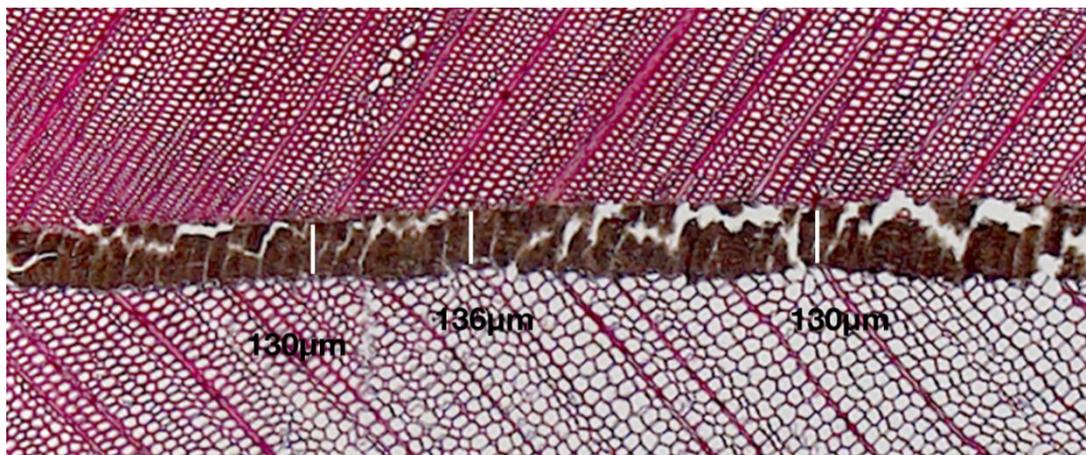


Abbildung 43: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie

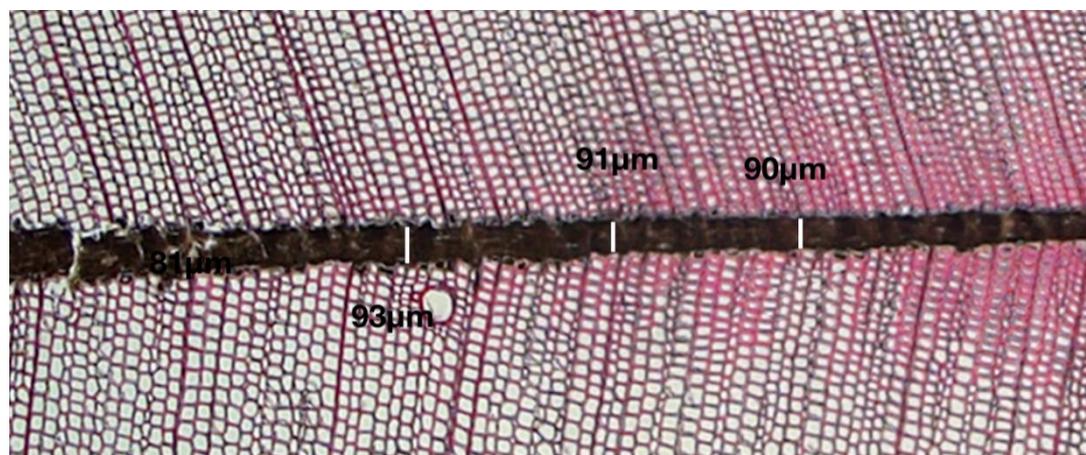


Abbildung 44: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung

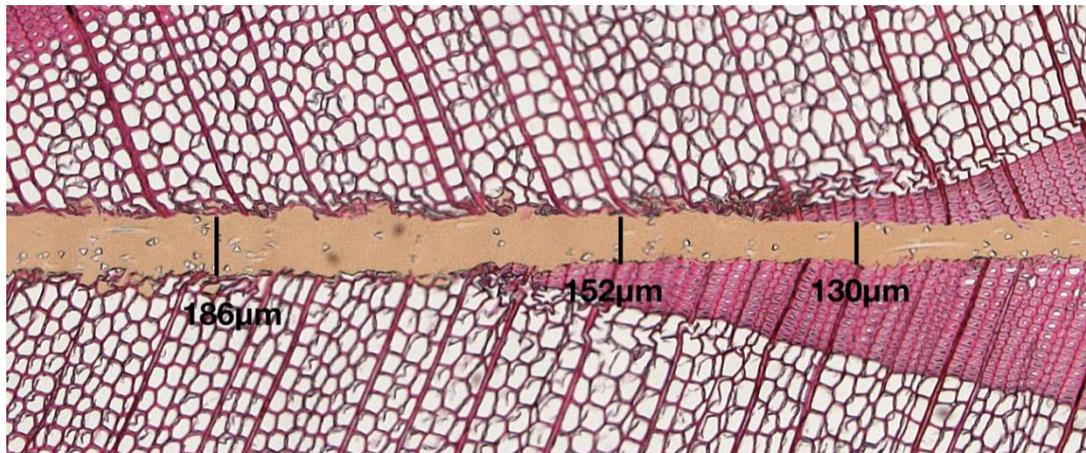


Abbildung 45. Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung

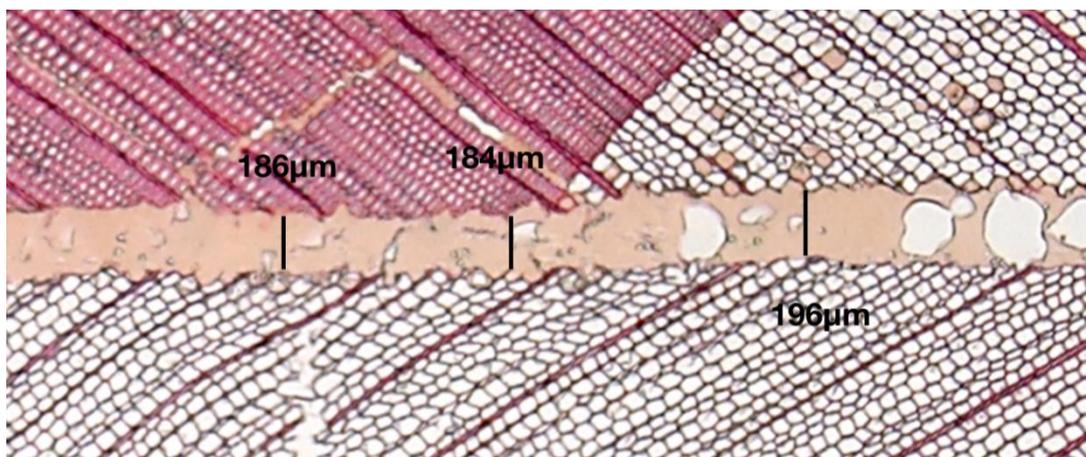


Abbildung 46: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie

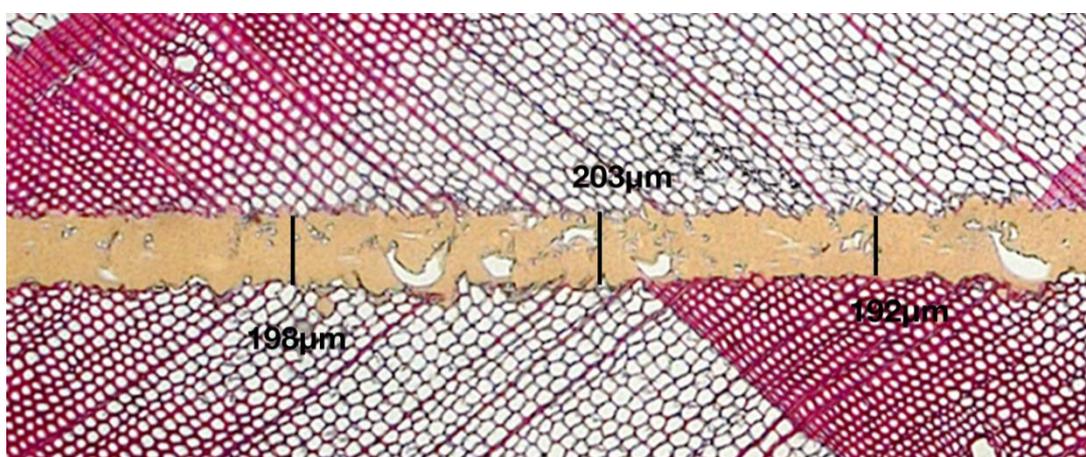


Abbildung 47: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung

6.2.3.2 Verklebung der Laubholzarten

Wittel u.a. (2010) modellierte das Eindringen von Klebstoffen ins Buchenholz und wies darauf hin, dass die maximale Eindringtiefe von Klebstoffen in die Holzstruktur als Beurteilungskriterium für die Güte der Laubholzklebfugen ungeeignet ist. Sie erklärten, dass bei der Verklebung von Laubholzarten die Klebstoffe durch die zahlreich vorhandenen und miteinander vernetzten Gefäße schnell von der Klebstoffuge wegtransportiert werden und rasch große Entfernungen zur Holzoberfläche erreichen können. Dies bedeutet für die konventionale mikroskopische Untersuchung, dass eine Einzelschnitte der Klebfuge das tatsächliche Eindringverhalten von Klebstoffen nicht repräsentieren kann. Daher diene die Eindringtiefe des Klebstoffs in die Gefäße bei der qualitativen Auswertung der Laubholzverklebungen nur als ein Nebenkriterium.

Die Messungen an den Nadelholzverklebungen ergaben, dass der PRF-Klebstoff sehr gutes Eindringvermögen verfügte. Dies lässt sich anhand der Einzelschnitten von Eschen- und Buchenholzverklebungen ebenfalls bestätigen. In Abbildung 48 wird die Klebfuge der mit PRF-Klebstoff verklebten Esche dargestellt. Die Klebstoffuge verfügt über eine einheitliche Stärke von ca. 80 μm . Die vom Klebstoff befüllten Poren befanden sich in den Frühholzbereichen bis zu einer Tiefe von 875 μm . In Abbildung 49 wurde eine optimal ausgebildete Klebfuge der mit dem PRF-Klebstoff verklebten Buche dargestellt. Die beiden Fügeiteiloberflächen wurden vollständig benetzt. Die Dicke der Klebfuge beträgt etwa 105 μm . Die Spur des Klebstoffs wurde bis zu einer Tiefe von 1208 μm in den Frühholzbereichen nachgewiesen.

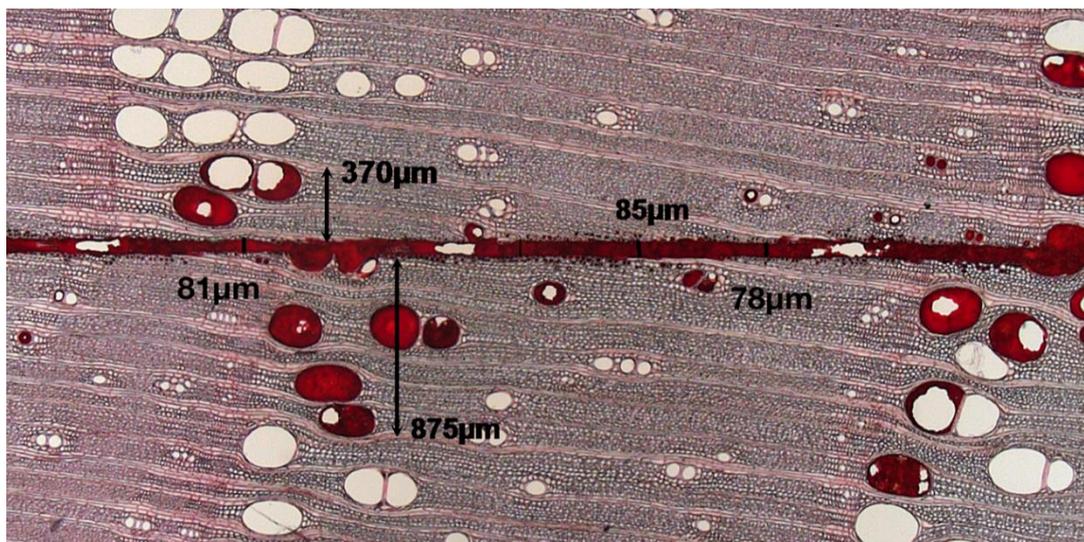


Abbildung 48: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung

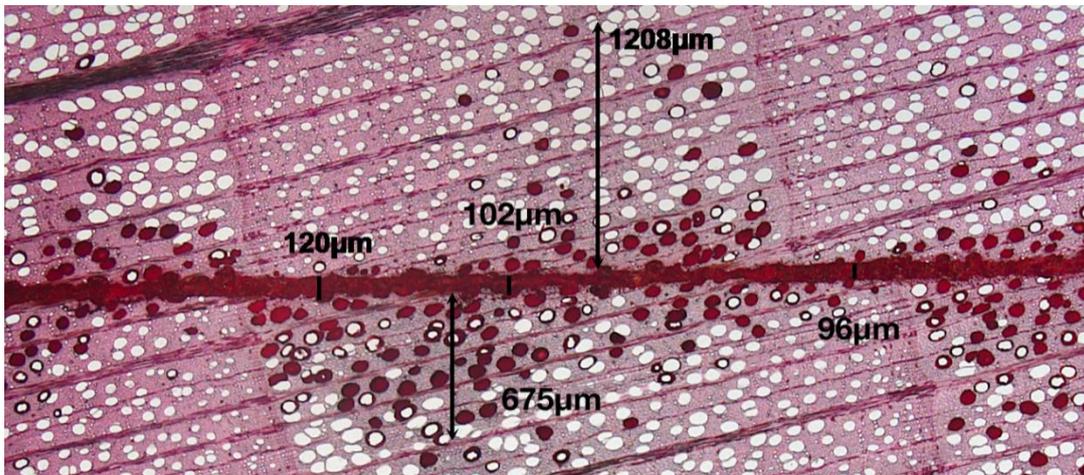


Abbildung 49: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung

Für den EPI-Klebstoff wurde bei den Nadelholzverklebungen ein im Vergleich zum PRF-Klebstoff etwas schwächeres Eindringvermögen festgestellt. Ähnliche Bilder wurden bei den Eschen- und Buchenholzverklebungen erhalten (s. Abbildung 50 u. Abbildung 51). Dabei war das Eindringen vom EPI-Klebstoff lediglich in die offenen oder angrenzenden Gefäße der Holzoberflächen zu beobachten. Relativ dicke Klebfugen mit einer Dicke von 120 bis 130 µm wurden gebildet.

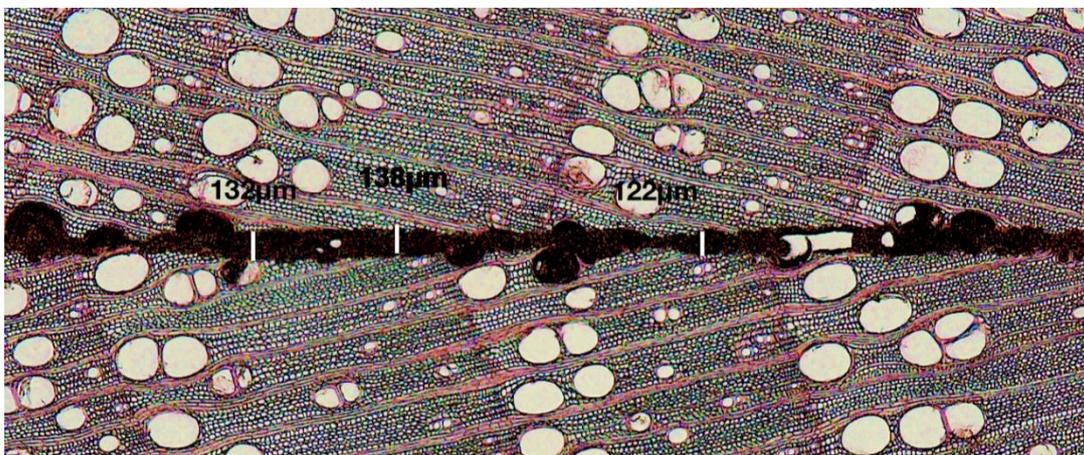


Abbildung 50: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung

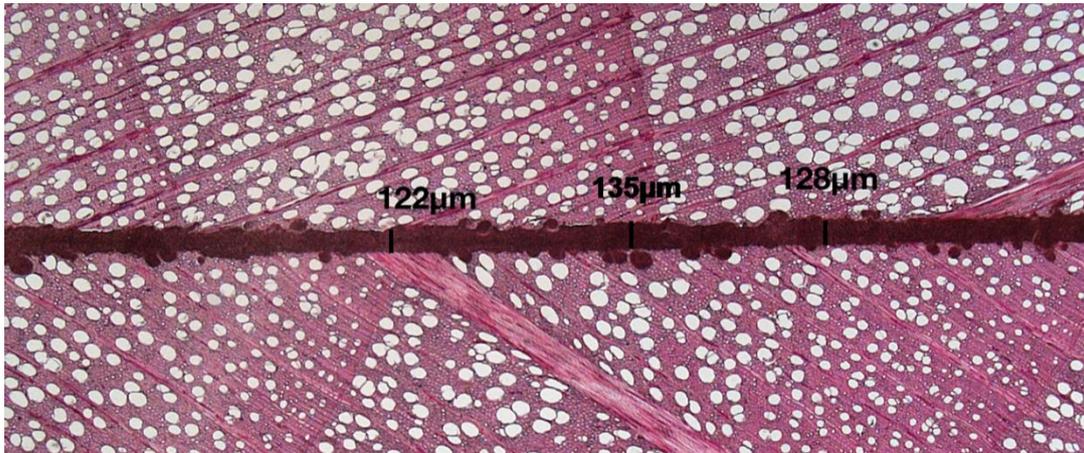


Abbildung 51: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung

Der MUF-Klebstoff zeigte bei den Nadelholzverklebungen nur ein begrenztes Eindringvermögen. Dementsprechend wurden zwischen den Fügeteiloberflächen dicke Klebefugen gebildet. In Abbildung 52 wird die mikroskopische Aufnahme der ebenfalls mit geringer Auftragsmenge und länger offenen Wartezeit hergestellten Klebeverbindung aus Esche dargestellt. Während der Klebstoff nur leicht in die offenen Frühholzgefäße an den Holzoberflächen eindringt, wurde Klebstofffuge mit einer geringeren Dicke von ca. 70 µm gebildet. Abbildung 53 zeigt die Klebefuge der Buchenholzverklebung, welche mit denselben Verklebungsparametern hergestellt wurde. Vom MUF-Klebstoff befüllten Gefäße sind dabei nur vereinzelt in der oberen Holzoberfläche nachzuweisen. Schmale Klebfuge mit einer Dicke von ca. 50 µm ließ sich messen.

Dies ließ sich nach Wittel u.a. (2010) folgendermaßen erklären: Die maximal zur Verfügung stehende Klebstoffmenge war kleiner als das Volumen, das für den Klebstoff bis ihre Aushärtung zugänglich war. Der rasche Transport vom Klebstoff durch das Gefäßnetz der Auftragsseite führte dazu, dass der Klebstoff einseitig wegschlägt und die Klebefilme bevor dem Zusammenfügen der Holzplatten bereits angetrocknet war. Keine richtige Haftung zwischen der Klebstofffuge und der unteren Holzoberflächen war vorhanden.

In den Wiederholungsversuchen wurden beanspruchbare Buchenholzverklebungen durch Erhöhung der Auftragsmenge des Klebstoffs und Reduzierung der offenen Wartezeit realisiert (s. Abschnitt 6.1.4.2). Der Einzelschnitt der Klebfuge wird in Abbildung 54 dargestellt. Die Dicke der Klebfuge bleibt wie zuvor bei ca. 50 µm. Die von Klebstoff befüllten Gefäße sind aber in den beiden Fügeteiloberflächen zu beobachten.

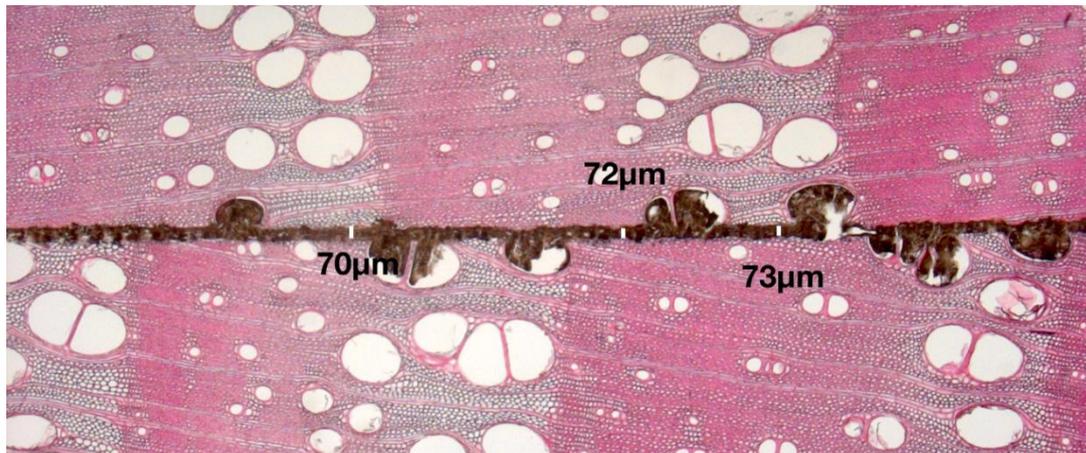


Abbildung 52: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung

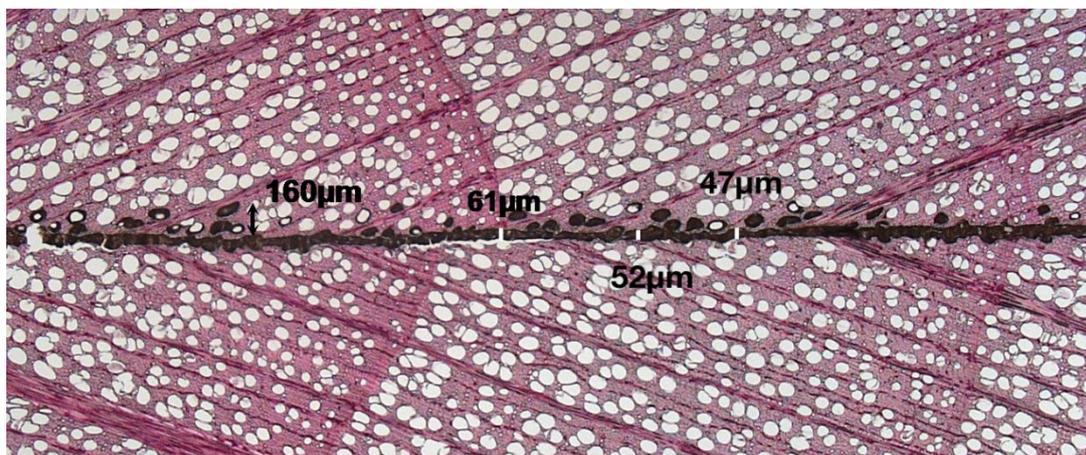


Abbildung 53: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung (Klebfuge hergestellt mit ursprünglichen Verklebungsparametern)

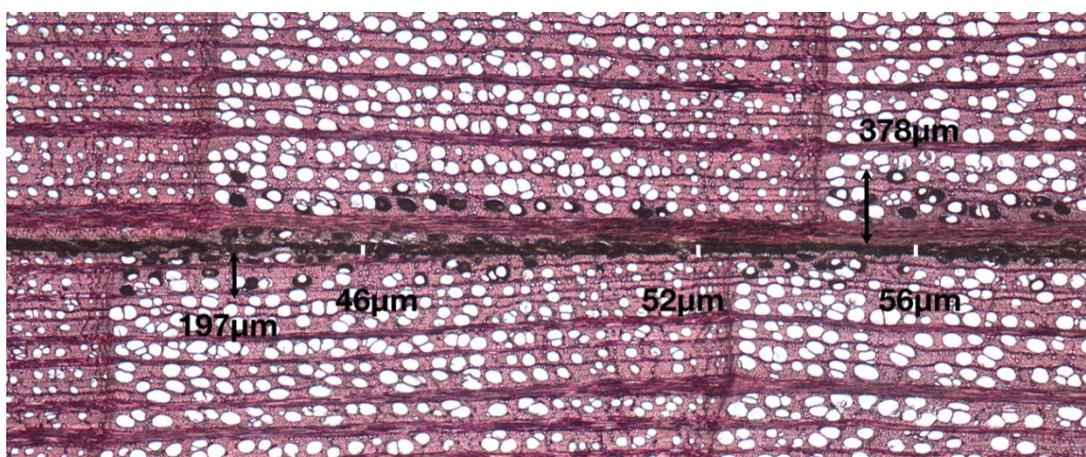


Abbildung 54: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung (Klebfuge hergestellt mit angepassten Parametern)

Das geringe Eindringverhalten vom PUR-Klebstoff wurde bereits bei der Verklebung der Nadelholzarten bestätigt. Aus den mikroskopischen Aufnahmen der Laubholzverklebungen konnte aber ganz unterschiedliches Eindringverhalten von PUR-Klebstoff ausgelesen werden.

Abbildung 55 zeigt die Klebfuge der mit PUR-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung. Ähnlich wie bei den Nadelholzverklebungen ist die Spur des Klebstoffs lediglich in die offenen Frühholzgefäßen nachzuweisen. Hingegen bei der Klebeverbindung aus Buche (s. Abbildung 56) sind die von dem Klebstoff befüllten Gefäße bis zu einer Tiefe von 1240 µm immer noch zu beobachten. Dementsprechend wurde schmale Klebefuge mit einer Dicke von ca. 50 µm gebildet.

Geht man davon aus, dass die mikroskopische Aufnahme der Buchholzverklebung das tatsächliche Eindringverhalten vom PUR-Klebstoff in die Laubholzstruktur repräsentiert, lässt sich vermuten, dass im Vergleich zu den der Laubholzgefäße die Zellwände der Nadelholztracheiden für die Moleküle des Isocyanat-Prepolymers schwer durchlässig sind.

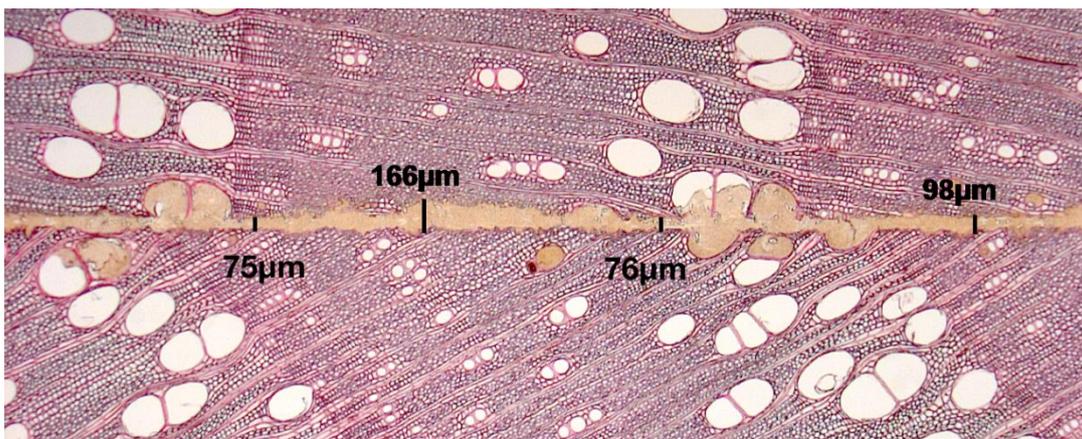


Abbildung 55: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung

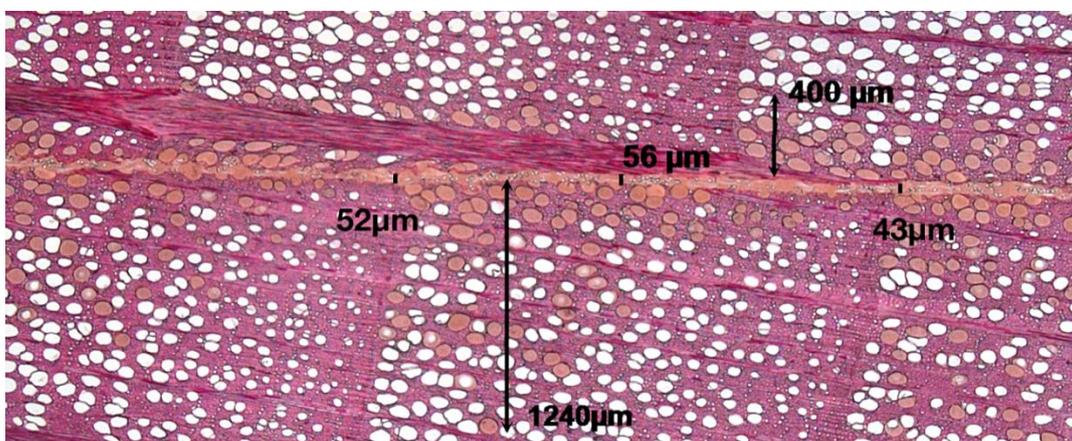


Abbildung 56. Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung

6.3 Diskussion

Ergebnisse der Längszugscherversuche zeigten, dass mit einer notwendigen Anpassung der Verklebungsparameter alle ausgewählten Klebstoffe in der Lage waren, leistungsfähige Klebeverbindungen in Kombination mit den fünf Nadel- und Laubholzarten herzustellen. Es gab allerdings auch kein Klebstoff, der für eine bestimmte Verklebung besonders aussichtsreich erschien oder als definitiv ungeeignet zu erachten war. Erfahrung lehrt aber, dass die Verklebung vom Lärchenholz mit PUR-Klebstoff häufig zur Leistungsschwankung führt. Es herrscht allgemein die Ansicht, dass die lärchenholzspezifische Holzpolyose Arabinogalactan (AG) einen negativen Einfluss auf die mit dem 1K-PUR-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebungen ausübt. Künniger u.a. (2006) wiesen darauf hin, dass bei hohem Anteil an AG (20 % oder mehr) die Klebeverbindungen stark beeinträchtigt werden können, insbesondere wenn hohe Feuchtebelastungen auftreten (s. Abschnitt 5.1.2.6). Von daher wird der Einsatz vom PUR-Klebstoff bei der Lärchenholzverklebung eher als ungeeignet angesehen. Allein anhand der im Rahmen dieses Arbeitsschritts mit Lärchenholz und PUR-Klebstoff erzielten hohen Zugscherfestigkeiten ließ sich jedoch keine Aussage über den Einfluss der AG auf die treffen.

Die mit den Prüfkörpern im trockenen Zustand ermittelten Zugscherfestigkeiten waren soweit vergleichbar mit denen der Vollholzproben. Bei den Klebeverbindungen aus den beiden Laubholzarten Buche und Esche wurden hohe Festigkeitswerte von sogar bis hin zu 13 N/mm² festgestellt. Bei der Verklebung der Nadelholzarten wurden mittlere Zugscherfestigkeiten von rund 8 N/mm² ermittelt. Die Kalt- oder Kochwasserexposition führte bei allen Kombinationen von Holzart und Klebstoff zu niedrigeren Festigkeitswerten. Der durchschnittliche Festigkeitsabfall der Klebeverbindungen betrug bei den Laub- und Nadelholzarten jeweils 45 und 30 %. Die mit den Vollholzproben ermittelten Zugscherfestigkeiten waren von den Klebeverbindungen in nassem Zustand kaum noch zu erreichen.

Die mikroskopische Untersuchung gab neben der Verklebungsqualität noch Auskunft über das Eindringverhalten von den Klebstoffen. Messungen der maximalen Eindringtiefe der Klebstoffe bei der Nadelholzverklebung beweisen, dass das Eindringvermögen der hierbei verwendeten Klebstoffe in folgender Reihenfolge nachlässt: PRF, EPI, MUF und PUR. Dies wurde bei der Laubholzverklebung anhand der Einzelschnitte zum großen Teil, bis auf den PUR-Klebstoff, bestätigt.

Laut dem Forschungsantrag waren für jede Holzart zwei Klebstoffe auszuwählen, die für eine Verklebung besonders aussichtsreich erscheinen. Angesichts der vorliegenden Ergebnisse wurde auf der 2. Projektsitzung des Projektbegleitenden Ausschuss am 14.12.2012 beschlossen, die folgenden Parameterstudien abweichend vom Forschungsantrag mit allen bislang verwendeten Klebstoffsystemen durchzuführen. Damit der Arbeitsumfang in einem angemessenen Rahmen blieb, wurden die Untersuchungen auf die Holzarten Buche, Esche, Lärche und Fichte beschränkt.

7 Arbeitsschritt 3: Parameterstudien

7.1 Allgemeines

Ergebnisse der labortechnischen Untersuchungen zeigten, dass Verarbeitungsparameter wie das Alter der Oberfläche und die Methode der Oberflächenherstellung die chemische und physikalische Beschaffenheit der Holzoberflächen verändern können. Anhand von AS 3 „Parameterstudien“ wurde der Einfluss der Holzart, des Klebstoffes und der oben genannten Verarbeitungsparameter auf die Verklebungsqualität näher betrachtet.

7.2 Probenherstellung

Jeweils sechs Lamellen mit den Abmessungen 160 x 30 x 500 mm (B x D x L) wurden zu einem Versuchsträger mit einer Höhe von 180 mm verklebt. Die Anforderungen an den Versuchsträger waren in Übereinstimmung mit den Angaben in DIN EN 302-2.

Für jede Kombination von Holzart und Klebstoffsystem wurden drei Versuchsträger angefertigt. Bei der Herstellung wurden das Alter der Oberfläche und die Methode der Oberflächenherstellung variiert. Die zu verklebenden Oberflächen wurden durch das Hobeln mit einer konventionellen Hobelmaschine oder Schleifen mit einer Breitbandschleifmaschine (Schleifpapier Körnung 100) erzeugt. Die Verklebung erfolgte entweder mit frisch hergestellten Oberflächen oder Oberflächen, die nach dem Hobeln auf Endmaße 7 Tage lang in Normalklima gelagert wurden. Bei den frisch hergestellten Oberflächen betrug die Zeitspanne zwischen der Oberflächenherstellung und Verklebung weniger als 5 h.

Basierend auf den Ergebnissen des AS 2 wurden die Verbindungsparameter nach Konsultierung der Klebstoffhersteller für die Herstellung Versuchsträger im Labormaßstab angepasst. (s. Tabelle 13). Die Verklebung erfolgte im Normalklima. Die Klebstoffe wurden manuell mittels des Spachtels aufgetragen. Der Pressdruck von 0,8 N/mm² für Nadelholzarten und 1,2 N/mm² für Laubholzarten wurde mit einer hydraulisch betriebenen Presse aufgebracht. Nach dem Pressen wurden die verklebten Teile vor weiteren Bearbeitungen 7 Tage im Normalklima gelagert.

Wie in Abbildung 57 dargestellt, wurden die Probekörper für Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Blockscherprüfung nach DIN EN 392 sowie mikroskopische Untersuchungen demselben Träger entnommen. Aus jedem Träger wurden zwei Delaminierungsprüfkörper mit einer Dicke von 75 mm ausgesägt. Ihr Abstand zu den Stirnflächen des Versuchsträgers wurde auf 50 mm gehalten. Zusätzlich wurden sechs Prüfstäbe mit einem Querschnitt von 50 x 50 mm und allen fünf Klebfugen aus der Mitte des Trägers für die Blockscherprüfung vorbereitet. Zur mikroskopischen Untersuchungen wurden zwei Scheiben mit einer Dicke von 15 mm und allen fünf Klebfugen des Versuchsträgers geschnitten.

Tabelle 13: Verklebungsparameter zur Herstellung Prüfkörper der Parameterstudien

| Klebstoffsysteme | PRF | | EPI | | MUF | | PUR | | |
|---|---------------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|---------------|--|
| Mischungsverhältnis Harz zu Härter (Gew.-%) | 100:20 | | 100:15 | | 100:50 | | - | | |
| Klebstoffauftrag | Untermischverfahren | | | | | | | - | |
| Auftragsmenge in g/m ² | 450 einseitig | | 250 einseitig | | 450 einseitig | | 200 einseitig | | |
| Offene Wartezeit in min | < 5 | | < 5 | | < 5 | | 20 | | |
| Geschlossene Wartezeit in min | 15 | | 10 | | 25 (NH) | 30 (LH) | 5 | | |
| Pressdruck in N/mm ² | 0,8 (NH) | 1,2 (LH) | 0,8 (NH) | 1,2 (LH) | 0,8 (NH) | 1,2 (LH) | 0,8 (NH) | 1,2 (LH) | |
| Presszeit | 4 h | | 65 min | 2 h | 8 h | | 2 h 15 min | 4 h 30 min | |

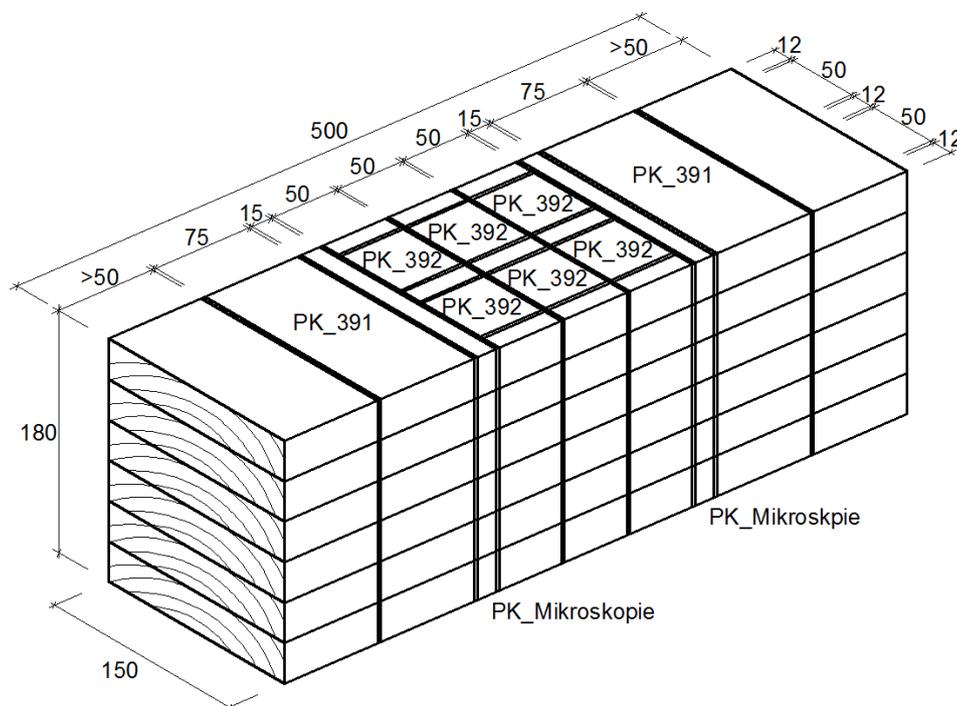


Abbildung 57: Prüfkörper der Parameterstudien, Abmessung in mm

7.3 Versuchsdurchführung

7.3.1 Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A

Bei der Delaminierungsprüfung wurden die Prüfkörper in einem Druckgefäß mit Wasser über den Fasersättigungspunkt hinaus gesättigt und danach in einer Trocknungsanlage schnell wieder getrocknet. Konkret wurden die Prüfkörper in einem Druckgefäß gelegt und vollständig mit Wasser bedeckt. Es wurde ein Vakuum von 70 bis 85 kPa erzeugt und 5 min aufrechtgehalten. Nach dem Abbau vom Vakuum wurde ein Druck von 500 bis 600 kPa aufgebracht und wiederum für 1 h aufrechtgehalten. Dieser Vakuum/Druck-Zyklus wurde einmal wiederholt. Anschließend wurden die Prüfkörper für einen Zeitraum von 22 h in der Trocknungsanlage (ULWA-E, Fa. Ulrich Lübbert Warenhandel) mit $65\pm 5^\circ\text{C}$ und 15 % relativer Luftfeucht getrocknet.

Durch das Quellen und Schwinden des Holzes wurden hohe Spannungen in den Klebfugen hervorgerufen. Im Falle einer unzureichender Klebfestigkeit treten Leimfugenöffnungen aus, welche als Delaminierung bezeichnet wird. Der Gesamtprozentsatz der Delaminierung an beiden Stirnflächen gelte als Maß für die Verklebungsqualität. Die Länge der Delaminierung wurde nach der Trocknung innerhalb 1 h gemessen.

Der Gesamtprozentsatz der Delaminierung eines Prüfkörpers berechnet sich wie folgt:

$$\frac{l_{tot,dela}}{l_{tot,glue\ line}} \times 100 \% \quad [11]$$

Dabei ist

$l_{tot,dela}$ die Gesamtlänge der Delaminierung an beiden Hirnholzflächen, in mm;

$l_{tot,glue\ line}$ die Gesamtlänge der Klebstofffugen an beiden Hirnholzflächen, in mm.

Der Höchstprozentsatz der Delaminierung einer einzelnen Klebstofffuge eines Prüfkörpers ist mit folgender Formel zu berechnen:

$$\frac{l_{max,delam}}{2l_{glueline}} \times 100 \% \quad [12]$$

Dabei ist

$l_{max,delam}$ die maximale Länge der Delaminierung einer einzelnen Klebstofffuge, in mm;

$l_{glueline}$ die Länge einer einzelnen Klebstofffuge, in mm.

7.3.2 Blockscherprüfung nach DIN EN 392

Unmittelbar vor der Blockscherprüfung wurden zwei der sechs Prüfstäbe einer der folgenden Behandlungen in Anlehnung an DIN EN 302-1 unterzogen:

- A1 – ohne weitere Konditionierung
- A2 – 4 Tage untergetaucht in Wasser bei $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, geprüft in feuchtem Zustand
- A4 – 6 h in kochendem Wasser, 2 h untergetaucht in Wasser bei $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$, geprüft in feuchtem Zustand

Die Blockscherprüfungen wurden nach den entsprechenden Behandlungen unter Verwendung einer Universalprüfmaschine (Zwick Z 600, Fa. Zwick Roell) mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 m/min durchgeführt. In der Prüfvorrichtung (s. Abbildung 58) wurde der Prüfkörper so eingesetzt, dass die Prüflast an der Klebfuge parallel zur Fasserrichtung wirkt. Je Prüfkörper ergaben sich fünf Scherflächen. Als Beurteilungskriterien dienten die Scherfestigkeit und der Holzbruchanteil. Die Scherfestigkeit wurde aus der Bruchlast F_{\max} und der Querschnittsfläche A des Prüfkörpers wie folgt berechnet:

$$\frac{F_{\max}}{A} \quad \text{in N/mm}^2 \quad [13]$$

Der Anteil der Holzbruch wurde auf die nächsten 5 % gerundet.

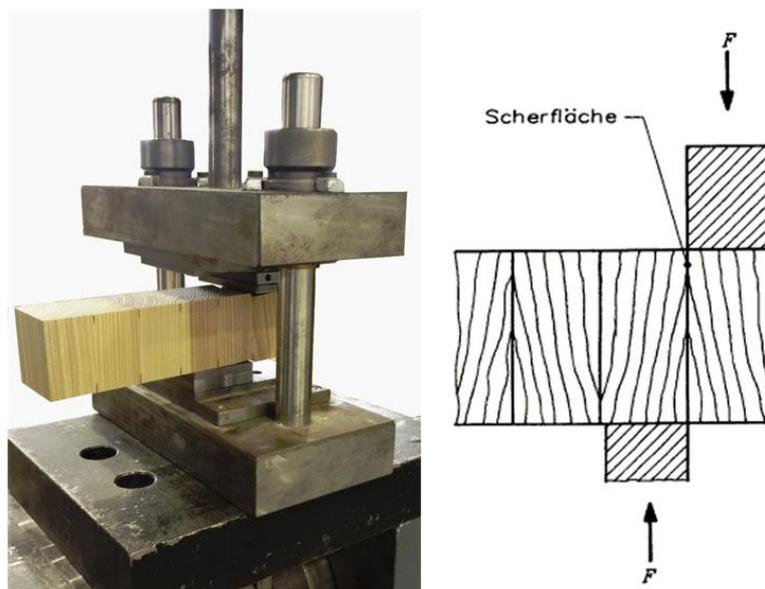


Abbildung 58: Prüfvorrichtung (links) und schematische Darstellung der Blockscherprüfung (rechts, DIN EN 392)

7.3.3 Mikroskopische Untersuchungen

Die mikroskopische Untersuchung erfolgte mit einem Auflichtmikroskop (MZ FLIII, Fa. Leica) an den Stirnflächen der Scheiben mit den Querschnitten der Versuchsträger.

Zur Bestimmung der Klebstofffugendicke wurden, wie in Abbildung 59 dargestellt, aus jeder Scheibe zwei Streifen mit jeweils der obersten oder untersten Klebfuge geschnitten. Um eine optimale Bildschärfe zu erreichen, wurden die Oberflächen der Streifen mit Schleifpapiern bis Körnung 320 sehr fein geschliffen.

Für jede Klebfuge wurden vier Messpunkten gewählt. Nämlich die Stellen, die jeweils 10 und 50 mm von den linken und rechten Enden der Klebfuge entfernt sind. An jedem Messpunkt wurden drei Messwerte mit Hilfe des Imageanalysesystems (Application Suite 4.1.0, Fa. Leica) abgelesen. Die mittleren Klebstofffugendicken wurden ermittelt.

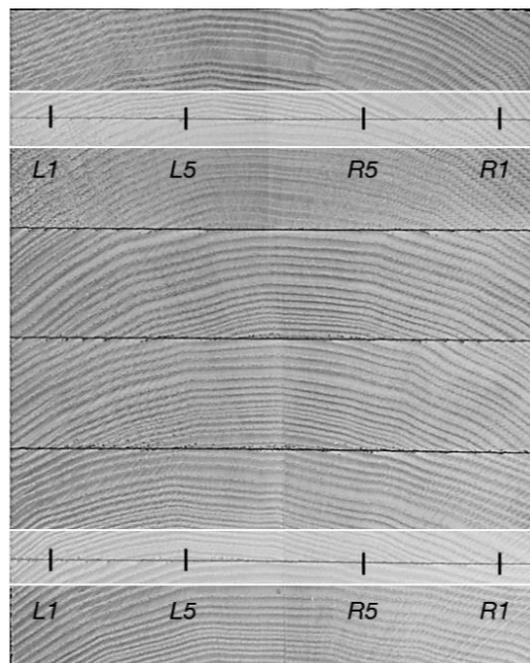


Abbildung 59: Querschnitt des Versuchsträgers

7.4 Ergebnisse

7.4.1 Beurteilungskriterien nach DIN EN 386

Kriterien zur Beurteilung der Klebstofffugengüte sind u. a. in der DIN EN 386 angegeben, welche die Mindestanforderungen an die Bestandteile von Bauteilen aus Brettschichtholz festlegt. Dort sind die Leistungsanforderungen hinsichtlich der Delaminierungsbeständigkeit, Scherfestigkeit und des Holzbruchanteils vorgeschrieben.

Bei der Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A muss

- der Gesamtprozentsatz der Delaminierung jedes Prüfkörpers geringer sein als 5 %.

Bei der Blockscherprüfung nach DIN EN 392

- muss die Scherfestigkeit jeder Klebstoffuge mindestens $6,0 \text{ N/mm}^2$ betragen;
- darf der durchschnittliche Holzbruchanteil in einem Probekörper die in der Tabelle angegebenen Werte nicht unterschreiten.

Tabelle 14: Mindestfaserbruchanteile bezogen auf die Scherfestigkeit f_v (DIN EN 386)

| | Durchschnittswerte | |
|--|--------------------|---------------|
| Scherfestigkeit f_v in N/mm^2 | $f_v \leq 11$ | $f_v \geq 11$ |
| Mindestholzbruchanteil in % | $144 - (9 f_v)$ | 45 |

7.4.2 Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A

Die sämtlichen Ergebnisse der Delaminierungsprüfung sind Anlage 13 zu entnehmen.

Abbildung 60 gibt einen Überblick über die Beständigkeit einzelner Klebstoffverbindungen gegen Delaminierung. Die Ergebnisse der Versuchsreihe mit „frisch gehobelten Holzoberflächen“ werden zusammengestellt.

Die mit den vier unterschiedlichen Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen verhielten sich bei den Delaminierungsprüfungen sehr unterschiedlich. Die besten Ergebnisse wurden vom PRF-Klebstoff erzielt. Mit einer gesamten Delaminierung von geringer als 5 % zeigten die Kombinationen vom PRF-Klebstoff mit allen vier Holzarten hervorragende Leistung gegen Delaminierung. Unter Verwendung vom MUF-Klebstoff wurde ebenfalls ausreichende Delaminierungsbeständigkeit bei der Verklebung beider Nadelholzarten Lärche und Fichte erzielt. Hinsichtlich der EPI- und PUR-Klebstoffe wiesen lediglich die mit dem Fichtenholz hergestellten Klebeverbindungen eine Delaminierung unter 5 % auf.

Alle anderen Holzart-Klebstoff-Kombinationen hatten die Prüfung nicht bestanden. Hohe Delaminierungswerte von sogar mehr als 80 % wurden bei der Verklebung von den beiden Laubholzarten mit PUR-Klebstoff erhalten

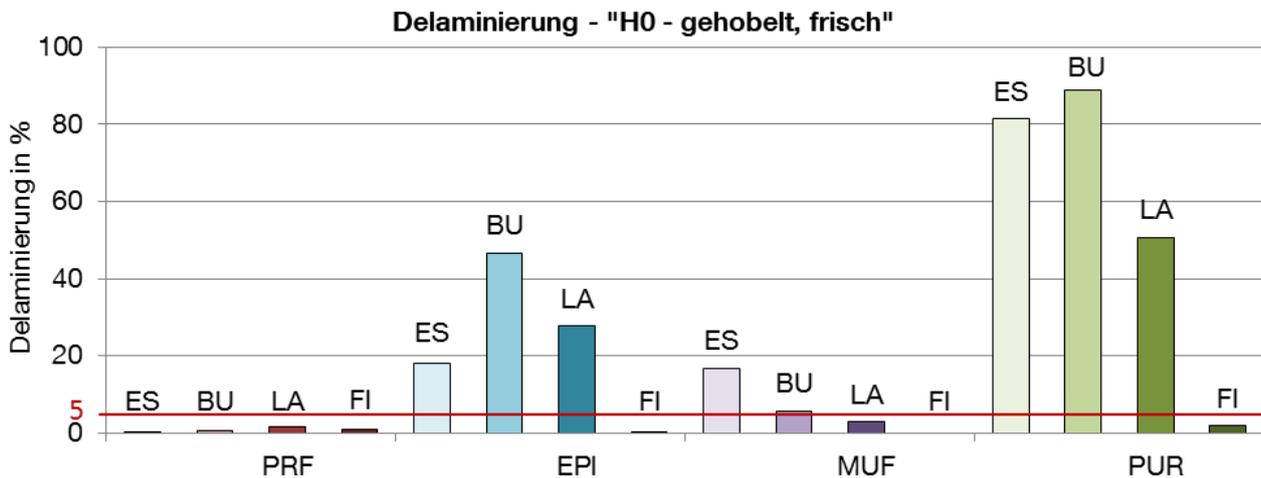


Abbildung 60: Mittlere Delaminierung der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper

In Abbildung 61 werden die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung in Abhängigkeit von den Holzarten und verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten graphisch dargestellt.

Ausreichende Beständigkeit gegen Delaminierung wurde vor allem von den Klebeverbindungen aus Fichtenholz aufgewiesen. Aufgrund der hervorragenden Verklebbarkeit von Fichte wurde die Delaminierungsbeständigkeit der damit hergestellten Verklebungen kaum von der Beschaffenheit der Holzoberflächen beeinflusst. Daher wurde kein weiterer Versuch bezüglich des Einflusses des Oberflächenalters mit Fichtenholz durchgeführt.

Das Schleifen stellte bei den meisten Klebeverbindungen eine negative Auswirkung dar. Beispielsweise wurden die Delaminierungswerte bei dem mit dem EPI-Klebstoff verklebten Esche-, Buche- und Lärchenholz um 30 bis 60 % erhöht. Die einzige Ausnahme bildete der PUR-Klebstoff mit den beiden Laubholzarten. Durch das Schleifen wurden die gesamte Delaminierung der mit Eschen- und Buchenholz hergestellten Verklebungen von über 80 % auf 30 % und 55 % reduziert.

Eine leichte Herabsetzung der Delaminierungsbeständigkeit resultiert aus der Oberflächenalterung wurde vor allem bei der Verwendung von PRF und MUF-Klebstoffen beobachtet. Hingegen wurden für die EPI- und PRF- Klebstoffe niedrigere Delaminierungswerte mit den vor der Verklebung 7 Tage im Normalklima gelagerten Holzoberflächen ermittelt. Die Reduzierung der Werte betrug beispielsweise bei dem mit dem PUR-Klebstoff verklebten Buchenholz knapp 30 %.

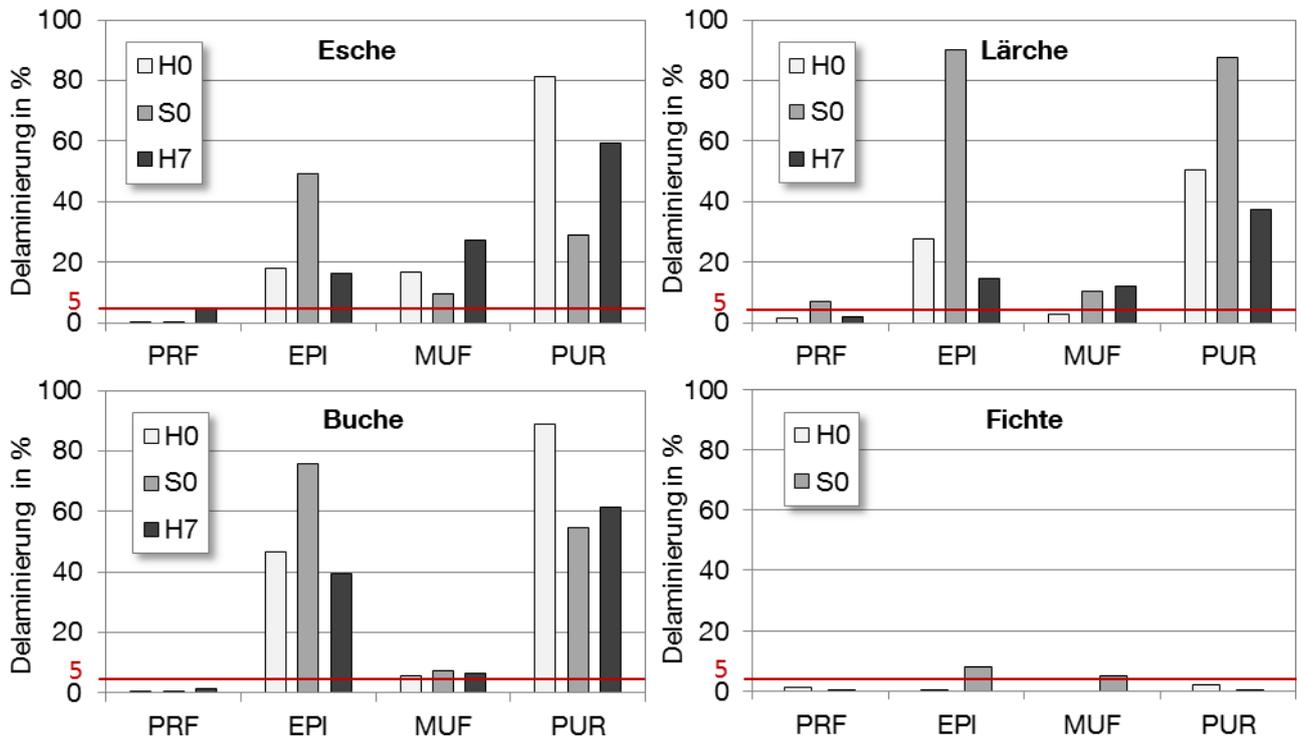


Abbildung 61: Mittlere Delaminierung der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (H0-frisch gehobelt; S0-frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)

7.4.3 Blockscherprüfung nach DIN EN 392

Die sämtlichen Ergebnisse der Blockscherprüfung sind Anlage 14 zu entnehmen.

Die mittleren Blockscherfestigkeiten der mit frisch gehobelten Holzoberflächen hergestellten Klebeverbindungen nach Behandlung A1 werden in Abbildung 62 zusammengefasst.

Die Mindestanforderung an die Scherfestigkeit der Klebstofffuge von 6 N/mm² nach DIN EN 386 wurde von allen Holzart-Klebstoffkombinationen erfüllt. Unabhängig von den verwendeten Klebstoffen wurden ähnliche Werte bei den Klebeverbindungen aus Fichten-, Lärchen und Buchenholz ermittelt. Die Scherfestigkeit der Klebstofffugen aus Buche überschreitet sogar 18 N/mm², welche das Dreifache der erforderlichen Mindestfestigkeit ist. Für die Proben aus Eschenholz wurde relativ große Streuung für die Scherfestigkeit festgelegt. Eine mögliche Ursache bestand darin, dass das Versagen von den Klebeverbindungen aus Esche häufig im porösen Frühholz stattfand. Dafür war trotz eines hohen Anteils vom Holzbruch oft niedrige Scherfestigkeit anzunehmen.

Der durchschnittliche Holzbruchanteil lag bei den Laubholzarten Esche und Buche mit Scherfestigkeiten größer als 11 N/mm² weit über den erforderlichen Wert von 45 %. Für die zwei

Nadelholzarten Fichte und Lärchen wurde ebenfalls hohen Holzbruchanteil von mehr als 70 % ermittelt.

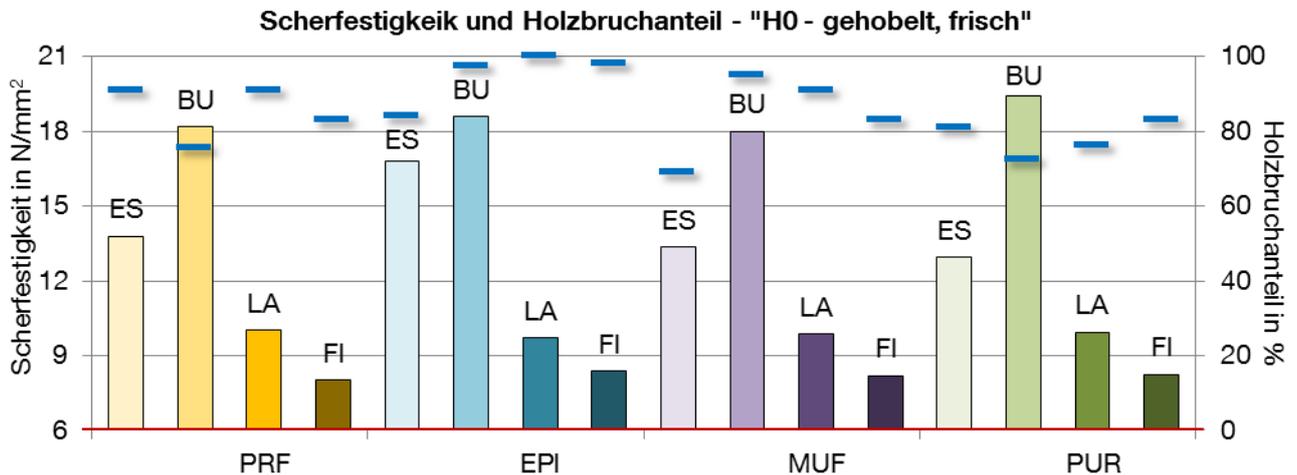


Abbildung 62: Mittlere Scherfestigkeiten (Säulen) und Holzbruchanteile (blaue Markierungen) der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper nach Behandlung A1

In Abbildung 63 werden die mittleren Blockscherfestigkeiten der mit frisch gehobelten Holzoberflächen hergestellten Klebeverbindungen nach Behandlung A2 und A4 dargestellt. Nach Stunden oder Tagen der Aussetzung gegenüber Wasser und/oder Wärme wurden die Scherfestigkeiten aller Prüfkörper stark reduziert. Zu erwähnen ist ebenfalls, dass die Differenz zwischen den mit unterschiedlichen Holzarten hergestellten Klebeverbindungen durch die Behandlungen minimiert wurde. Trotzdem wurde ausreichende Restfestigkeit von höher als 6 N/mm² für die Mehrheit der Klebefugen aus Esche und Buche aufgewiesen.

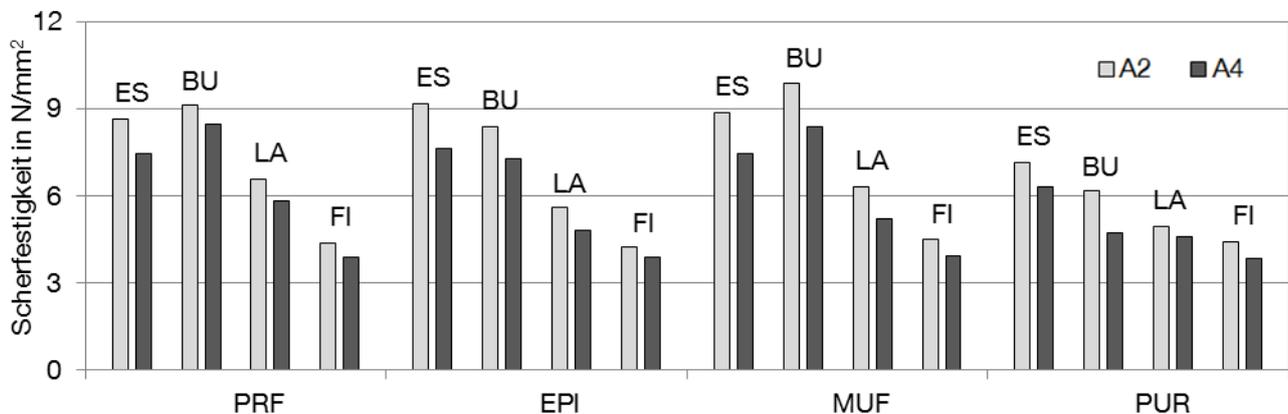


Abbildung 63. Mittlere Scherfestigkeiten der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper nach Behandlung A2 und A4

Die Scherfestigkeiten der Klebeverbindungen werden in Abbildung 64 in Abhängigkeit von den Holzarten und verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten zusammenfassend dargestellt.

Das Schleifen wirkte sich unterschiedlich auf die Verklebungen aus Laub- und Nadelholzarten aus. Bei Verwendung von PRF- MUF- und PUR-Klebstoffen wurden die Klebfugen aus Laubholzarten durch das Schleifen in unterschiedlichem Ausmaß verstärkt. Die Erhöhung der Scherfestigkeit betrug bei der Kombination vom Eschenholz mit PUR-Klebstoff mehr als 20 %. Hingegen wurden die Scherfestigkeiten der Klebeverbindung aus EPI-Klebstoff bei geschliffenen Holzoberflächen um etwa 20 % reduziert.

Bei den beiden Nadelholzarten wurden die Verklebungen unabhängig von verwendeten Klebstoffen durch das Schleifen mehr oder weniger geschwächt. Für das mit EPI-Klebstoff verklebte Lärchenholz wurde eine Reduzierung der Scherfestigkeit um 13 % festgestellt.

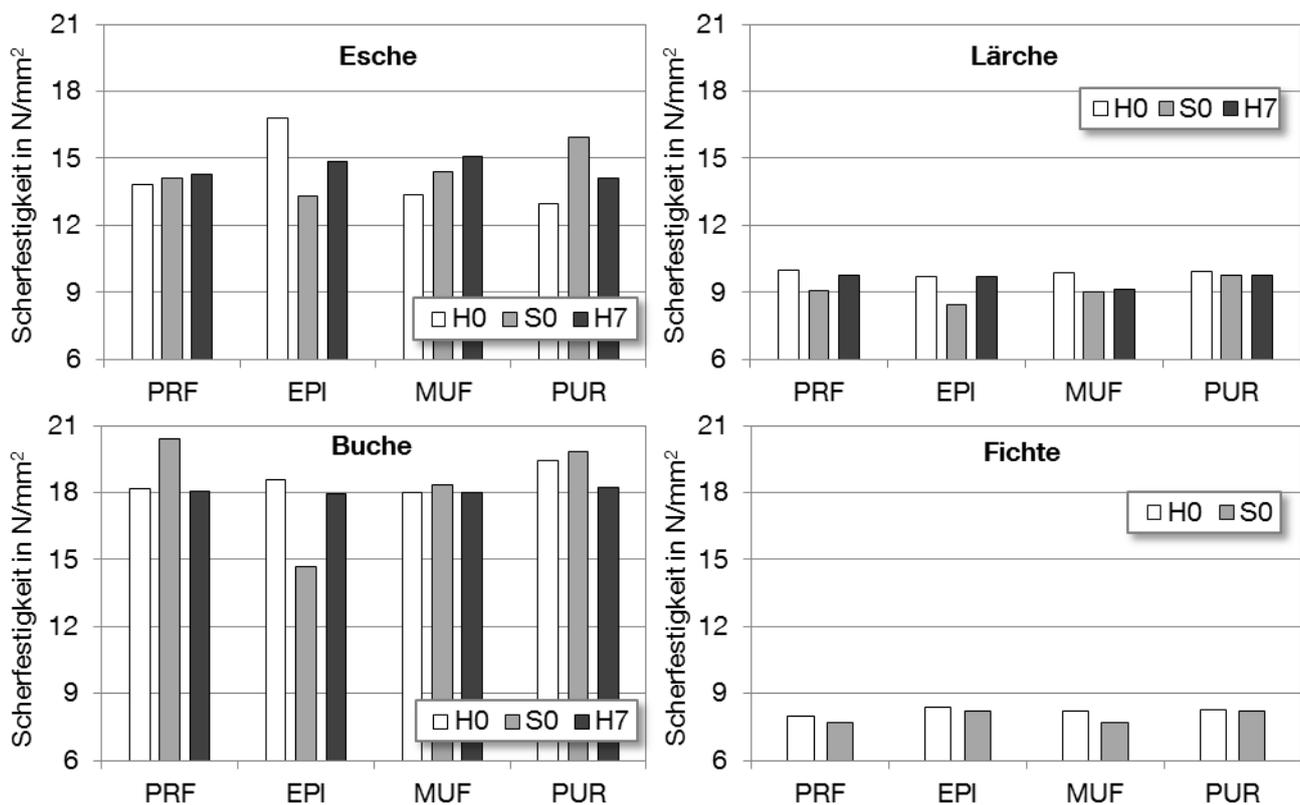


Abbildung 64: Mittlere Scherfestigkeiten der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Proben Parameterstudien (H0-frisch gehobelt; S0-frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)

7.4.4 Mikroskopische Untersuchungen

Der Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenherstellungsmethode auf die Topologie der Klebstoffugen ließ sich anhand der mikroskopischen Untersuchungen zu erkennen.

Die Klebstofffugendicken wurden mit Hilfe des Auflichtmikroskops bestimmt. Ergebnisse zeigten, dass an den gehobelten Holzoberflächen Klebstofffugen mit Dicke von 0,06 bis 0,15 mm gebildet wurden. Im Vergleich dazu wurden für alle Kombinationen von Holzart und Klebstoff dickere Klebstofffugen von bis zu 0,2 mm an den geschliffenen Holzoberflächen gemessen (s. Abbildung 65).

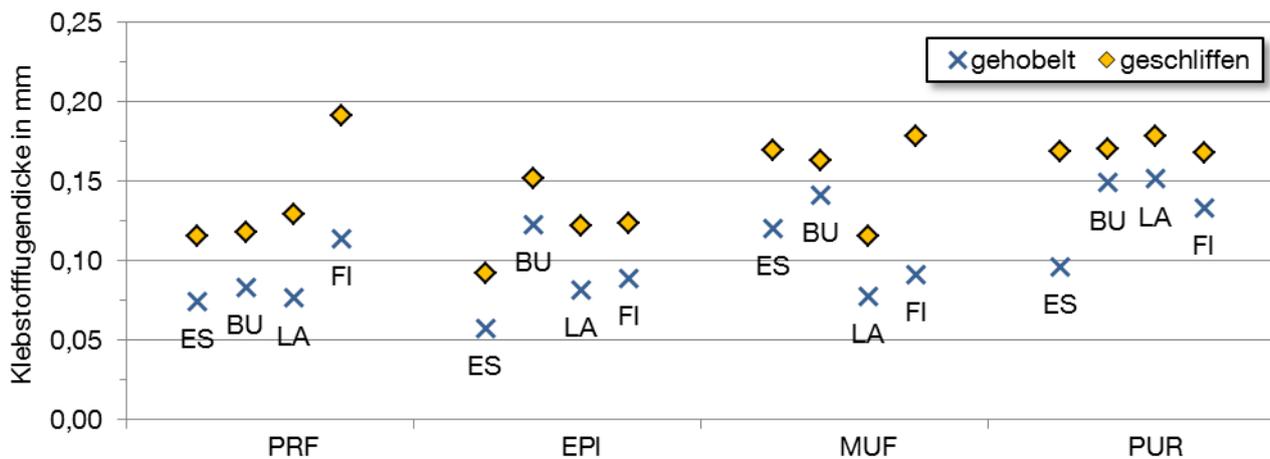


Abbildung 65: Mittlere Klebstofffugendicke der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper

Dieses Phänomen ließ sich anhand der mikroskopischen Aufnahmen der Klebstofffugen ebenfalls bestätigen.

In Abbildung 66 sind die vom PRF-Klebstoff auf den gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Lärchenholzoberflächen gebildeten Klebfugen veranschaulicht. Bei den gehobelten Oberflächen wurde eine durchschnittliche Fugendicke von 0,67 mm ermittelt. Ein tiefes und gleichmäßiges Eindringen des Klebstoffs in die Holzzellen von bis zu etwa 0,2 mm ist anzumerken. Mit den geschliffenen Oberflächen wurde hingegen dickere Klebstofffuge von 0,13 mm gebildet. Das Eindringen des Klebstoffs ist nur bis zu den ersten oder zweiten Zellenreihen zu beobachten.

In Abbildung 67 sind die vom EPI-Klebstoff auf den Lärchenholzoberflächen gebildeten Klebfugen dargestellt. Die hellen Klebfugen ermöglichten einen klaren Blick auf die oberflächennahen Holzstrukturen. Bei der genauen Beobachtung der geschliffenen Lärchenholzoberflächen waren die stark komprimierten Holzzellen besonders bemerkenswert. Im Vergleich dazu blieben die Holzgewebe der gehobelten Oberflächen unbeschädigt. Ähnliche Erscheinungsbilder waren bei den Klebeverbindungen aus Fichte auch zu finden (s. Abbildung 68).

Bei den beiden Laubholzarten Esche (s. Abbildung 70) und Buche (s. Abbildung 69) war eine Komprimierung der Holzzellen aufgrund der kompakten Anordnung der englumigen Faser optisch nicht erfassbar.

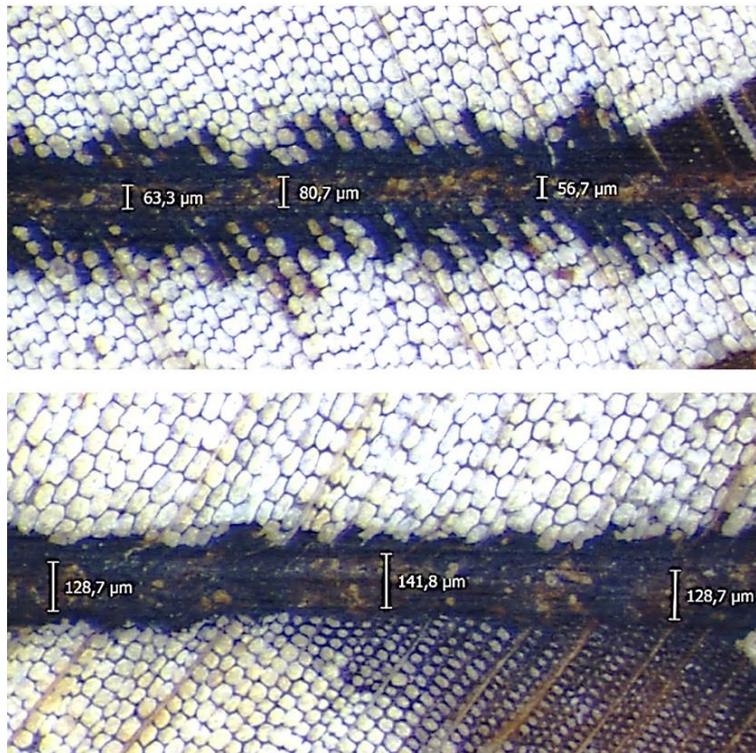


Abbildung 66: Mikroskopische Annahmen der vom PRF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Lärchenholzoberflächen geformten Klebfugen

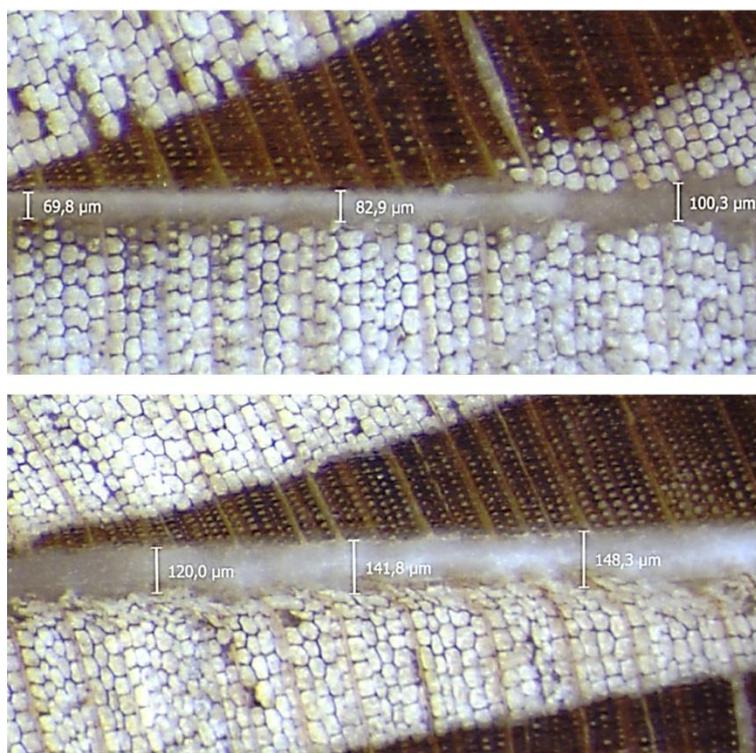


Abbildung 67: Mikroskopische Annahmen der vom EPI-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Lärchenholzoberflächen geformten Klebfugen

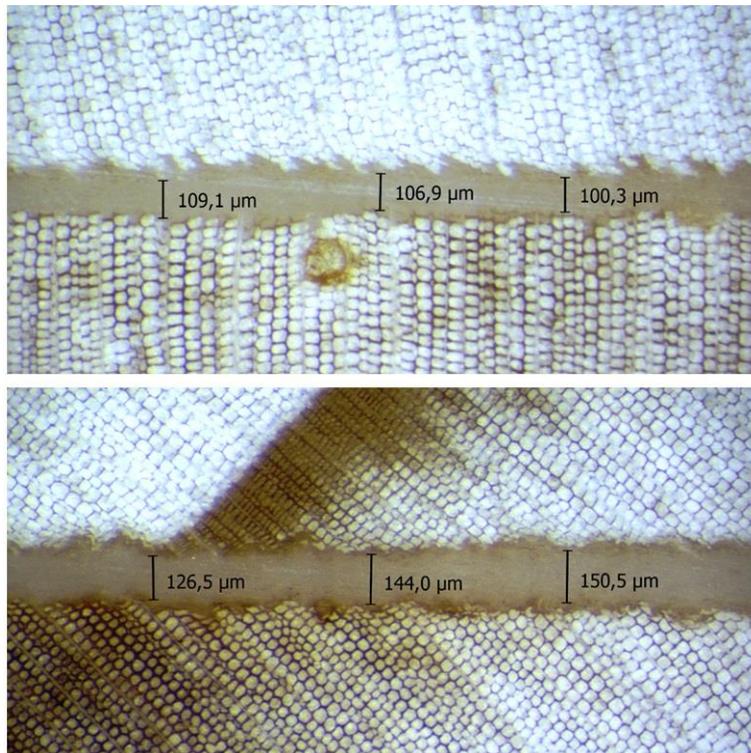


Abbildung 68: Mikroskopische Annahmen der vom MUF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Fichtenholzoberflächen geformten Klebfugen

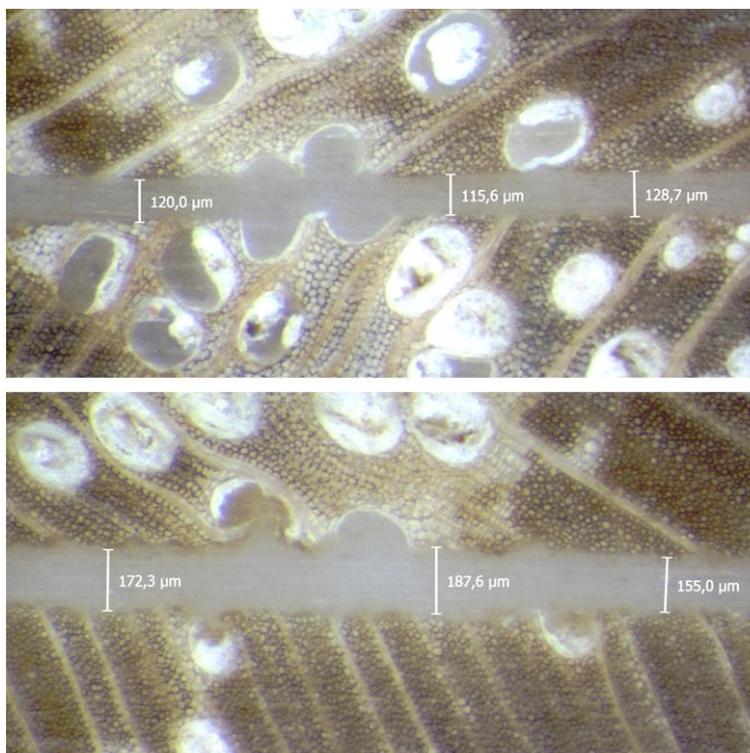


Abbildung 69: Mikroskopische Annahmen der vom MUF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Eschenholzoberflächen geformten Klebfugen

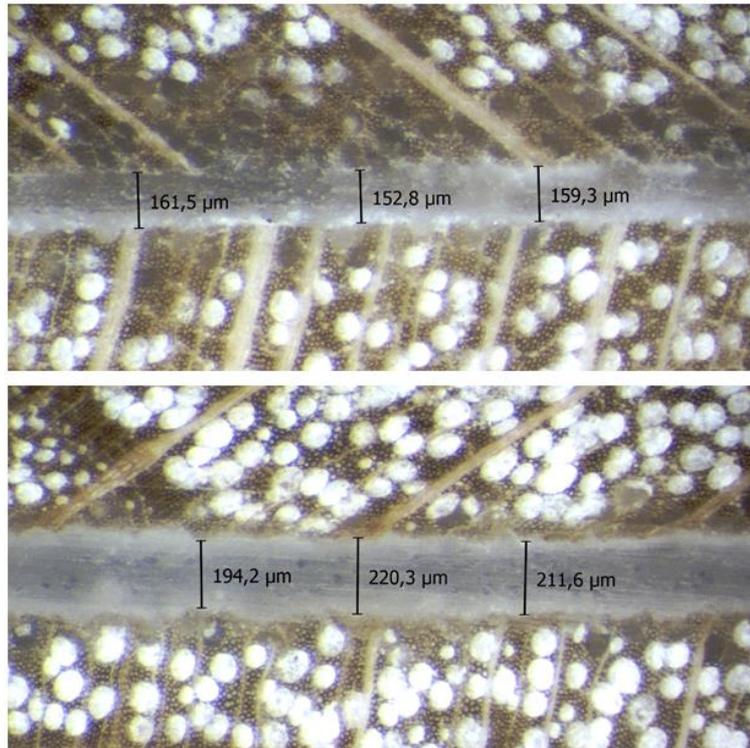


Abbildung 70: Mikroskopische Annahmen der vom PUR-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Buchenholzoberflächen geformten Klebfugen

7.5 Diskussion

Bei der industriellen Produktion von BSH wird das Hobeln soweit als standardisiertes Oberflächenbearbeitungsverfahren etabliert. Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen in AS1 zeigten, dass die Benetzbarkeit der Holzoberfläche durch das Schleifen deutlich verbessert werden konnte. Es wurde daher erwartet, die Verklebungsqualität durch die schleifende Oberflächenbehandlung zu erhöhen.

Die Holzoberflächen wurden einheitlich mit der Breitbandschleifmaschine unter einem Druck von 5 bar geschliffen. Unbenutztes, frisch ausgepacktes Schleifband der Körnung P100 wurde verwendet. Die Schleifbandgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit betragen dabei jeweils 17 m/s und 7 m/min. In einem Schliff wurde 0,2 mm abgenommen.

Es wurde allerdings anhand der Delaminierungs- und Blockscherprüfungen festgestellt, dass die im Rahmen dieses Arbeitsschrittes für den Schleifvorgang eingesetzten Verarbeitungparameter eher als ungünstig für die Verklebung von den beiden Nadelholzarten zu bezeichnen waren. Mikroskopie-basierte Untersuchungen ergaben, dass bei den Holzarten mit niedriger Rohdichte, wie Fichte und Lärche, die Holzzellen der Oberflächenschichten durch das Schleifen stark komprimiert wurden. Das Eindringen vom Klebstoff in die Holzgewebe wurde möglicherweise von den Wänden der verdichteten Zellen verhindert. Mittlerweile bildete sich eine dicke Klebstofffuge

zwischen den Holzoberflächen. Als Konsequenz der mangelnden mechanischen Verankerungen wurde eine Herabsetzung der Delaminierungsbeständigkeit und Scherfestigkeit bei fast allen Klebeverbindungen hervorgerufen.

Die mikroskopischen Untersuchungen bewiesen, dass dickere Klebstoffugen an den geschliffenen Eschen- und Buchholzoberflächen ebenfalls gemessen wurden, obwohl keine Komprimierung der Holzzellen anhand der Aufnahmen abzulesen war. Allerdings wurden die Verklebungen von den beiden Laubhölzern mit hoher Rohdichte in meisten Fällen von der schleifenden Bearbeitung begünstigt. Bei der Verwendung vom PUR-Klebstoff, welcher als Klebstoff mit geringen Eindringvermögen bekannt ist, wurden die Delaminierungswerte im Vergleich zu denen bei den gehobelten Oberflächen um 52 % (Esche) bzw. 34 % (Buche) reduziert. Weiterhin war eine Erhöhung der Scherfestigkeit der Klebfuge aus Esche von knapp 25 % zu verzeichnen. Auch mit den PRF- und MUF-Klebstoffen mit relativ guten Eindringvermögen wurden belastbarere Klebeverbindungen mit den geschliffenen Holzoberflächen erzielt. Es gab jedoch auch Ausnahme. Beim Einsatz vom EPI-Klebstoff wurden die damit hergestellten Klebeverbindungen durch das Schleifen stark beeinträchtigt. Die Senkung der Delaminierungsbeständigkeit und Scherfestigkeit lagen bei den beiden Holzarten jeweils 30 und 20 %.

Eine kurze Zeitspanne zwischen der Herstellung frischer Oberfläche und Verklebung schien lediglich bei der Verklebung der inhaltsstoffreichen Holzarten mit den PRF und MUF-Klebstoffen eine Bedeutung zu haben. Die Verklebung von den Holzoberflächen, die nach der Herstellung 7 Tage in Normalklima gelagert wurden, führte zu einer geringeren Beständigkeit der Klebfuge gegen Delaminierung. Es war jedoch kein Abfall in der Scherfestigkeit gegeben.

Bei den mit den EPI- und PUR-Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen erwies sich die lange Zeitspanne zwischen der Oberflächenherstellung und Verklebung als wünschenswert. Ergebnisse der Delaminierungsprüfung belegten, dass nicht nur die inhaltsstoffarme Buche, sondern auch die inhaltsstoffreichen Esche und Lärche von einer möglichen Oxidation der Holzoberfläche und Anreicherung der Holzinhaltstoffen während der 7-tägigen Lagerung begünstigt wurden. Die Scherfestigkeiten der Klebeverbindungen wurden wenig vom Alter der Holzoberflächen betroffen. Unter diesen Umständen kann man davon ausgehen, dass während der Verklebung mit den EPI- und PUR-Klebstoffen die zeitliche Beschränkung von nicht länger als 24 h und sogar 6 h für harzreiche Holzarten überschritten werden darf. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die bereits hergestellten Holzoberflächen bei sorgfältiger Aufbewahrung vor Wiederverschmutzung jeder Art geschützt werden sollen.

8 Arbeitsschritt 4: Leistungstests an Kleinträgern

8.1 Allgemeines

Der Einfluss von Dauerstandversuchen auf die Güte der Verklebungen wurde anhand von Leistungstests an Kleinträgern beurteilt. Eine mögliche Korrelation mit den Kurzzeittests wurde dargestellt.

8.2 Herstellung BSH-Träger

Hierzu wurden BSH-Träger der Abmessung 80 x 120 x 1650 mm (B x H x L) (4 Lamellen à 30 mm) aus den Holzarten Esche, Buche und Lärche in Industrieanlagen hergestellt. Neben unbehandeltem Buchenholz wurde gedämpftes Buchenholz ebenfalls berücksichtigt. Im konstruktiven Holzbau wird Buchenholz immer gedämpft eingesetzt. Das Dämpfen von Holz kann zur einen möglichen Verbesserung der Formstabilität und der Dauerhaftigkeit wie auch der Verarbeitbarkeit führen (Riehl, Welling u. Frühwald 2002). Für jede Kombination von Holzart und Klebstoffsystem wurden neun Träger angefertigt. Für die Kurzzeit- und Dauerlastversuche (klimagesteuert und freibewittert) standen für jeden Versuch drei Träger zur Verfügung.

Nadelholzlamellen der Sortierklasse S13 und Laubholzlamellen der Sortierklasse LS13 wurden für die Herstellung der Träger genutzt. Die hohe Anforderung an die Beschaffenheit der Lamellen sollte zu hohen Holzfestigkeiten bei geringer Streubreite führen. Dadurch wurde die Qualität des BSH-Trägers umso mehr von der Güte der Verklebung bestimmt.

Das Einhalten der im AS 3 verwendeten Verklebungsparameter (s. Tabelle 13) war bei der Herstellung in Industrieanlagen nur bedingt möglich (s. Tabelle 15). Die offene Wartezeit wurde bei allen Klebstoffen sehr kurz gehalten (< 1 min). Die relativ große Anzahl an Lamellen führte dazu, dass bei der Herstellung der ersten und letzten Klebfugen eine zeitliche Differenz von 10 bis 15 min hinsichtlich der tatsächlichen geschlossenen Wartezeiten bestand. Infolge des Nichtvorhandenseins von entsprechender Auftragsmaschine erfolgte das Auftragen des PUR-Klebstoffs manuell mit Spachtel.

Tabelle 15: Verklebungsparameter zur Herstellung Kleinträger

| Klebstoffsysteme | PRF | EPI | MUF | PUR |
|---|------------|--------|--------|-----|
| Mischungsverhältnis Harz zu Härter (Gew.-%) | 100:20 | 100:15 | 100:50 | - |
| Auftragsmenge in g/m ² | 460 | 400 | 400 | 400 |
| Offene Wartezeit in min | < 1 | < 1 | < 1 | < 5 |
| Geschlossene Wartezeit in min | 22-13 | 17-10 | 30-17 | 5 |
| Presszeit | Über Nacht | | | |

8.3 Versuchsdurchführung

8.3.1 Kurzzeitversuche

Nach Lagerung im Normalklima wurden von jeder Holzart-Klebstoffkombination drei Träger in einem Vier-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 408 getestet (s. Abbildung 71). Die Last wurde mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht, die so eingestellt wurde, dass die Höchstlast innerhalb von (300 ± 120) s erreicht wurde. Die Biegespannungen zum Zeitpunkt des Versagens wurden nach folgender Gleichung ermittelt und dienten als Referenzwerte für die weiteren last- und klimabeanspruchten Versuchsträger:

$$\text{Biegespannung } \sigma = \frac{\frac{F_{\text{Bruch}}}{2} \times \frac{L_{\text{Gesamt}}}{3}}{\frac{B \times H^2}{6}} = \frac{F_{\text{Bruch}} \times L_{\text{Gesamt}}}{B \times H^2} \quad \text{in N/mm}^2 \quad [14]$$

Vor Ermittlung der Bruchlast wurden bei allen Versuchsträgern mehrere Proben entnommen (s. Abbildung 71) und in Anlehnung an die DIN EN 391 und DIN EN 392 geprüft. Je Träger wurden zwei Prüfstäbe mit einem Querschnitt von 50 x 50 mm und allen drei Klebfugen nahe den ursprünglichen Trägerenden für die Scherprüfung nach DIN EN 392 abgeschnitten. Die Entnahme des Prüfkörpers für die Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391 erfolgte im Anschluss.

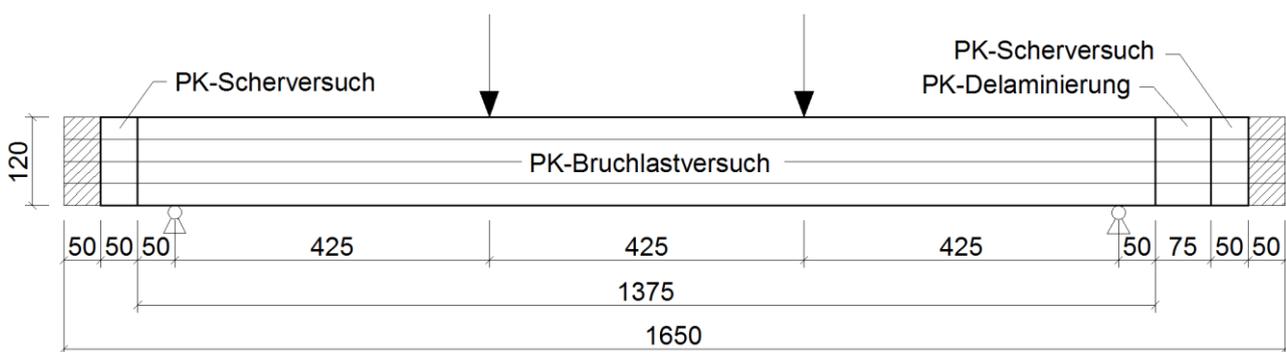


Abbildung 71: Bruchlastversuch mit Kleinträger, Abmessung in mm

8.3.2 Dauerlastversuche

Bei den Dauerlastversuchen wurden drei Träger je Holzart-Klebstoffkombination in einer speziell dafür konstruierten Versuchsvorrichtung (s. Abbildung 72) durch Vier-Punkt-Biegung beansprucht und einem Klimazyklus mit zwei Wiederholungen ausgesetzt.

Die speziell für die Dauerlastversuche konstruierte Versuchsvorrichtung ermöglichte die senkrechte Anordnung von 12 BSH-Trägern. Die Dauerlasten wurden in den Drittelpunkten in der Spannweite von 1550 mm symmetrisch aufgebracht (s. Abbildung 73). Der Lastwert wurde der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Holzart angepasst. Die Höhe der Einzellasten basierte auf einer 60 %igen Auslastung der in DIN 1052 angegebenen charakteristischen Biegefestigkeit und betrug beim Lärchenholz 6 kN, Buche und Esche 7 kN. Die Auflagerbreite betrug 50 mm.



Abbildung 72: Versuchsvorrichtung Dauerlastversuche

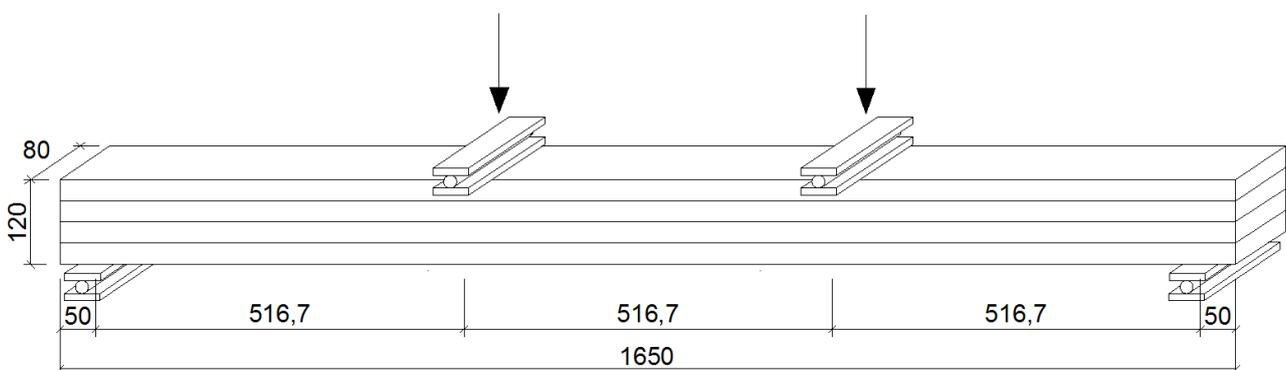


Abbildung 73: Kleinträger im Dauerlastversuch, Abmessung in mm

Die Feuchtigkeits- und Klimawechsel wurden in einer Klimakammer gesteuert. Der Klimazyklus wurden in Anlehnung an DIN EN 15416-3 gewählt und setzte sich aus zwei Stufen zusammen: 20 °C/85 %rF bzw. 45 °C/40 %rF. Die zu erwartende Holzfeuchtigkeit sollte minimal ca. 7 % und maximal ca. 18 % betragen. Die Stirnflächen der Träger wurden versiegelt, um einen möglichst gleichmäßigen Holzfeuchteverlauf über die Trägerlänge zu erreichen. Über die gesamte Laufzeit der Dauerlastversuche wurden der Zustand der Klebfugen und die Holzfeuchte dokumentiert. Für das Überwachen der Holzfeuchte wurden beim Aufbau des Versuchsstandes Messelektroden in die äußersten Lamellen der BSH-Träger einschlagen. Die Holzfeuchte wurde in eine Tiefe von 1,5 cm wurde gemessen.

Die Versuche begannen mit der Klimastufe 20 °C/85 %rF. Die gewünschte Holzfeuchte von 18 % wurde allerdings erst nach sechs Wochen annähernd erreicht. Angesichts der langsamen Wasseraufnahme und -abgabe wurde im ersten Klimazyklus das Klima solange gehalten bis die gewünschten maximale/minimale Holzfeuchten erreicht wurden. Beim zweiten Zyklus betrug dann die Dauer jeder Klimastufe zwei Wochen, wie auch im Forschungsantrag formuliert.

Nach der Beendigung der Klima- und Dauerlastbeanspruchung wurde die Resttragfähigkeit der Kleinträger im Vier-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 408 ermittelt. Vor Ermittlung der Bruchlast wurden, wie im Abschnitt 8.3.1 beschrieben, je Träger mehrere Probekörper für die Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391 und Blockscherprüfung nach DIN EN 392, Verfahren A entnommen und geprüft (s. Abschnitt 7.3).

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Rissanalyse

Während der gesamten Laufzeit der Dauerstandversuche wurde der Zustand der Klebfugen an den Seitenflächen der Kleinträger dokumentiert.

In Abbildung 74 werden die unmittelbar vor der Beendigung der Dauerlastversuche erfassten Längen und Tiefen der in bzw. entlang der Klebfugen gebildeten Risse in Abhängigkeit von den verwendeten Holzarten und Klebstoffen dargestellt. Jede Markierung in der Abbildung repräsentiert einen aufgrund der Klimabeanspruchung entstanden Riss. Dabei werden die Risse in acht Tiefenstufe untergeteilt. Diejenigen mit geringeren Tiefen und kürzeren Längen befinden sich in den vorderen Positionen auf der horizontalen Achse bzw. niedrigeren Positionen auf der vertikalen Achse.

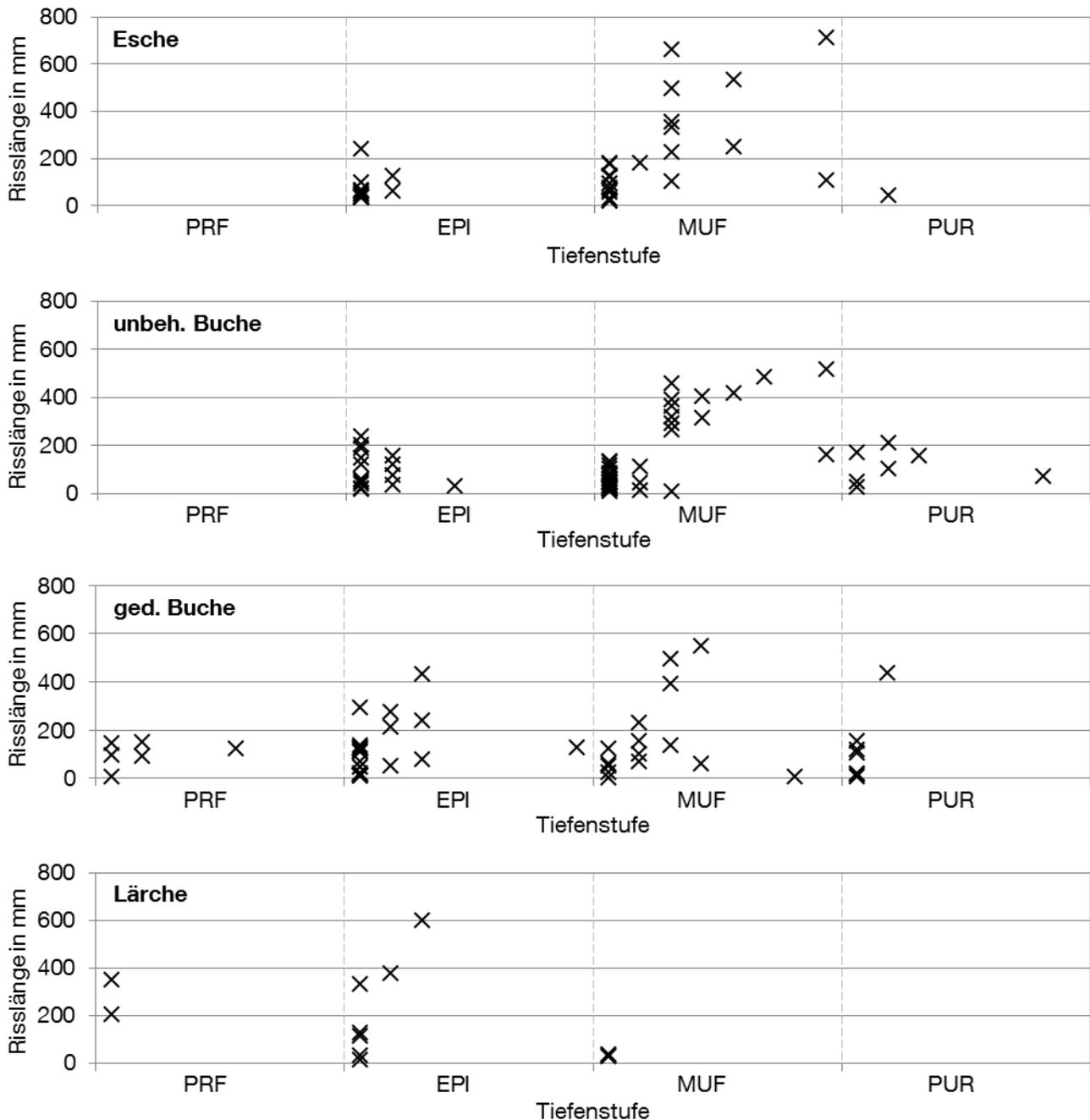


Abbildung 74: Zusammenfassung der in/entlang der Klebfugen gebildeten Risse (Tiefenstufe links nach rechts: < 10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm usw. bis 70-80 mm)

Bei den Kleinträgern aus Laubholz wurde die Mehrheit der Risse in bzw. entlang der mit dem MUF-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen festgestellt. Schmale Risse mit einer Tiefe von geringer als 20 mm und Länge von bis zu 200 mm verteilen sich über die gesamte Länge der Klebfugen. An vielen Stellen weiteten sich die Risse unterschiedlicher Längen sogar in eine Tiefe bis zu mehr als die Hälfte der gesamten Breite der BSH-Träger. In den Extremfällen war ein

Durchreißen der Klebfugen zwischen zweiter und dritter Holzlamelle zu beobachten. Die Risse in bzw. entlang der mit dem EPI-Klebstoff gebildeten Klebfugen beschränkten sich auf eine Tiefe unter 30 mm und Länge von etwa 400 mm (s. Abbildung 74). Die Anzahl der Risse war im Vergleich zum MUF-Klebstoff deutlich geringer. In den mit dem PUR-Klebstoff hergestellten Klebfugen waren relativ feine Risse mit niedriger Tiefe vereinzelt in den Trägern aus Buchenholz zu finden. Bei der Verwendung des PRF-Klebstoffs war eine geringere Anzahl an Rissen feststellbar. Zwischen den Klebeverbindungen aus unbehandelten und gedämpften Buchenhölzern ließ sich anhand der Rissanalyse kein großer Unterschied feststellen. Bei den Trägern aus dem Nadelholz Lärche war keine starke Rissbildung erkennbar.

Der weitere Einfluss der Rissbildung wird in den anschließenden Kapiteln zu den Vier-Punkt-Biegeversuchen, Delaminierungs- und Blockscherprüfungen näher betrachtet.

8.4.2 Vier-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an DIN EN 408

Die aus der Bruchlast errechneten Biegespannungen (s. Gl. [14]) zum Zeitpunkt des Versagens werden in Abbildung 75 in Abhängigkeit von den verschiedenen Holzarten nach der Lagerung im Normalklima (NK) und nach der dauerhaften Lasteinwirkung im Wechselklima (WK) dargestellt. Sämtliche Ergebnisse sind zudem Anlage 15 zu entnehmen.

Die Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche belegten, dass die ermittelten Biegespannungen zum Zeitpunkt des Versagens von dem Zustand der Klebefugen stark abhängig waren. Bei starken Rissbildungen in bzw. entlang der Klebefugen fanden die Brüche vorwiegend in den Klebfugen bei vergleichsweise niedrigen Bruchlasten statt. Als Beispiel für diesen Versagensmechanismus sind die mit dem MUF-Klebstoff hergestellten Kleinträger aus den Laubholzarten zu nennen.

In den Fällen, bei denen die Klebfugen offenbar kaum oder nur wenig von den Klima- und Dauerlastbeanspruchungen beeinträchtigt wurden, erfolgte das Versagen in den unteren, stark zugbeanspruchten Holzlamellen. Hier ließen sich vergleichsweise hohe Bruchlasten und Biegespannungen ermitteln. Dieses ließ sich vor allem bei den mit dem PRF-Klebstoff hergestellten Trägern beobachten.

Die gemittelten Biegespannungen der mit dem PRF-Klebstoff hergestellten Träger aus Esche lagen bei rund 110 N/mm^2 . Vergleichbare Werte wurden mit den EPI- und PUR-Klebstoffen erreicht. Hier waren die Einflüsse der Dauerlastversuche und der dadurch entstandenen relativ feinen Risse vernachlässigbar. Geringere Biegespannungen wurden für die mit dem MUF-Klebstoff hergestellten Träger ermittelt. Zum Zeitpunkt des Versagens herrschte in den im Normalklima gelagerten Trägern eine gemittelte Biegespannung von ca. 85 N/mm^2 . Dort fanden die Brüche zum großen Teil in den Klebstofffugen statt. Unter Einwirkung von Dauerlast- und

Klimabeanspruchungen wurde die Belastbarkeit der Träger offenbar durch die Rissbildungen der Klebeverbindungen merklich reduziert.

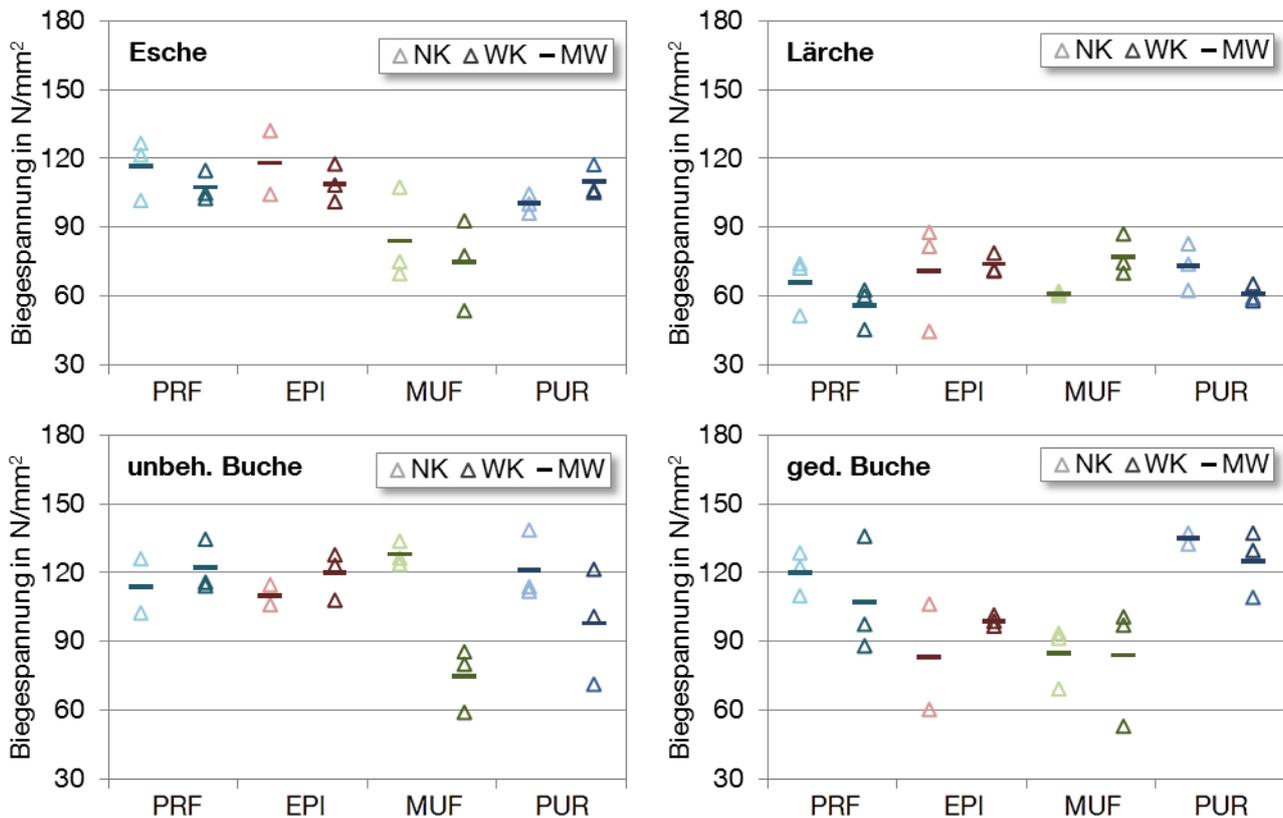


Abbildung 75: Die zum Zeitpunkt des Versagens herrschenden Biegespannungen in den Kleinträgern (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)

Bei den mit den PRF- und EPI-Klebstoffen hergestellten Kleinträgern aus unbehandelter Buche herrschten zum Zeitpunkt des Versagens Biegespannungen von ca. 120 N/mm². Vergleichbare Werte wurden für die unter Verwendung von MUF- und PUR-Klebstoffen hergestellten Träger ermittelt, die nach der Herstellung lediglich im Normalklima gelagert wurden. Hingegen ließ sich für die im Wechselklima dauerbelasteten Träger eine niedrigere Bruchlast feststellen. Zwischen den Werten lag eine relativ große Streuung. Dieses ließ sich wiederum auf die starke Rissbildung in den Klebstoffugen infolge der Klimabeanspruchungen zurückführen.

Bei den mit PRF- und PUR-Klebstoffen hergestellten Trägern aus gedämpfter Buche herrschten zum Zeitpunkt des Versagens hohe Biegespannungen von ebenfalls rund 120 N/mm². Auffällig war die hohe Streuung der Werte der Dauerlastversuche. Beim Einsatz von EPI- und MUF-Klebstoffen wiesen die Träger vorwiegend ein Versagen in den Klebstoffugen auf. Es ergaben sich wesentlich geringere Biegespannungen von ca. 90 N/mm² mit einer hohen Streubreite.

Für die Kleinträger aus Lärche wurde eine mittlere Biegespannung von ca. 65 N/mm² ermittelt. Zwischen den mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen ließ sich kein großer Unterschied feststellen. Der Einfluss der Dauerstandversuche war ebenfalls kaum zu erkennen.

8.4.3 Delaminierungsprüfung nach DIN EN 391, Verfahren A

Die Delaminierungsbeständigkeit der im AS 3 Parameterstudien unter Laborbedingungen und im AS 4 mit Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen werden in Abbildung 76 einander gegenübergestellt. Sämtliche Ergebnisse der Delaminierungsprüfungen im AS 4 sind zudem Anlage 16 zu entnehmen.

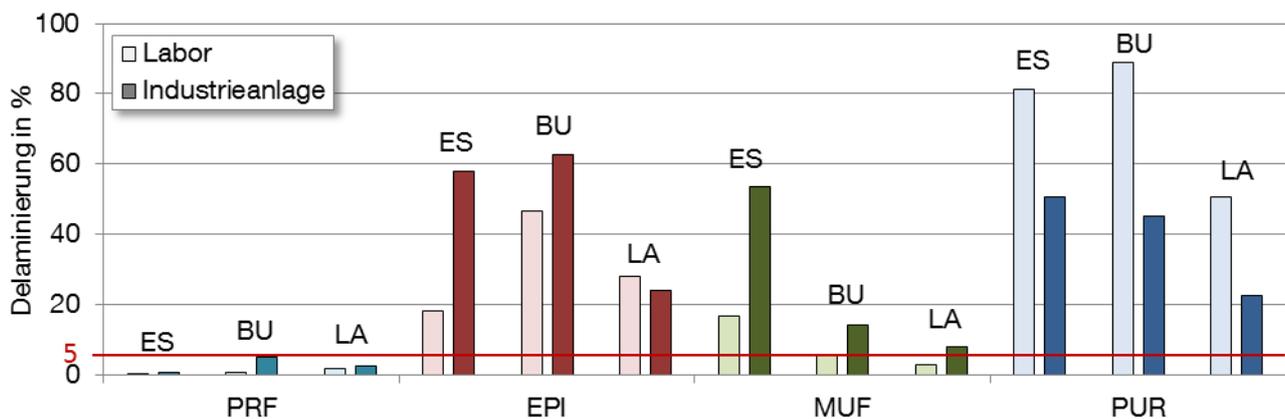


Abbildung 76: Gegenüberstellung der Delaminierungsbeständigkeit der unter Laborbedingungen und in Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen

Im Vergleich zu den im AS 3 unter Laborbedingungen gewonnenen Ergebnissen zeigten die unter Verwendung von EPI- und MUF-Klebstoffen in einer Industrieanlage hergestellten Klebeverbindungen durchschnittlich höhere Delaminierung. Bei der Kombination von PRF-Klebstoff mit Buchenholz wurde ebenfalls ein höherer durchschnittlicher Delaminierungswert für die mit einer Industrieanlage hergestellten Klebeverbindungen ermittelt, welcher genau an dem nach DIN EN 386 zulässigen 5 %-Grenzwert lag.

Des Weiteren war festzustellen, dass die unter Verwendung vom PUR-Klebstoff in einer Industrieanlage hergestellten Klebeverbindungen eine höhere Beständigkeit gegen Delaminierung aufwiesen. Obwohl die dabei ermittelten Werte weit über die zulässige maximale Delaminierung von 5 % lagen, war eine Reduzierung von 30 bis 40 % gegenüber denen der unter Laborbedingungen hergestellten Klebeverbindungen zu erkennen.

In Abbildung 77 werden die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung in Abhängigkeit von den verschiedenen Holzarten dargestellt. Die Delaminierungsbeständigkeit der mit einer Industrieanlage hergestellten Klebeverbindungen nach einer konstanten Lagerung im Normalklima (NK) und Dauerlastbeanspruchung im Wechselklima (WK) werden gegenübergestellt.

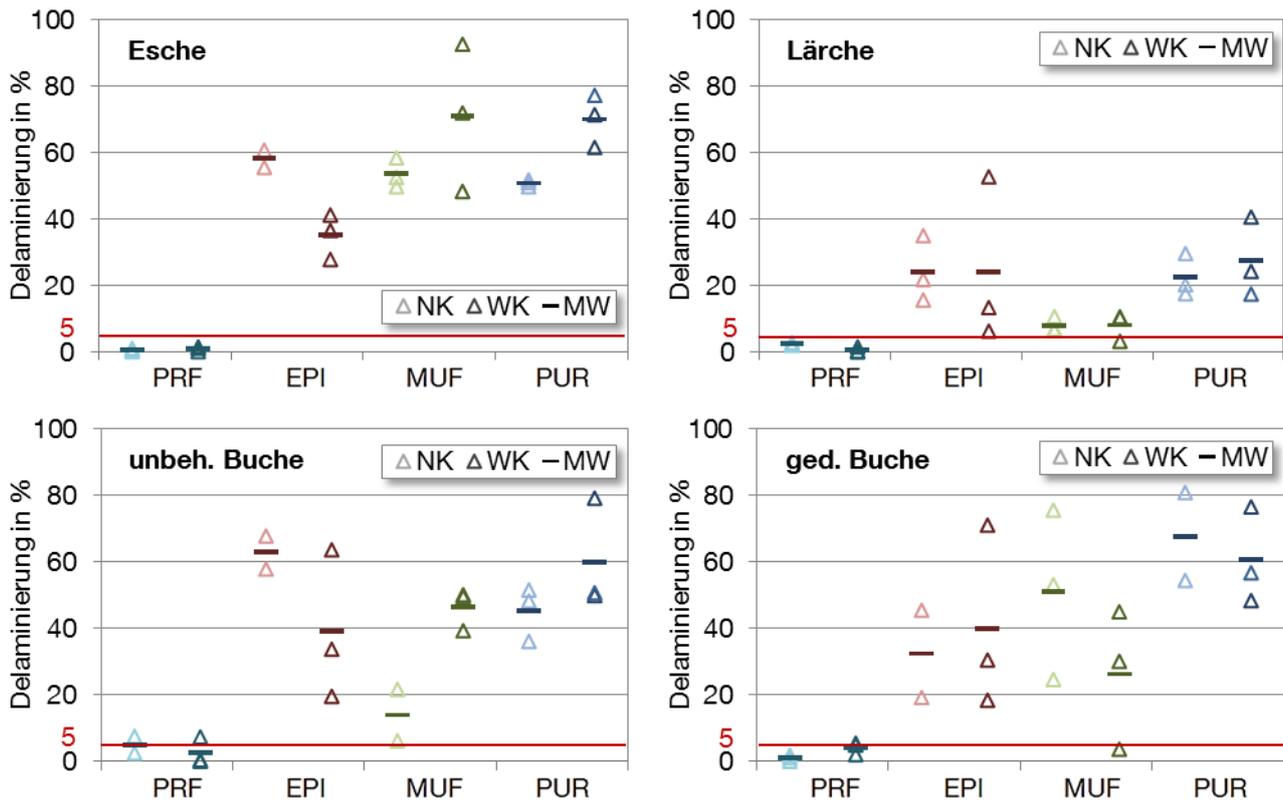


Abbildung 77: Mittlere Delaminierung der mit verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)

Der Einfluss der Dauerstandversuche auf die Delaminierungsbeständigkeit der mit dem PRF-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen war kaum zu bemerken. Geringe Delaminierungswerte von kleiner als 5 % wurden sowohl für die im Normalklima gelagerten als auch für die im Wechselklima mit Dauerlast beanspruchten Träger ermittelt. Auch die Lärchenholzverklebungen wurden von den Dauerstandversuchen wenig betroffen. Trotz der größeren Streubreite war keine deutliche Reduzierung der Delaminierungsbeständigkeit infolge der Dauerlasteinwirkung im Wechselklima zu beobachten.

Hohe Delaminierungswerte wurden für die mit den EPI-, MUF- und PUR-Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen im Zusammenhang mit den Laubholzarten festgestellt. Nach den Dauerstandversuchen traten bei den Prüfkörpern aus Esche und unbehandelter Buche große Schwankungen in den Delaminierungsergebnissen auf. Bei den Klebeverbindungen aus

gedämpfter Buche, unabhängig davon ob die Kleinträger den Dauerlast- und Klimabeanspruchungen ausgesetzt wurden, unterlagen die Delaminierungswerte durchweg sehr großen Streuungen. Anhand der vorliegenden Ergebnisse ließ sich eine Erhöhung der Delaminierungseständigkeit von den Buchholzverklebungen durch Verwendung von gedämpfter Buche nicht feststellen.

8.4.4 Blockscherprüfung nach DIN EN 392

Die Scherfestigkeiten der im AS 3 Parameterstudien unter Laborbedingungen und im AS 4 mit Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen werden in Abbildung 78 dargestellt. Sämtliche Ergebnisse der Blockscherprüfungen im AS 4 sind Anlage 17 zu entnehmen.

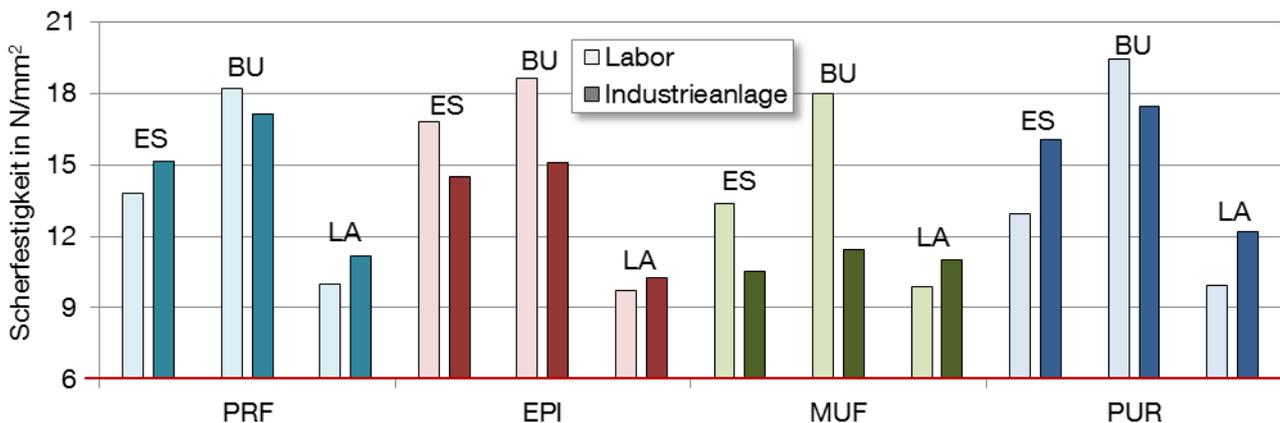


Abbildung 78: Gegenüberstellung der Scherfestigkeiten der unter Laborbedingungen und in Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen

Bei den beiden Laubholzarten zeigten die mit der Industrieanlage unter Verwendung von EPI- und MUF-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen durchschnittlich geringere Scherfestigkeiten. Für die mit den PRF- und PUR-Klebstoffen verklebte Buche wurde ein ähnliches Verhalten festgestellt. Die industriell hergestellten Eschenholzverbindungen wiesen hingegen höhere Festigkeitswerte auf. Bei Lärche wurden, unabhängig von den verwendeten Klebstoffen, niedrigere Scherfestigkeiten für die im AS 3 unter Laborbedingungen hergestellten Klebeverbindungen ermittelt.

In Abbildung 79 werden die Ergebnisse der Blockscherprüfung in Abhängigkeit von der Holzart dargestellt. Die Scherfestigkeiten der mit einer Industrieanlage hergestellten Klebeverbindungen nach einer konstanten Lagerung im Normalklima (NK) und Dauerlastbeanspruchung im Wechselklima (WK) werden gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Blockscherprüfungen ergaben, dass die Dauerstandversuche bei den meisten Kombinationen von Holzart und Klebstoff keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf die Scherfestigkeiten hatten. Den einzigen Ausreißer stellten die mit dem MUF-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen aus den Laubholzarten dar. Bereits für die im Normalklima gelagerten Träger wurden zum Teil niedrigere Scherfestigkeiten ermittelt. Die Dauerlasteinwirkung im Wechselklima führte dazu, dass die Festigkeitswerte weiterhin reduziert abnahmen.

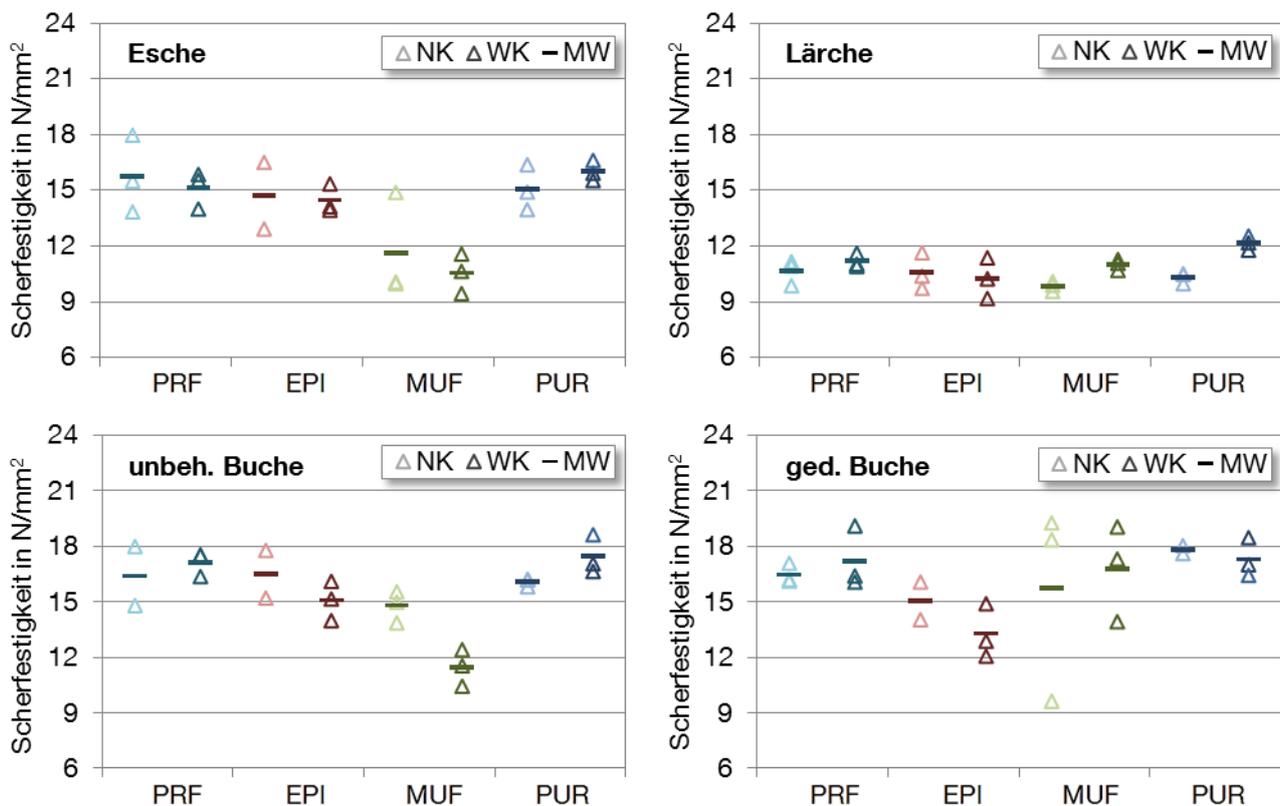


Abbildung 79: Mittlere Scherfestigkeiten der mit verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)

8.5 Diskussion

Anhand von den Delaminierungs- und Blockscherprüfungen wurden erhebliche Qualitätsschwankungen für die unter Laborbedingungen und mit Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen festgestellt. Besonders stark betroffen waren die unter Verwendung von EPI- und MUF-Klebstoffen hergestellten Laubholzverklebungen. Dabei wurden deutlich niedrigere Festigkeiten und Beständigkeit gegen Delaminierung für die industriell fertigten Klebeverbindungen ermittelt. Beim Einsatz vom PUR-Klebstoff wurden hingegen Verklebungen höherer Güte unter Betriebsbedingungen erzielt.

Die Hauptursachen für diese Situation waren zum einen die technisch bedingten Abweichungen zwischen den geplanten Verklebungsparametern und denen, die während des Herstellungsprozesses tatsächlich angewendet wurden (s. Abschnitt 8.2). Zum Beispiel war eine lange geschlossene Wartezeit von 25 bis 30 min bei der Verklebung mit MUF-Klebstoff erwünscht. Während der industriellen Herstellung betrug die tatsächliche Wartezeit zwischen dem Zusammenfügen der Fügeiteiloberfläche und Einsetzen des Pressdrucks bei der ersten Klebfuge wie gewünscht 30 min und der letzten Klebfuge jedoch nur 17 min. Die kürzere geschlossene Wartezeit führte eventuell zum Wegschlagen des Klebstoffs. Demzufolge entwickelten die dabei entstandenen Klebfugen eine unzulängliche Verbindung mit ungenügender Festigkeit und geringer Beständigkeit gegen Delaminierung. Zu den möglichen Ursachen der Qualitätsschwankungen zählte auch noch die Qualität der Fügeiteiloberflächen, die von den Verarbeitungsparametern, wie z. B. dem Zustand der Hobelmesser (scharf/stumpf), mitbeeinflusst wurde. Ergebnisse eines von der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart durchgeführten Forschungsprojekts (2014) zeigten, dass der PUR-Klebstoff sehr sensitiv auf zu stumpfe Hobelmesser reagieren kann.

Im Allgemeinen wurde die Güte der mit den Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen aus Lärche kaum oder nur wenig von den Dauerstandversuchen beeinträchtigt. Vergleichsweise geringere Beständigkeit gegen Delaminierung wurde von den mit den EPI- und PUR-Klebstoff hergestellten Verbindungen gezeigt. Delaminierung von knapp über 5 % wurde bei der Verwendung vom MUF-Klebstoff ermittelt. Die Klebeverbindungen mit den Laubhölzern waren hingegen wenig zufriedenstellend. Besonders gravierend waren die hohen Delaminierungswerte, die unter Verwendung von EPI-, MUF- und PRF-Klebstoffen erzielt wurden. Hohe Scherfestigkeiten und ausreichende Beständigkeit gegen Delaminierung ergaben allein die mit dem PRF-Klebstoff hergestellten Verklebungen.

Die Herabsetzung der Festigkeit und Beständigkeit von Laubholzverklebungen resultierte vor allem aus den starken Rissbildungen in bzw. entlang den Klebstoffugen. Bereits vor Durchführung der entsprechenden Prüfungen waren Rissen bei einer Mehrzahl der Prüfkörper vorhanden. Die damit ermittelten Ergebnisse unterlagen verhältnismäßig großen Schwankungen. Die im Vier-Punkt-Biegeversuch ermittelte Versagenslast war erkennbar von dem Zustand der Klebstoffugen abhängig.

Entgegen der bisherigen Annahme war hier beim Einsatz von gedämpfter Buche keine deutliche Erhöhung der Delaminierungsbeständigkeit infolge einer verbesserten Formstabilität zu erkennen. Beschränkt durch die relativ geringe Anzahl an Prüfkörper, ist es allerdings nicht möglich, eine generelle Aussage darüber zu treffen.

Bei jeglicher Interpretation der Ergebnisse muss immer bedacht werden, dass im Rahmen dieses Vorhabens nur ein Repräsentant einer Klebstofffamilie bei einer, auch durch die insgesamt hohe Anzahl an Prüfungen, begrenzten Prüfkörpermenge betrachtet wurde. Es ist nicht auszuschließen, dass ein möglicherweise nur leicht modifiziertes Produkt der gleichen Klebstofffamilie bei ggf.

anderen Verklebungsparametern durchaus zu einer besseren, jedoch auch schlechteren, Verklebungsqualität führen kann.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurde die Verklebbarkeit unterschiedlicher Nadel- und Laubholzarten untersucht. Ihre Leistungsfähigkeit in Kombination mit ausgewählten Klebstoffsystemen und darüber hinaus ihre Verwendbarkeit in Brettschichtholz wurden betrachtet. Systematische Untersuchungen wurden an den Holzarten Buche, Douglasie, Esche, Fichte und Lärche durchgeführt. Vier handelsübliche Klebstoffe wurden ausgewählt, die jeweils zu den Klebstofffamilien PRF, EPI, MUF bzw. PUR gehören und für die Herstellung von geklebten tragenden Holzbauteilen zugelassen sind.

In vier aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten (AS) wurden die Faktoren betrachtet, die die Güte einer Klebfuge maßgeblich beeinflussen und ihre Bedeutung für die Ausbildung der Klebfugenfestigkeit festgestellt. Bei den labortechnischen Untersuchungen im AS 1 wurden die für die Verklebung relevanten chemischen Eigenschaften von Holz, die Benetzbarkeit der Holzoberflächen und das Abbindeverhalten der Klebstoffe eingehend untersucht. Die Verklebbarkeit der fünf Holzarten wurde im AS 2 anhand der Längszugscherversuche nach DIN EN 302-1 überprüft. Mit den gewonnenen Kenntnissen wurde im AS 3 der Einfluss zweier wichtiger Verarbeitungsparameter (Alter der Holzoberfläche bzw. Methode der Oberflächenherstellung) auf die Qualität der Klebverbindungen anhand von Delaminierungs- und Druckscherprüfungen (Prüfverfahren in Anlehnung an DIN EN 391 und DIN EN 392) quantifiziert. Der Einfluss der Dauerlast- und Klimabeanspruchungen auf die Güte der Verklebungen wurde im AS 4 anhand von Leistungstests an Kleinträgern beurteilt.

Ergebnisse der labortechnischen Untersuchungen zeigten, dass sich die chemische Beschaffenheit und Benetzbarkeit der Holzoberflächen im Laufe der Lagerung verändert, u.a. belegt anhand der Erhöhung der Oberflächen-pH-Werte und der Kontaktwinkel. Dies führt bei der Verklebung von inhaltsstoffreichen Holzarten, wie z. B. Esche und Lärche, mit den PRF- und MUF-Klebstoffen zur Herabsetzung der Delaminierungsbeständigkeit. Hingegen können die mit den EPI- und PUR-Klebstoffen hergestellten Klebeverbindungen von einer langen Zeitspanne zwischen der Herstellung der Fügeteiloberfläche und der Verklebung profitieren. Die Scherfestigkeiten der Verklebungen werden kaum oder nur wenig von dem Alter der Fügeteiloberfläche betroffen.

Eine weitere wichtige Erkenntnis besteht darin, dass die Benetzbarkeit der Holzoberfläche durch das Schleifen als alternative Methode zur Herstellung der Fügeteiloberfläche deutlich verbessert werden kann. Ergebnisse der Parameterstudien belegten, dass bei der Verklebung von den Laubholzarten Buche und Esche die Delaminierungsbeständigkeit der unter Verwendung vom PUR-Klebstoff hergestellten Klebeverbindungen durch das Schleifen deutlich erhöht werden kann. Allerdings erwiesen sich die im Rahmen dieses Projektes beim Schleifvorgang verwendeten Verarbeitungsparameter als ungünstig für die Nadelholzarten Lärche und Fichte. Die mikroskopische Untersuchung zeigte, dass die Holzzellen der Fügeteiloberflächen während des

Schleifvorgangs stark komprimiert wurden. Als Konsequenz hieraus verfügten die damit hergestellten Verklebungen über geringere Scherfestigkeiten und eine geringe Beständigkeit gegen Delaminierung. In diesem Zusammenhang wird der Schwerpunkt der künftigen Arbeit darauf gelegt, die Güte der Nadelholzverklebungen durch richtige Wahl der Schleifparameter zu erhöhen.

Die mit dem PRF-Klebstoff hergestellten Verklebungen zeichneten sich im Rahmen des Forschungsprojektes durch ihre hervorragende Festigkeit und Beständigkeit gegen Delaminierung aus. Auch bei der Verklebung der Laubholzarten konnten mit dem PRF-Klebstoff leistungsfähige Klebeverbindungen erzielt werden. Allerdings ist die Verwendung von den PRF-Klebstoffen zurzeit in Europa aus ökologischen Gründen stark zurückgegangen.

Stattdessen haben sich heute vor allem die MUF-Klebstoffe in der BSH-Herstellung etabliert. Die unter Verwendung vom MUF-Klebstoff hergestellten Nadelholzverklebungen wiesen ebenfalls ausreichende Leistungsfähigkeit auf. Bei der Verklebung von Laubholz stellt jedoch die geringe Delaminierungsbeständigkeit ein Problem dar. Es wurde gezeigt, dass der MUF-Klebstoff sehr sensitiv auf die Einflussfaktoren, wie z. B. die chemische und physikalische Beschaffenheit der Fügeiteiloberfläche und die verwendeten Verklebungsparameter, reagiert. Eine geringfügige Abweichung kann zur erheblichen Qualitätsschwankungen führen.

Zumindest die Anwendung des im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten EPI- und PUR-Klebstoff sollte noch auf die Verklebung von Fichte beschränkt bleiben. Obwohl ihre Kombinationen mit den anderen Holzarten hohe Scherfestigkeiten aufwiesen, wurden dabei immer hohe Delaminierungsanteile festgestellt. Die bislang besten Resultate mit dem EPI-Klebstoff wurden unter Laborbedingungen erreicht. Dabei erfolgte die Verklebung mit den gehobelten Holzoberflächen, die nach dem Hobeln auf Endmaße 7 Tage lang in Normalklima bei 20 °C und 65 % rF gelagert wurden. Die Güte der mit dem PUR-Klebstoff hergestellten Verklebungen hängt deutlich von der Qualität der Fügeiteiloberflächen ab. Eine höhere Beständigkeit gegen Delaminierung wurde z. B. bei den Laubholzverklebungen durch das Schleifen erzielt. Eine lange Zeitspanne zwischen der Herstellung der Fügeiteiloberfläche und der Verklebung ist ebenfalls als wünschenswert zu betrachten.

10 Ergebnistransfer

Die oben genannten Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt wurden bereits erfolgreich zu den relevanten KMUs transferiert. Dabei wurden folgende Transfermaßnahmen durchgeführt:

A Sitzungen Projektbegleitender Ausschuss

- Das erste Treffen des PbA fand am 21. Februar 2012 in München mit einer Teilnehmerzahl von 7 Industrievertretern statt.
- Das zweite Treffen des PbA fand am 14. Dezember 2012 in München mit einer Teilnehmerzahl von 9 Industrievertretern statt.
- Das dritte Treffen des PbA fand am 14. Juni 2013 bei der Fa. Leitz GmbH & Co. KG in Oberkochen mit einer Teilnehmerzahl von 9 Industrievertretern statt.
- Das vierte Treffen des PbA fand am 17. September 2014 in München mit einer Teilnehmerzahl von 6 Industrievertretern statt.

B Wissenschaftlicher Austausch in nationalen und internationalen Kongressen

- Posterpräsentation auf dem 13. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik am 26. und 27. Februar 2013 in Frankfurt am Main.
- Vortrag auf der „RILEM Conference Materials and Joints in Timber Structures - Recent Advancement of Technology“ vom 08. bis 10. Oktober 2013 in Stuttgart.
- Vortrag auf dem „16. Münchener Holzkolloquium“ am 15. Oktober 2013 in München.
- Vortrag auf dem „14. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik“ am 18. und 19. Februar 2014 in Frankfurt am Main.
- Vortrag auf dem „2. Kooperationsforum - Kleben von Holz und Holzwerkstoffen“ am 23. und 24. Juni 2014 in Würzburg.
- Posterpräsentation auf „2014 World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)“ vom 10. bis 14. August 2014 in Quebec City, Canada.

C Transfer der Ergebnisse in die Holzbranche

- Kurzberichte auf den Sitzungen der Fachausschüsse der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. in März/Oktober 2012/2013.
- 2-seitiger Kurzbericht in den iVTH Kurzberichten 2013.
- Vortrag auf dem „Holzwissenschaftlichen Seminar“ am 04. Juni 2014 in München .

D Vorstellung der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen

- Lehrveranstaltung „Kleben von tragenden Holzbauteilen“ im Rahmen der Vorlesung „Ingenieurholzbau II“ am 27.04.2012, 25.04.2013 und 09.05.2014 an der TU München.

E Klebstoffprüfung

- Einfließen der gewonnenen Erkenntnisse in die Tätigkeit als anerkannte Prüfstelle für Klebstoffe für tragende Holzbauteile.

Folgende Transfermaßnahmen sind nach dem Abschluss des Projekts noch geplant:

- 2seitiger Kurzbericht in den ivTH Kurzberichten 2014.
- Publikationen in der Fachzeitschrift „European Journal of Wood and Wood Products“.

Literaturverzeichnis

- Bogner, A. (1991): Modifikation der Holzoberfläche zur Verbesserung der Verleimung. Holz als Roh- und Werkstoff 49:271-275
- Chen, C.M. (1970): Effect of extractive removal on adhesion and wettability of some tropical woods. Forest Products Journal 20(1): 36–41
- Dunky, M.; Pizzi, T.; Van Leemput, M. (2002): Wood Adhesion and Glued Products - Working Group 1: Wood Adhesives, State of the Art - Report, COST Action E13
- Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio: Springer
- Fengel, D.; Wegener, G. (1984) Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, Berlin and New York
- Habenicht, G. (2009): Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- Hillis, W.W. (1986): Forever amber a story of the secondary wood components. Wood science and Technology 20:203-227
- Hse, C.-Y.; Kuo, M.L. (1988): Influence of extractives on wood gluing and finishing - a review. Forest Products Journal 38:52-56
- Koch, G.; Reinsch, S. (2010): Die pH-Werte neu eingeführter Handelshölzer Holz-Zentralblatt 136(9):229
- Künniger, T., Fischer, A., Richter, K. (2006). Water Soluble Larch Extractives: Impact on 1P-PUR Wood Bonds. 5th International Symposium Wood Structure and Properties 2006, Sliad-Sielnica, Czech Republic
- Kürschner, K. (1962): Chemie des Holzes. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- Mack, H. (2006): Der europäische Markt für Brettschichtholz (BSH), Wiener Leimholz Symposium 2006
- Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2014): Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben: Einfluss struktureller und chemischer, herstelltechnischer einstellbarer Oberflächenparameter auf die Festigkeit und Beständigkeit von Holzverklebungen

- Mezger, T. (2006): Das Rheologie Handbuch, Hannover: Vincent Network
- Narayanamurti, D. (1957): Die Bedeutung der Holzextraktstoffe. Holz als Roh- und Werkstoff 15(9):370-380
- Nguyen, T.; Johns, W.E. (1979): The effect of aging and extraction on the surface free energy of Douglas fir and Redwood. Wood Science and Technology 13:29-40
- Plomley, K.F.; Hillis, W.E.; Hirst, K. (1976): The influence of wood extractives on the glue wood bond. Holzforschung, 30(1):14-19
- Popper, R. (1974): Die Einflüsse der Holzextraktstoffe auf das technologische Verhalten von Holz, insbesondere in Bezug auf die Verleimung. SAH Bulletin 3:1-11
- Riehl, T.; Welling, J.; Frühwald, A. (2002): Arbeitsbericht Nr. 2002/01: Druckdämpfen von Schnittholz. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft und das Holzwirtschaftliche Zentrum der Universität Hamburg
- Scheikel, M.; Dunky, M. (1996): Softwareunterstützte statische und dynamische Kontaktwinkelmeßmethoden bei der Benetzung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 54(2):113-117
- Schmidt, M; Knorz, M.; Wilmes, B. (2010): A novel method for real-time curing behavior. Wood Science and Technology 44:407-420
- Wagenführ, A; Scholz, F. (2012): Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag im Carl Hanser Verlag, Leipzig
- Wagenführ, R. (2007): Holzatlas. 6. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag
- Waangard, F.W.; Granados, L.A. (1967): The effect of extractives on water vapor sorption by wood. Wood Science and Technology 1:253-277
- Wellons, J.D.; Kramer, R. L.; Raymond, R. und Sleet, G. (1977): Durability of Exterior Siding Plywood with Southeast Asian Hardwood Veneers. Forest Products Journal 27(2): 38-44
- Witt, M. (2004): Novel plate rheometer configuration allows monitoring real-time wood adhesive curing behavior, Journal of Adhesion Science and Technology 18:893-904
- Wittel, F.K.; Hass, P.; Mendoza, M.; Niemz, P.; Herrmann, H.J. (2010): Verklebung von Laubhölzern: Eindringen von Klebstoffen in Buche. Bulletin Holzforschung Schweiz der SAH:1-4

Zawarin, E. (1984): The Chemistry of Solid Wood. In: Advances in Chemistry Series (207):349-400, American Chemical Society, Washington D.C.

Zellner, J. (2009): Klebstoffe im Holzbau – Hochtemperaturverhalten. Bachelorarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Zeppenfeld, G.; Grunwald, D. (2005): Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. 2. Auflage, DRW Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen

Normen, Regelwerke

- DIN 1052:2008-12, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- DIN 68141:1995-08, Holzklebstoffe - Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen für tragende Holzbauteile
- DIN EN 301:2006-09, Klebstoffe für tragende Holzbauteile, Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2006
- DIN EN 302-1:2004-10, Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung EN 302-1:2004
- DIN EN 302-2:2004-10, Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 302-2:2004
- DIN EN 386:2002-04, Brettschichtholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung; Deutsche Fassung EN 386:2001
- DIN EN 391:2002-04, Brettschichtholz - Delaminierungsprüfung von Klebstoffugen; Deutsche Fassung EN 391:2001
- DIN EN 392:1996-04, Brettschichtholz – Scherprüfung der Leimfugen; Deutsche Fassung EN 392:1995
- DIN EN 408:2004-08, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 408:2003
- DIN 52367: 2002-05, Spanplatten - Bestimmung der Scherfestigkeit parallel zur Plattenebene
- DIN 54458:2013-03, Strukturklebstoffe - Bestimmung des Fließ- und Applikationsverhaltens von viskoelastischen Klebstoffen mit Hilfe der Oszillationsrheometrie
- DIN EN 15148:2010-03, Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Substanzen; Deutsche Fassung EN 15148:2009
- DIN EN 1912:2009-08, Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten; Deutsche Fassung EN 1912:2004+A3:2009
- DIN EN 14080:2005-09, Holzbauwerke Brettschichtholz Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2005

DIN EN ISO 15148:2003-03, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002

DIN EN 15416-3:2008-03, Klebstoffe für tragende Holzbauteile ausgenommen Phenolharzklebstoffe und Aminoplaste - Prüfverfahren - Teil 3: Prüfung der Kriechverformung unter zyklischen Klimabedingungen an Prüfkörpern bei Biege-Scherbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 15416-3:2007

DIN EN ISO 9001:2008-12, Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2008); Dreisprachige Fassung EN ISO 9001:2008

Zellcheming Merkblatt V/17/80 (1980): Elektrometrische Messung des pH-Wertes auf der Oberfläche von Papier

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Ablaufdiagramm der geplanten Arbeitsschritte (AS)..... | 8 |
| Abbildung 2: Probenentnahme aus dem Schnittholz, Abmessungen in mm..... | 11 |
| Abbildung 3: Chromatogramm des Acetonextrakts vom Lärchenholz..... | 13 |
| Abbildung 4: Massenspektrum des Peaks 1 (oben) und Vergleichsspektrum von Arabinose (unten)..... | 13 |
| Abbildung 5: Massenspektrum des Peaks 5 (oben) und Vergleichsspektrum von Taxifolin (unten)..... | 13 |
| Abbildung 6: Chromatogramme der Standardzuckergemische und des Kaltwasserextrakts vom Lärchenholz..... | 14 |
| Abbildung 7: Gehalte an Extraktstoffen der fünf Holzarten in %..... | 15 |
| Abbildung 8: Abtrennung der Furniere von einem Holzklötzchen..... | 20 |
| Abbildung 9: Teflonbehälter im geöffneten Zustand (links) und die gesamte Messapparatur (rechts)..... | 20 |
| Abbildung 10: Oberflächen-pH-Werte der frischen und gealterten Holzoberflächen..... | 21 |
| Abbildung 11: Benetzung der Fügeoberfläche von einem Klebstofftropfen..... | 23 |
| Abbildung 12: Schematische Darstellung der dynamischen Kontaktwinkelmessung..... | 24 |
| Abbildung 13: Kontaktwinkelmessgerät EasyDrop der Firma Krüss..... | 26 |
| Abbildung 14: Einfluss des Oberflächenalters auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen..... | 27 |
| Abbildung 15: Einfluss der Methode der Oberflächenherstellung auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen..... | 28 |
| Abbildung 16: Einfluss der Schnittrichtung auf die Benetzbarkeit der Holzoberflächen..... | 29 |
| Abbildung 17: Zwei-Platten-Modell für Oszillationsversuche (Mezger 2010)..... | 30 |
| Abbildung 18: Vorgegebene Funktion der Deformation γt und resultierende Schubspannungsfunktion τt (Mezger 2010)..... | 31 |
| Abbildung 19: Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff bei verschiedenen Mischungsverhältnissen..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 20: Härungsverhalten vom MUF-Klebstoff bei verschiedenen Mischungsverhältnissen | 35 |
| Abbildung 21: Modifiziertes Platte-Platte-Messsystem mit Prüfkörper aus Holz (Schmidt u.a. 2010)..... | 36 |
| Abbildung 22: Abmessungen des Holzprüfkörpers in mm (Schmitt u.a. 2010)..... | 36 |
| Abbildung 23: Anordnung der rheologischen Prüfkörper in der Holzleiste | 37 |
| Abbildung 24: Tatsächliche Holzfeuchte der Prüfkörper | 38 |
| Abbildung 25: Versuchsaufbau Druckscherversuche mit eingesetztem Prüfkörper | 38 |
| Abbildung 26: Typisches Bruchbild der Klebstoffuge | 39 |
| Abbildung 27. Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen..... | 39 |
| Abbildung 28: Härungsverhalten vom MUF-Klebstoff ohne/mit Holzprüfkörpern bei einem Mischungsverhältnis 100:50 | 41 |
| Abbildung 29: Gegenüberstellung der vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen nach 2 h Härungszeit erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten | 42 |
| Abbildung 30: Viskositätsentwicklung vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchte..... | 43 |
| Abbildung 31: Gegenüberstellung der vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchte („Ist-Holzfeuchte“) nach 3 h Härungszeit erreichten Viskositäten und Druckscherfestigkeiten | 45 |
| Abbildung 32: Zugscherprüfkörper, Abmessungen in mm..... | 48 |
| Abbildung 33. Mittlere Zugscherfestigkeit (Säulen) und Holzbruchanteil (blaue Markierungen) der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper aus Buche nach Behandlung A1, A2 und A4..... | 50 |
| Abbildung 34: Ergebnisse der Wiederholungsversuche mit MUF- und PUR-Klebstoffen: mittlere Zugscherfestigkeit (Säulen) und Holzbruchanteil (blaue Markierungen) der Prüfkörper aus Buche..... | 51 |
| Abbildung 35: Mittlere Zugscherfestigkeiten der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Proben..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 36: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung..... | 55 |
| Abbildung 37: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie..... | 55 |
| Abbildung 38: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung..... | 55 |
| Abbildung 39: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung..... | 56 |
| Abbildung 40: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie..... | 56 |
| Abbildung 41: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung..... | 56 |
| Abbildung 42: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung..... | 57 |
| Abbildung 43: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie | 57 |
| Abbildung 44: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung..... | 57 |
| Abbildung 45: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Lärchenholzverklebung..... | 58 |
| Abbildung 46: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Verklebung aus Douglasie..... | 58 |
| Abbildung 47: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Fichtenholzverklebung..... | 58 |
| Abbildung 48: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung..... | 59 |
| Abbildung 49: Mikroskopische Aufnahme der mit PRF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung | 60 |
| Abbildung 50: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 51: Mikroskopische Aufnahme der mit EPI-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung | 61 |
| Abbildung 52: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung..... | 62 |
| Abbildung 53: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung (Klebfuge hergestellt mit ursprünglichen Verklebungsparametern) ... | 62 |
| Abbildung 54: Mikroskopische Aufnahme der mit MUF-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung (Klebfuge hergestellt mit angepassten Parametern)..... | 62 |
| Abbildung 55: Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Eschenholzverklebung..... | 63 |
| Abbildung 56. Mikroskopische Aufnahme der mit PUR-Klebstoff hergestellten Buchenholzverklebung | 63 |
| Abbildung 57: Prüfkörper der Parameterstudien, Abmessung in mm | 66 |
| Abbildung 58: Prüfvorrichtung (links) und schematische Darstellung der Blockscherprüfung (rechts, DIN EN 392) | 68 |
| Abbildung 59: Querschnitt des Versuchsträgers..... | 69 |
| Abbildung 60: Mittlere Delaminierung der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper..... | 71 |
| Abbildung 61: Mittlere Delaminierung der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (H0-frisch gehobelt; S0-frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)..... | 72 |
| Abbildung 62: Mittlere Scherfestigkeiten (Säulen) und Holzbruchanteile (blaue Markierungen) der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper nach Behandlung A1 | 73 |
| Abbildung 63. Mittlere Scherfestigkeiten der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper nach Behandlung A2 und A4..... | 73 |
| Abbildung 64: Mittlere Scherfestigkeiten der mit den vier verschiedenen Holzarten hergestellten Proben Parameterstudien (H0-frisch gehobelt; S0-frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)..... | 74 |
| Abbildung 65: Mittlere Klebstoffugendicke der mit verschiedenen Klebstoffen hergestellten Prüfkörper..... | 75 |

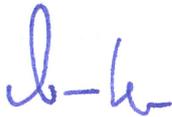
| | |
|--|----|
| Abbildung 66: Mikroskopische Annahmen der vom PRF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Lärchenholzoberflächen geformten Klebfugen..... | 76 |
| Abbildung 67: Mikroskopische Annahmen der vom EPI-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Lärchenholzoberflächen geformten Klebfugen..... | 76 |
| Abbildung 68: Mikroskopische Annahmen der vom MUF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Fichtenholzoberflächen geformten Klebfugen..... | 77 |
| Abbildung 69: Mikroskopische Annahmen der vom MUF-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Eschenholzoberflächen geformten Klebfugen..... | 77 |
| Abbildung 70: Mikroskopische Annahmen der vom PUR-Klebstoff auf gehobelten (oben) und geschliffenen (unten) Buchenholzoberflächen geformten Klebfugen | 78 |
| Abbildung 71: Bruchlastversuch mit Kleinträger, Abmessung in mm..... | 81 |
| Abbildung 72: Versuchsvorrichtung Dauerlastversuche..... | 82 |
| Abbildung 73: Kleinträger im Dauerlastversuch, Abmessung in mm..... | 82 |
| Abbildung 74: Zusammenfassung der in/entlang der Klebfugen gebildeten Risse (Tiefenstufe links nach rechts: < 10 mm, 10-20 mm, 20-30 mm usw. bis 70-80 mm) | 84 |
| Abbildung 75: Die zum Zeitpunkt des Versagens herrschenden Biegespannungen in den Kleinträgern (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)..... | 86 |
| Abbildung 76: Gegenüberstellung der Delaminierungsbeständigkeit der unter Laborbedingungen und in Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen | 87 |
| Abbildung 77: Mittlere Delaminierung der mit verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)..... | 88 |
| Abbildung 78: Gegenüberstellung der Scherfestigkeiten der unter Laborbedingungen und in Industrieanlagen hergestellten Klebeverbindungen | 89 |
| Abbildung 79: Mittlere Scherfestigkeiten der mit verschiedenen Holzarten hergestellten Prüfkörper (NK-Normalklima; WK-Wechselklima; MW-Mittelwert)..... | 90 |

Tabellenverzeichnis

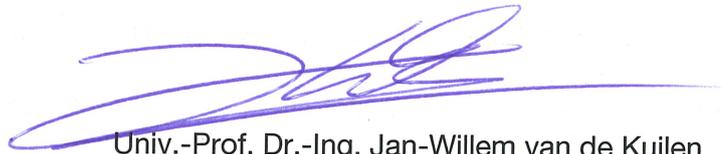
| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Herkunft und Rohdichte der Hölzer | 9 |
| Tabelle 2: Produktname und Art der Klebstoffe | 9 |
| Tabelle 3: Gehalte der Extraktstoffe in % und pH-Werte der fünf Holzarten | 15 |
| Tabelle 4: Wichtige Inhaltsstoffe der fünf Laub- und Nadelholzarten | 17 |
| Tabelle 5: Gegenüberstellung von den bei der Kaltwasserextraktion und an den frischen Holzoberflächen gemessenen pH-Werten | 21 |
| Tabelle 6: Versuchsreihen der Kontaktwinkelmessung (R-Radialschnittfläche, T-Tangentialschnittfläche) | 25 |
| Tabelle 7: Kontaktwinkel von Wasser auf frisch gehobelten Radialschnittflächen..... | 27 |
| Tabelle 8: Wasseraufnahmekoeffizienten in $\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$ (Wagenführ 2012) | 40 |
| Tabelle 9: Mittlere vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Schnittrichtungen nach 2 h Härtingszeit erreichten Scherfestigkeiten in N/mm^2 | 43 |
| Tabelle 10: Mittlere vom MUF-Klebstoff an Holzoberflächen unterschiedlicher Holzfeuchten (HF) nach 3 h Härtingszeit erreichten Scherfestigkeiten in N/mm^2 | 44 |
| Tabelle 11: Verklebungsparameter zur Herstellung der Zugscherprüfkörper | 48 |
| Tabelle 12: Mindestwerte der mittleren Zugscherfestigkeit für dünne Klebstoffugen an Prüfkörpern aus Buche in N/mm^2 | 49 |
| Tabelle 13: Verklebungsparameter zur Herstellung Prüfkörper der Parameterstudien | 66 |
| Tabelle 14: Mindestfaserbruchanteile bezogen auf die Scherfestigkeit f_{vn} (DIN EN 386)..... | 70 |
| Tabelle 15: Verklebungsparameter zur Herstellung Kleinträger | 80 |

München, den 08.10.2014

München, den 08.10.2014



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen

Anlage 1: Zusammenstellung der Oberflächen-pH-Werte der frischen und gealterten Holzoberflächen (1 bis 5-Nr. Schnittholz, L- links des Schnittholzes, R- rechts des Schnittholzes)

| Holzart | | 1 L | 1 R | 2 L | 2 R | 3 L | 3 R | 4 L | 4 R | 5 L | 5 R |
|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Esche | 0 h | 5,2 | 5,2 | 5,1 | 4,7 | 5,1 | 5,4 | 5,6 | 5,0 | 5,4 | 5,2 |
| | 24 h | 5,2 | 5,5 | 5,2 | 4,7 | 4,9 | 5,5 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,1 |
| | 7 d | 5,2 | 5,5 | 5,5 | 5,2 | 5,3 | 5,6 | 5,4 | 5,4 | 5,4 | 5,4 |
| Buche | 0 h | 4,7 | 4,9 | 4,9 | 4,8 | 5,0 | 4,9 | 4,8 | 4,9 | 4,8 | 5,0 |
| | 24 h | 5,1 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,1 | 5,1 | 5,5 | 5,4 | 5,4 | 5,3 |
| | 7 d | 5,0 | 5,2 | 5,3 | 4,9 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,0 | 5,2 |
| Lärche | 0 h | 3,8 | 3,8 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,0 | 3,9 | 3,9 | 4,2 |
| | 24 h | 5,1 | 4,5 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,0 | 4,0 | 3,8 | 4,3 |
| | 7 d | 4,4 | 4,0 | 5,3 | 4,2 | 4,2 | 4,8 | 3,7 | 4,0 | 4,2 | 4,5 |
| Douglasie | 0 h | 3,6 | 3,6 | 3,8 | 3,5 | 3,3 | 3,5 | 3,3 | 3,4 | 3,3 | 3,2 |
| | 24 h | 3,8 | 3,7 | 4,1 | 4,2 | 3,9 | 3,4 | 3,9 | 3,8 | 3,7 | 3,8 |
| | 7 d | 4,1 | 3,5 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 3,5 | 3,9 | 3,9 | 3,5 | 3,8 |
| Fichte | 0 h | 4,6 | 4,6 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | 4,6 | 4,5 | 4,5 | 4,6 |
| | 24 h | 4,6 | 4,8 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | 4,9 | 4,5 | 4,8 | 4,8 | 4,6 |
| | 7 d | 4,6 | 5,2 | 4,7 | 4,7 | 4,9 | 4,9 | 5,3 | 5,2 | 4,6 | 4,7 |

Anlage 2: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an frisch gehobelten Holzoberflächen

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-H0-01 | 01 | 38,9 ± 0,80 | 39,7 | 38,1 |
| | 02 | 36,5 ± 1,97 | 34,5 | 38,4 |
| | 03 | 36,2 ± 1,49 | 34,8 | 37,7 |
| | 04 | 38,3 ± 2,25 | 36,0 | 40,5 |
| | 05 | 33,6 ± 2,89 | 30,7 | 36,5 |
| | 06 | 31,8 ± 4,97 | 26,8 | 36,7 |
| | 07 | 25,1 ± 7,47 | 32,5 | 17,6 |
| | 08 | 30,5 ± 2,63 | 33,2 | 27,9 |
| | 09 | 32,8 ± 1,17 | 34,0 | 31,7 |
| | 10 | 26,4 ± 0,40 | 26,8 | 26,0 |
| ES-H0-02 | 01 | 39,6 ± 1,33 | 38,2 | 40,9 |
| | 02 | 35,3 ± 1,07 | 34,2 | 36,3 |
| | 03 | 30,8 ± 1,17 | 29,7 | 32,0 |
| | 04 | 28,7 ± 1,47 | 30,2 | 27,2 |
| | 05 | 30,7 | 30,7 | 30,7 |
| | 06 | 28,7 ± 6,20 | 34,9 | 22,5 |
| | 07 | 25,0 ± 2,62 | 27,6 | 22,4 |
| | 08 | 24,1 ± 8,60 | 32,7 | 15,5 |
| | 09 | 29,2 ± 3,71 | 32,9 | 25,4 |
| | 10 | 31,8 ± 1,02 | 30,7 | 32,8 |
| ES-H0-03 | 01 | 45,0 ± 2,71 | 47,7 | 42,3 |
| | 02 | 45,0 ± 3,50 | 48,5 | 41,5 |
| | 03 | 42,3 ± 1,98 | 44,3 | 40,4 |
| | 04 | 41,0 ± 0,47 | 40,5 | 41,4 |
| | 05 | 35,5 ± 1,38 | 34,1 | 36,8 |
| | 06 | 39,5 ± 3,88 | 35,7 | 43,4 |
| | 07 | 39,8 ± 3,36 | 36,5 | 43,2 |
| | 08 | 43,3 ± 1,05 | 44,4 | 42,3 |
| | 09 | 43,8 ± 0,77 | 44,6 | 43 |
| | 10 | 45,1 ± 2,46 | 42,6 | 47,6 |
| ES-H0-04 | 01 | 47,7 ± 2,69 | 45,0 | 50,4 |
| | 02 | 48,9 ± 0,41 | 48,5 | 49,3 |
| | 03 | 47,5 ± 0,40 | 47,9 | 47,1 |
| | 04 | 46,0 ± 2,01 | 44,0 | 48,1 |
| | 05 | 46,8 ± 0,53 | 46,3 | 47,4 |
| | 06 | 46,9 ± 0,66 | 46,2 | 47,5 |
| | 07 | 48,6 | 48,6 | 48,5 |
| | 08 | 48,4 ± 0,22 | 48,7 | 48,2 |
| | 09 | 46,7 ± 0,91 | 47,6 | 45,8 |
| | 10 | 46,2 ± 1,50 | 47,7 | 44,7 |
| ES-H0-05 | 01 | 39,9 ± 0,40 | 39,5 | 40,3 |
| | 02 | 41,8 ± 4,00 | 37,8 | 45,8 |
| | 03 | 39,3 ± 0,33 | 39,6 | 39,0 |
| | 04 | 34,8 ± 1,40 | 36,2 | 33,4 |
| | 05 | 34,7 ± 1,34 | 36,0 | 33,4 |
| | 06 | 35,1 ± 5,40 | 40,5 | 29,7 |
| | 07 | 34,1 ± 6,33 | 40,4 | 27,8 |
| | 08 | 33,4 ± 6,39 | 39,8 | 27,0 |
| | 09 | 35,3 ± 7,90 | 43,2 | 27,4 |
| | 10 | 35,1 ± 3,78 | 38,9 | 31,3 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-H0-01 | 01 | 51,9 ± 3,07 | 54,9 | 48,8 |
| | 02 | 53,7 ± 4,31 | 58,0 | 49,4 |
| | 03 | 48,3 ± 0,41 | 47,9 | 48,7 |
| | 04 | 48,7 ± 0,09 | 48,8 | 48,6 |
| | 05 | 49,7 ± 2,91 | 52,6 | 46,7 |
| | 06 | 50,6 ± 0,05 | 50,7 | 50,6 |
| | 07 | 48,4 ± 0,29 | 48,7 | 48,1 |
| | 08 | 49,9 ± 0,60 | 50,5 | 49,3 |
| | 09 | 56,6 ± 6,86 | 63,4 | 49,7 |
| | 10 | 49,2 ± 1,66 | 47,5 | 50,8 |
| BU-H0-02 | 01 | 50,7 ± 2,52 | 53,2 | 48,2 |
| | 02 | 51,5 ± 0,46 | 51,1 | 52,0 |
| | 03 | 54,5 ± 2,27 | 56,8 | 52,2 |
| | 04 | 48,3 ± 4,15 | 44,2 | 52,5 |
| | 05 | 44,0 ± 7,91 | 36,1 | 51,9 |
| | 06 | 44,0 ± 3,84 | 40,2 | 47,9 |
| | 07 | 47,3 ± 3,96 | 43,3 | 51,2 |
| | 08 | 48,8 ± 3,53 | 45,2 | 52,3 |
| | 09 | 50,9 ± 0,56 | 50,3 | 51,5 |
| | 10 | 50,4 ± 1,57 | 48,8 | 51,9 |
| BU-H0-03 | 01 | 53,7 ± 2,35 | 51,3 | 56,0 |
| | 02 | 50,2 ± 1,67 | 48,5 | 51,9 |
| | 03 | 51,6 ± 2,69 | 48,9 | 54,3 |
| | 04 | 49,2 ± 0,32 | 49,6 | 48,9 |
| | 05 | 52,8 ± 0,49 | 53,3 | 52,3 |
| | 06 | 52,8 ± 0,31 | 52,4 | 53,1 |
| | 07 | 54,4 ± 1,10 | 53,3 | 55,5 |
| | 08 | 55,7 ± 0,78 | 55,0 | 56,5 |
| | 09 | 60,3 ± 5,18 | 65,4 | 55,1 |
| | 10 | 63,4 ± 2,31 | 61,1 | 65,7 |
| BU-H0-04 | 01 | 49,6 ± 1,80 | 51,4 | 47,8 |
| | 02 | 52,0 ± 2,97 | 55,0 | 49,0 |
| | 03 | 65,9 ± 3,42 | 69,4 | 62,5 |
| | 04 | 64,9 ± 0,22 | 64,7 | 65,1 |
| | 05 | 57,5 ± 6,07 | 51,4 | 63,6 |
| | 06 | 60,2 ± 5,01 | 55,2 | 65,2 |
| | 07 | 59,2 ± 0,96 | 60,2 | 58,3 |
| | 08 | 52,2 ± 1,25 | 53,5 | 51,0 |
| | 09 | 51,0 ± 0,67 | 51,7 | 50,3 |
| | 10 | 50,7 ± 0,44 | 51,2 | 50,3 |
| BU-H0-05 | 01 | 56,6 ± 3,77 | 52,9 | 60,4 |
| | 02 | 55,2 ± 3,41 | 51,8 | 58,6 |
| | 03 | 53,1 ± 0,62 | 52,5 | 53,8 |
| | 04 | 51,5 ± 1,15 | 52,6 | 50,3 |
| | 05 | 49,7 ± 1,32 | 48,4 | 51,1 |
| | 06 | 49,0 ± 1,68 | 47,4 | 50,7 |
| | 07 | 46,0 ± 0,67 | 46,7 | 45,4 |
| | 08 | 51,8 ± 4,51 | 47,3 | 56,3 |
| | 09 | 51,5 ± 4,47 | 47,0 | 55,9 |
| | 10 | 51,7 ± 3,57 | 48,1 | 55,3 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-H0-01 | 01 | 46,7 ± 2,07 | 48,8 | 44,7 |
| | 02 | 41,0 ± 7,32 | 48,3 | 33,7 |
| | 03 | 46,9 ± 1,73 | 45,1 | 48,6 |
| | 04 | 42,9 ± 1,68 | 44,6 | 41,2 |
| | 05 | 47,8 ± 2,37 | 45,5 | 50,2 |
| | 06 | 41,9 ± 2,15 | 39,8 | 44,1 |
| | 07 | 46,6 ± 1,08 | 45,5 | 47,7 |
| | 08 | 38,8 ± 0,68 | 39,4 | 38,1 |
| | 09 | 39,2 ± 1,28 | 37,9 | 40,5 |
| | 10 | 38,0 ± 1,37 | 36,7 | 39,4 |
| LA-H0-02 | 01 | 42,8 ± 2,88 | 45,7 | 39,9 |
| | 02 | 34,3 ± 4,42 | 29,1 | 38,7 |
| | 03 | 41,6 ± 6,65 | 48,3 | 35,0 |
| | 04 | 37,3 ± 4,33 | 33,0 | 41,7 |
| | 05 | 29,9 ± 7,58 | 37,5 | 22,3 |
| | 06 | 38,8 ± 0,12 | 39,0 | 38,7 |
| | 07 | 37,3 ± 0,93 | 36,4 | 38,3 |
| | 08 | 37,3 ± 4,87 | 42,2 | 32,5 |
| | 09 | 31,8 ± 7,82 | 24,0 | 39,6 |
| | 10 | 33,3 ± 2,71 | 36,0 | 30,6 |
| LA-H0-03 | 01 | 42,8 ± 2,88 | 45,7 | 39,9 |
| | 02 | 41,6 ± 6,65 | 48,3 | 35,0 |
| | 03 | 37,3 ± 4,33 | 33,0 | 41,7 |
| | 04 | 38,8 ± 0,12 | 39,0 | 38,7 |
| | 05 | 37,3 ± 0,93 | 36,4 | 38,3 |
| | 06 | 37,3 ± 4,87 | 42,2 | 32,5 |
| | 07 | 31,8 ± 7,82 | 24,0 | 39,6 |
| | 08 | 33,3 ± 2,71 | 36,0 | 30,6 |
| | 09 | 27,8 ± 6,53 | 21,3 | 34,4 |
| | 10 | 22,9 ± 2,78 | 25,6 | 20,1 |
| LA-H0-04 | 01 | 58,3 ± 2,55 | 55,7 | 60,8 |
| | 02 | 48,7 ± 2,21 | 46,5 | 50,9 |
| | 03 | 49,1 ± 3,06 | 46,0 | 52,2 |
| | 04 | 47,5 ± 2,30 | 45,2 | 49,8 |
| | 05 | 50,5 ± 0,62 | 49,9 | 51,1 |
| | 06 | 49,2 ± 0,62 | 49,8 | 48,6 |
| | 07 | 45,6 ± 0,99 | 44,6 | 46,6 |
| | 08 | 45,5 ± 0,56 | 46,1 | 45 |
| | 09 | 45,4 ± 0,20 | 45,6 | 45,2 |
| | 10 | 47,0 ± 0,94 | 47,9 | 46 |
| LA-H0-05 | 01 | 48,0 ± 0,20 | 47,7 | 48,2 |
| | 02 | 52,3 ± 2,63 | 54,9 | 49,7 |
| | 03 | 53,9 ± 1,01 | 54,9 | 52,9 |
| | 04 | 49,0 ± 3,24 | 52,2 | 45,7 |
| | 05 | 48,0 ± 0,20 | 47,7 | 48,2 |
| | 06 | 48,2 ± 0,40 | 48,6 | 47,8 |
| | 07 | 44,9 ± 0,55 | 45,4 | 44,3 |
| | 08 | 48,5 ± 3,31 | 45,2 | 51,8 |
| | 09 | 41,1 ± 0,88 | 42,0 | 40,2 |
| | 10 | 41,3 | 41,2 | 41,3 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-H0-01 | 01 | 58,5 ± 3,84 | 54,7 | 62,3 |
| | 02 | 58,6 ± 2,81 | 55,8 | 61,4 |
| | 03 | 58,2 ± 1,88 | 56,4 | 60,1 |
| | 04 | 56,7 ± 0,49 | 56,2 | 57,1 |
| | 05 | 54,3 ± 2,62 | 51,7 | 56,9 |
| | 06 | 53,8 ± 1,99 | 51,8 | 55,7 |
| | 07 | 53,8 ± 0,55 | 53,2 | 54,3 |
| | 08 | 53,2 ± 0,51 | 52,7 | 53,7 |
| | 09 | 52,4 ± 0,59 | 51,8 | 53 |
| | 10 | 52,0 ± 0,75 | 52,8 | 51,3 |
| DG-H0-02 | 01 | 57,8 ± 2,19 | 60,0 | 55,6 |
| | 02 | 56,7 ± 0,64 | 57,3 | 56 |
| | 03 | 59,2 ± 0,59 | 58,6 | 59,8 |
| | 04 | 56,7 ± 1,93 | 54,8 | 58,7 |
| | 05 | 57,0 ± 2,34 | 54,7 | 59,3 |
| | 06 | 59,8 ± 1,67 | 58,1 | 61,5 |
| | 07 | 59,3 ± 2,62 | 56,7 | 61,9 |
| | 08 | 59,0 ± 3,37 | 55,6 | 62,4 |
| | 09 | 58,8 ± 3,86 | 54,9 | 62,6 |
| | 10 | 59,0 ± 5,75 | 53,3 | 64,8 |
| DG-H0-03 | 01 | 55,9 ± 1,34 | 54,6 | 57,2 |
| | 02 | 56,4 ± 2,64 | 53,8 | 59 |
| | 03 | 59,5 ± 0,77 | 58,7 | 60,3 |
| | 04 | 55,6 ± 0,30 | 55,9 | 55,3 |
| | 05 | 52,6 ± 1,67 | 54,2 | 50,9 |
| | 06 | 54,1 ± 2,84 | 56,9 | 51,2 |
| | 07 | 53,3 ± 1,04 | 52,2 | 54,3 |
| | 08 | 54,2 | 54,3 | 54,2 |
| | 09 | 54,4 ± 0,57 | 55,0 | 53,8 |
| | 10 | 54,4 ± 1,27 | 55,7 | 53,1 |
| DG-H0-04 | 01 | 55,3 ± 4,94 | 60,2 | 50,3 |
| | 02 | 54,1 ± 4,51 | 58,6 | 49,6 |
| | 03 | 55,0 ± 4,68 | 59,6 | 50,3 |
| | 04 | 56,5 ± 4,18 | 60,7 | 52,4 |
| | 05 | 56,5 ± 4,18 | 60,7 | 52,4 |
| | 06 | 58,3 ± 3,38 | 61,7 | 54,9 |
| | 07 | 58,3 ± 2,76 | 61,1 | 55,6 |
| | 08 | 60,2 ± 2,68 | 62,9 | 57,6 |
| | 09 | 56,6 ± 6,09 | 62,7 | 50,5 |
| | 10 | 56,2 ± 5,07 | 61,2 | 51,1 |
| DG-H0-05 | 01 | 53,5 ± 3,75 | 57,3 | 49,8 |
| | 02 | 54,2 ± 3,89 | 58,1 | 50,3 |
| | 03 | 55,1 ± 4,43 | 59,5 | 50,6 |
| | 04 | 55,5 ± 2,90 | 58,4 | 52,6 |
| | 05 | 54,9 ± 2,01 | 56,9 | 52,9 |
| | 06 | 55,8 ± 1,73 | 57,5 | 54,0 |
| | 07 | 54,9 ± 3,90 | 58,8 | 51,0 |
| | 08 | 54,9 ± 3,11 | 58,0 | 51,8 |
| | 09 | 53,1 ± 1,94 | 55,0 | 51,2 |
| | 10 | 53,0 ± 1,57 | 54,5 | 51,4 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-H0-01 | 01 | 38,6 ± 1,33 | 39,9 | 37,3 |
| | 02 | 36,4 ± 1,24 | 37,7 | 35,2 |
| | 03 | 35,9 ± 0,13 | 36,0 | 35,8 |
| | 04 | 39,0 ± 0,21 | 38,8 | 39,2 |
| | 05 | 39,0 ± 0,13 | 39,1 | 38,9 |
| | 06 | 37,6 ± 0,42 | 37,2 | 38,1 |
| | 07 | 36,0 ± 0,31 | 35,7 | 36,3 |
| | 08 | 35,6 ± 1,67 | 37,3 | 33,9 |
| | 09 | 41,8 ± 1,82 | 43,7 | 40,0 |
| | 10 | 39,7 ± 2,34 | 42,0 | 37,3 |
| FI-H0-02 | 01 | 45,2 ± 2,45 | 42,7 | 47,6 |
| | 02 | 44,6 ± 3,75 | 40,8 | 48,3 |
| | 03 | 43,0 ± 0,99 | 44,0 | 42,0 |
| | 04 | 46,8 ± 1,25 | 48,1 | 45,6 |
| | 05 | 42,4 ± 0,74 | 41,6 | 43,1 |
| | 06 | 39,3 ± 2,65 | 36,7 | 42,0 |
| | 07 | 38,1 ± 2,89 | 35,2 | 41,0 |
| | 08 | 39,6 ± 3,48 | 36,1 | 43,1 |
| | 09 | 35,7 ± 2,41 | 33,3 | 38,2 |
| | 10 | 36,4 ± 2,37 | 34,1 | 38,8 |
| FI-H0-03 | 01 | 42,5 ± 0,15 | 42,7 | 42,4 |
| | 02 | 40,9 ± 0,49 | 40,4 | 41,4 |
| | 03 | 40,0 ± 2,01 | 38,0 | 42,0 |
| | 04 | 41,8 ± 1,13 | 40,7 | 43,0 |
| | 05 | 41,1 ± 0,13 | 40,9 | 41,2 |
| | 06 | 41,4 ± 1,43 | 39,9 | 42,8 |
| | 07 | 40,9 ± 2,06 | 38,9 | 43,0 |
| | 08 | 41,0 ± 3,07 | 37,9 | 44,1 |
| | 09 | 37,9 ± 3,29 | 34,6 | 41,2 |
| | 10 | 37,7 ± 2,57 | 35,1 | 40,3 |
| FI-H0-04 | 01 | 39,1 ± 4,61 | 34,5 | 43,7 |
| | 02 | 38,4 ± 2,05 | 36,4 | 40,5 |
| | 03 | 40,9 ± 0,82 | 40,1 | 41,8 |
| | 04 | 38,9 ± 0,89 | 38,0 | 39,8 |
| | 05 | 39,0 ± 1,24 | 37,8 | 40,3 |
| | 06 | 39,2 ± 1,66 | 37,5 | 40,8 |
| | 07 | 40,6 ± 1,39 | 39,2 | 42,0 |
| | 08 | 39,2 ± 0,16 | 39,4 | 39,1 |
| | 09 | 38,6 ± 1,71 | 36,9 | 40,3 |
| | 10 | 37,6 ± 0,40 | 37,2 | 38,0 |
| FI-H0-05 | 01 | 46,8 ± 1,03 | 45,8 | 47,8 |
| | 02 | 46,2 ± 2,48 | 43,7 | 48,7 |
| | 03 | 46,6 ± 2,11 | 44,5 | 48,7 |
| | 04 | 46,1 ± 1,62 | 44,4 | 47,7 |
| | 05 | 46,5 ± 1,40 | 45,1 | 47,9 |
| | 06 | 46,6 ± 0,35 | 46,2 | 46,9 |
| | 07 | 45,8 ± 1,46 | 47,2 | 44,3 |
| | 08 | 43,8 ± 0,09 | 43,7 | 43,9 |
| | 09 | 44,1 ± 0,44 | 44,6 | 43,7 |
| | 10 | 44,2 ± 0,46 | 43,7 | 44,7 |

Anlage 3: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an frisch geschliffenen Holzoberflächen

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-S0-01 | 01 | 12,8 ± 0,65 | 13,5 | 12,2 |
| | 02 | 14,9 ± 1,30 | 16,2 | 13,6 |
| | 03 | 14,8 ± 1,63 | 16,5 | 13,2 |
| | 04 | 10,3 ± 0,57 | 9,7 | 10,8 |
| | 05 | 9,7 ± 0,05 | 9,8 | 9,7 |
| | 06 | 6,9 ± 2,84 | 9,8 | 4,1 |
| | 07 | 7,3 ± 2,48 | 9,8 | 4,8 |
| | 08 | 6,4 ± 2,97 | 9,4 | 3,4 |
| | 09 | 5,2 ± 1,80 | 7,0 | 3,4 |
| | 10 | 5,9 ± 1,11 | 7,0 | 4,8 |
| ES-S0-02 | 01 | 9,2 ± 0,23 | 9,4 | 9,0 |
| | 02 | 8,3 ± 1,57 | 9,9 | 6,7 |
| | 03 | 7,1 ± 0,82 | 6,3 | 7,9 |
| | 04 | 6,3 ± 0,89 | 7,2 | 5,4 |
| | 05 | 7,1 ± 0,87 | 6,2 | 7,9 |
| | 06 | 6,3 ± 1,12 | 5,2 | 7,4 |
| | 07 | 8,3 ± 0,88 | 9,2 | 7,4 |
| | 08 | 7,0 ± 0,98 | 7,9 | 6,0 |
| | 09 | 8,9 ± 0,08 | 9,0 | 8,8 |
| | 10 | 7,0 ± 0,24 | 6,8 | 7,3 |
| ES-S0-03 | 01 | 8,5 ± 1,43 | 7,0 | 9,1 |
| | 02 | 6,2 ± 2,79 | 3,4 | 9,0 |
| | 03 | 7,1 ± 3,50 | 3,6 | 1,1 |
| | 04 | 4,9 ± 2,78 | 2,1 | 7,7 |
| | 05 | 7,7 ± 3,85 | 3,8 | 11,5 |
| | 06 | 6,5 ± 0,84 | 5,7 | 7,4 |
| | 07 | 6,5 ± 3,83 | 2,6 | 10,3 |
| | 08 | 7,4 ± 5,62 | 1,8 | 13,1 |
| | 09 | 7,4 ± 1,53 | 5,8 | 8,9 |
| | 10 | 4,5 ± 2,79 | 1,7 | 7,3 |
| ES-S0-04 | 01 | 4,9 ± 1,92 | 3,0 | 6,9 |
| | 02 | 5,5 ± 2,34 | 3,1 | 7,8 |
| | 03 | 4,5 ± 1,17 | 5,6 | 3,3 |
| | 04 | 7,1 ± 0,95 | 6,1 | 8,0 |
| | 05 | 4,9 ± 2,58 | 2,3 | 7,5 |
| | 06 | 3,5 ± 0,19 | 3,3 | 3,7 |
| | 07 | 5,2 ± 1,52 | 3,7 | 6,8 |
| | 08 | 4,3 ± 3,91 | 8,3 | 0,4 |
| | 09 | 7,2 ± 3,12 | 10,3 | 4,1 |
| | 10 | 4,6 ± 1,76 | 6,4 | 2,8 |
| ES-S0-05 | 01 | 13,8 ± 9,85 | 23,6 | 3,9 |
| | 02 | 12,9 ± 7,25 | 20,2 | 5,7 |
| | 03 | 12,5 ± 0,85 | 13,4 | 11,7 |
| | 04 | 9,5 ± 2,87 | 6,6 | 12,4 |
| | 05 | 12,2 ± 6,41 | 18,6 | 5,8 |
| | 06 | 7,9 ± 0,27 | 7,6 | 8,2 |
| | 07 | 14,7 ± 2,05 | 16,7 | 12,6 |
| | 08 | 9,4 ± 6,33 | 3,1 | 15,8 |
| | 09 | 9,7 ± 1,48 | 11,2 | 8,2 |
| | 10 | 18,2 ± 3,30 | 21,5 | 11,9 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-S0-01 | 01 | 19,5 ± 3,25 | 16,3 | 22,8 |
| | 02 | 16,3 ± 2,15 | 14,1 | 18,4 |
| | 03 | 19,2 ± 1,59 | 17,1 | 20,8 |
| | 04 | 21,2 ± 5,52 | 15,7 | 26,7 |
| | 05 | 14,4 ± 1,67 | 16,1 | 12,7 |
| | 06 | 13,2 ± 2,84 | 16,0 | 10,3 |
| | 07 | 12,5 ± 6,22 | 6,2 | 18,7 |
| | 08 | 17,3 ± 4,41 | 21,7 | 12,9 |
| | 09 | 18,6 ± 3,47 | 15,1 | 22,0 |
| | 10 | 20,0 ± 2,00 | 18,0 | 22,0 |
| BU-S0-02 | 01 | 16,9 ± 3,83 | 20,7 | 13,1 |
| | 02 | 16,7 ± 0,62 | 16,0 | 17,3 |
| | 03 | 17,5 ± 1,52 | 16,0 | 19,0 |
| | 04 | 16,9 ± 2,00 | 14,9 | 18,9 |
| | 05 | 16,6 ± 1,43 | 15,2 | 18,0 |
| | 06 | 17,2 ± 2,95 | 14,3 | 20,2 |
| | 07 | 16,3 ± 1,83 | 18,2 | 14,5 |
| | 08 | 22,8 ± 1,52 | 24,3 | 21,3 |
| | 09 | 17,1 ± 2,62 | 14,3 | 19,7 |
| | 10 | 14,6 ± 0,49 | 14,1 | 14,1 |
| BU-S0-03 | 01 | 12,9 ± 1,17 | 11,7 | 14,1 |
| | 02 | 10,1 | 10,2 | 10,1 |
| | 03 | 14,4 ± 0,38 | 14,8 | 14 |
| | 04 | 13,6 ± 2,16 | 15,8 | 11,5 |
| | 05 | 11,5 ± 2,08 | 9,4 | 13,6 |
| | 06 | 11,5 ± 2,95 | 8,1 | 14,5 |
| | 07 | 11,5 ± 1,64 | 9,9 | 13,2 |
| | 08 | 16,3 ± 1,05 | 15,2 | 17,3 |
| | 09 | 10,3 ± 3,02 | 13,3 | 7,3 |
| | 10 | 12,5 ± 1,05 | 13,1 | 11,5 |
| BU-S0-04 | 01 | 10,0 ± 0,81 | 9,2 | 10,8 |
| | 02 | 10,2 ± 1,55 | 8,6 | 11,7 |
| | 03 | 9,9 ± 2,50 | 7,4 | 12,4 |
| | 04 | 12,7 ± 1,12 | 11,6 | 13,8 |
| | 05 | 13,8 ± 3,98 | 9,8 | 17,8 |
| | 06 | 14,5 ± 3,63 | 10,9 | 18,2 |
| | 07 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |
| | 08 | 11,7 ± 0,33 | 11,4 | 12 |
| | 09 | 13,0 ± 1,92 | 11,1 | 14,9 |
| | 10 | 13,0 ± 2,67 | 10,3 | 15,7 |
| BU-S0-05 | 01 | 16,7 ± 5,94 | 22,7 | 10,8 |
| | 02 | 15,9 ± 4,69 | 20,5 | 11,2 |
| | 03 | 13,0 ± 2,50 | 15,5 | 10,5 |
| | 04 | 11,9 ± 2,41 | 14,3 | 9,5 |
| | 05 | 14,5 ± 0,45 | 15 | 14,1 |
| | 06 | 12,7 ± 0,25 | 12,9 | 12,4 |
| | 07 | 13,7 ± 1,46 | 15,1 | 12,2 |
| | 08 | 11,8 ± 2,27 | 14,1 | 9,5 |
| | 09 | 15,0 ± 3,68 | 11,3 | 18,7 |
| | 10 | 12,0 ± 1,01 | 13 | 11 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-S0-01 | 01 | 25,8 ± 5,37 | 20,5 | 31,2 |
| | 02 | 19,4 ± 1,76 | 17,7 | 21,2 |
| | 03 | 17,9 ± 2,49 | 20,4 | 15,4 |
| | 04 | 23,2 ± 0,05 | 23,1 | 23,2 |
| | 05 | 23,6 ± 4,76 | 18,8 | 28,3 |
| | 06 | 25,7 ± 3,78 | 22,0 | 29,5 |
| | 07 | 19,3 ± 4,84 | 24,2 | 14,5 |
| | 08 | 18,5 ± 1,42 | 20,0 | 17,1 |
| | 09 | 15,6 ± 5,12 | 20,7 | 10,5 |
| | 10 | 14,5 ± 3,54 | 18,0 | 10,9 |
| LA-S0-02 | 01 | 21,4 ± 0,69 | 21,1 | 20,7 |
| | 02 | 21,4 ± 0,69 | 22,1 | 20,7 |
| | 03 | 14,8 ± 0,98 | 15,7 | 13,8 |
| | 04 | 19,5 ± 8,10 | 27,6 | 11,4 |
| | 05 | 7,3 ± 0,20 | 7,1 | 7,5 |
| | 06 | 7,2 ± 0,07 | 7,1 | 7,3 |
| | 07 | 7,0 ± 0,40 | 6,6 | 7,4 |
| | 08 | 11,0 ± 7,79 | 18,7 | 3,2 |
| | 09 | 10,2 ± 3,40 | 13,6 | 6,8 |
| | 10 | 7,2 ± 3,55 | 10,8 | 3,7 |
| LA-S0-03 | 01 | 20,7 ± 1,36 | 22,1 | 19,4 |
| | 02 | 19,2 ± 1,09 | 18,1 | 20,3 |
| | 03 | 16,5 ± 3,63 | 12,8 | 20,1 |
| | 04 | 17,0 ± 2,80 | 14,7 | 19,8 |
| | 05 | 15,4 ± 3,01 | 12,4 | 18,4 |
| | 06 | 14,6 ± 3,30 | 11,3 | 17,9 |
| | 07 | 14,4 ± 5,38 | 9,1 | 19,8 |
| | 08 | 16,2 ± 1,58 | 14,6 | 17,8 |
| | 09 | 14,8 ± 1,64 | 13,1 | 16,4 |
| | 10 | 14,7 ± 2,40 | 17,1 | 12,3 |
| LA-S0-04 | 01 | 20,4 ± 2,84 | 17,5 | 23,2 |
| | 02 | 20,0 ± 1,27 | 18,7 | 21,3 |
| | 03 | 16,6 ± 0,29 | 16,3 | 16,9 |
| | 04 | 17,9 ± 1,42 | 19,3 | 16,5 |
| | 05 | 12,6 ± 4,85 | 7,7 | 17,4 |
| | 06 | 10,0 ± 0,84 | 9,2 | 10,9 |
| | 07 | 9,6 ± 2,69 | 6,9 | 12,3 |
| | 08 | 10,4 ± 4,58 | 14,9 | 5,8 |
| | 09 | 13,3 ± 2,13 | 15,4 | 11,2 |
| | 10 | 10,8 ± 1,75 | 9,0 | 12,6 |
| LA-S0-05 | 01 | 14,0 ± 0,98 | 13,1 | 14,9 |
| | 02 | 16,3 ± 0,86 | 17,2 | 15,4 |
| | 03 | 14,7 ± 1,52 | 13,2 | 16,3 |
| | 04 | 14,6 ± 2,43 | 12,2 | 17,1 |
| | 05 | 18,4 ± 5,09 | 13,3 | 23,5 |
| | 06 | 9,5 ± 1,10 | 8,4 | 10,6 |
| | 07 | 12,1 ± 2,81 | 9,3 | 14,9 |
| | 08 | 11,7 ± 2,19 | 9,5 | 13,9 |
| | 09 | 11,9 ± 0,37 | 11,5 | 12,2 |
| | 10 | 13,4 ± 3,89 | 9,5 | 17,3 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-S0-01 | 01 | 34,3 ± 7,60 | 26,7 | 41,9 |
| | 02 | 32,1 ± 0,95 | 33,1 | 31,2 |
| | 03 | 32,4 ± 1,56 | 30,9 | 34,0 |
| | 04 | 32,1 ± 2,80 | 29,3 | 34,9 |
| | 05 | 32,1 ± 2,46 | 29,6 | 34,5 |
| | 06 | 30,2 ± 2,97 | 27,3 | 33,2 |
| | 07 | 24,1 ± 1,07 | 25,2 | 23,1 |
| | 08 | 26,1 ± 4,71 | 21,4 | 30,8 |
| | 09 | 23,2 ± 1,22 | 20,0 | 24,4 |
| | 10 | 22,1 ± 0,33 | 21,7 | 22,4 |
| DG-S0-02 | 01 | 29,4 ± 2,37 | 27,0 | 31,8 |
| | 02 | 29,4 ± 2,37 | 27,0 | 31,8 |
| | 03 | 23,7 ± 0,48 | 24,1 | 23,2 |
| | 04 | 17,1 ± 3,76 | 20,8 | 13,3 |
| | 05 | 28,9 ± 1,30 | 27,6 | 30,2 |
| | 06 | 30,2 ± 0,32 | 30,5 | 29,9 |
| | 07 | 25,8 ± 0,11 | 25,7 | 25,9 |
| | 08 | 21,8 ± 3,38 | 18,4 | 25,2 |
| | 09 | 20,9 ± 7,45 | 13,6 | 28,4 |
| | 10 | 15,8 ± 2,07 | 17,8 | 13,7 |
| DG-S0-03 | 01 | 25,2 ± 4,01 | 21,2 | 29,2 |
| | 02 | 24,7 ± 0,54 | 25,3 | 24,2 |
| | 03 | 21,4 ± 2,46 | 18,9 | 23,8 |
| | 04 | 19,7 ± 1,77 | 18,0 | 21,5 |
| | 05 | 24,1 ± 1,53 | 22,1 | 25,7 |
| | 06 | 24,2 ± 0,38 | 24,1 | 20,9 |
| | 07 | 20,0 ± 0,67 | 20,7 | 19,4 |
| | 08 | 14,3 ± 0,65 | 13,6 | 14,9 |
| | 09 | 16,4 ± 2,45 | 14 | 18,9 |
| | 10 | 10,7 ± 5,27 | 16 | 5,3 |
| DG-S0-04 | 01 | 21,9 ± 9,53 | 12,4 | 31,5 |
| | 02 | 17,7 ± 3,45 | 14,2 | 21,1 |
| | 03 | 14,3 ± 2,50 | 11,7 | 16,8 |
| | 04 | 18,8 ± 2,21 | 21,0 | 16,1 |
| | 05 | 19,2 ± 0,28 | 19,5 | 18,9 |
| | 06 | 16,9 ± 0,10 | 16,8 | 17,0 |
| | 07 | 16,0 ± 0,92 | 15,0 | 16,9 |
| | 08 | 17,1 ± 1,31 | 18,5 | 15,8 |
| | 09 | 12,7 ± 1,32 | 14,0 | 11,3 |
| | 10 | 13,8 ± 0,87 | 13,0 | 14,7 |
| DG-S0-05 | 01 | 23,5 ± 5,34 | 18,1 | 28,8 |
| | 02 | 24,8 ± 1,66 | 23,2 | 26,5 |
| | 03 | 25,6 ± 5,33 | 30,9 | 20,2 |
| | 04 | 19,2 ± 2,22 | 17,0 | 21,5 |
| | 05 | 23,9 ± 3,03 | 20,8 | 26,9 |
| | 06 | 20,2 ± 2,21 | 18,0 | 22,4 |
| | 07 | 16,7 ± 4,80 | 11,9 | 21,5 |
| | 08 | 21,7 ± 0,18 | 21,5 | 21,9 |
| | 09 | 21,0 ± 5,57 | 15,4 | 26,6 |
| | 10 | 23,4 ± 3,38 | 20,0 | 26,8 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-S0-01 | 01 | 15.4 ± 1.18 | 14,2 | 16,6 |
| | 02 | 15.8 ± 2.99 | 18,8 | 12,8 |
| | 03 | 15.4 ± 0.28 | 15,1 | 15,6 |
| | 04 | 11.5 ± 2.52 | 9,0 | 14,0 |
| | 05 | 13.6 ± 2.19 | 11,4 | 15,8 |
| | 06 | 15.1 ± 2.43 | 12,7 | 17,6 |
| | 07 | 12.7 ± 3.25 | 9,4 | 15,9 |
| | 08 | 16.4 ± 0.44 | 16,0 | 16,9 |
| | 09 | 11.0 ± 6.01 | 17,0 | 5,0 |
| | 10 | 17.6 ± 0.28 | 17,9 | 17,4 |
| FI-S0-02 | 01 | 13.7 ± 3.35 | 17,1 | 10,4 |
| | 02 | 10.5 ± 0.74 | 11,0 | 9,8 |
| | 03 | 14.2 ± 0.36 | 13,9 | 14,6 |
| | 04 | 17.8 ± 4.35 | 22,0 | 13,4 |
| | 05 | 19.2 ± 5.24 | 24,0 | 13,9 |
| | 06 | 19.8 ± 2.98 | 22,1 | 16,9 |
| | 07 | 32.6 ± 5.62 | 27,0 | 38,2 |
| | 08 | 13.9 ± 1.75 | 12,0 | 15,7 |
| | 09 | 15.1 ± 3.50 | 11,1 | 18,6 |
| | 10 | 18.1 ± 4.77 | 22,1 | 13,3 |
| FI-S0-03 | 01 | 17.6 ± 5.32 | 22,1 | 12,3 |
| | 02 | 20.9 ± 3.28 | 17,1 | 24,2 |
| | 03 | 17.9 ± 0.46 | 18,0 | 17,4 |
| | 04 | 18.4 ± 1.61 | 16,1 | 20,0 |
| | 05 | 16.6 ± 0.40 | 16,0 | 17,0 |
| | 06 | 19.8 ± 0.64 | 20,1 | 19,2 |
| | 07 | 19.9 ± 5.05 | 14,1 | 14,8 |
| | 08 | 15.1 ± 2.87 | 12,0 | 18,0 |
| | 09 | 18.2 ± 2.15 | 16,0 | 20,3 |
| | 10 | 17.4 ± 1.64 | 15,1 | 19,0 |
| FI-S0-04 | 01 | 22.6 ± 4.16 | 18,05 | 16,8 |
| | 02 | 31.0 ± 2.94 | 28,1 | 33,9 |
| | 03 | 25.6 ± 5.59 | 31,01 | 20,0 |
| | 04 | 13.1 ± 0.53 | 13,6 | 12,5 |
| | 05 | 23.8 ± 6.78 | 17,0 | 30,6 |
| | 06 | 17.3 ± 6.46 | 23,7 | 10,8 |
| | 07 | 18.8 ± 1.96 | 16,8 | 20,7 |
| | 08 | 28.6 ± 7.25 | 21,04 | 35,8 |
| | 09 | 26.8 ± 5.48 | 21,03 | 32,3 |
| | 10 | 22.6 ± 4.16 | 18,05 | 26,8 |
| FI-S0-05 | 01 | 16.7 ± 6.64 | 23,0 | 10,0 |
| | 02 | 11.5 ± 0.50 | 12,0 | 11,0 |
| | 03 | 12.4 ± 3.57 | 15,1 | 8,8 |
| | 04 | 16.7 ± 5.94 | 22,1 | 10,8 |
| | 05 | 14.1 ± 1.43 | 15,1 | 12,7 |
| | 06 | 19.9 ± 1.85 | 21,1 | 18,1 |
| | 07 | 21.7 ± 5.94 | 27,1 | 15,7 |
| | 08 | 22.5 ± 9.11 | 31,6 | 13,4 |
| | 09 | 5.4 ± 1.71 | 7,0 | 3,1 |
| | 10 | 11.5 ± 0.06 | 11,1 | 11,5 |

Anlage 4: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an den 24-stündig gelagerten Holzoberflächen

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|-----------------|-------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-H24-01 | 01 | 51,9 ± 1,84 | 53,8 | 50,1 |
| | 02 | 48,9 ± 0,30 | 48,6 | 49,2 |
| | 03 | 53,2 ± 2,16 | 55,4 | 51,1 |
| | 04 | 47,5 ± 3,56 | 51,0 | 43,9 |
| | 05 | 47,5 ± 3,56 | 51,0 | 43,9 |
| | 06 | 51,3 ± 0,67 | 52,0 | 50,7 |
| | 07 | 54,9 ± 1,95 | 53,0 | 56,9 |
| | 08 | 57,7 ± 3,63 | 54,1 | 61,3 |
| | 09 | 57,8 ± 1,09 | 56,7 | 58,8 |
| | 10 | 57,3 ± 0,87 | 56,4 | 58,2 |
| ES-H24-02 | 01 | 48,5 ± 1,86 | 50,3 | 46,6 |
| | 02 | 47,6 ± 2,85 | 50,5 | 44,8 |
| | 03 | 43,8 ± 2,85 | 46,6 | 40,9 |
| | 04 | 40,4 ± 0,99 | 41,4 | 39,4 |
| | 05 | 42,2 ± 0,35 | 42,5 | 41,8 |
| | 06 | 40,9 ± 0,36 | 41,3 | 40,5 |
| | 07 | 35,8 ± 3,15 | 38,9 | 32,6 |
| | 08 | 34,5 ± 5,34 | 39,9 | 29,2 |
| | 09 | 37,9 ± 3,32 | 41,2 | 34,6 |
| | 10 | 39,6 ± 5,57 | 45,1 | 34 |
| ES-H24-03 | 01 | 53,3 ± 1,63 | 54,9 | 51,6 |
| | 02 | 51,4 ± 0,86 | 52,2 | 50,5 |
| | 03 | 50,2 ± 0,48 | 49,7 | 50,7 |
| | 04 | 49,0 ± 0,65 | 48,3 | 49,6 |
| | 05 | 47,0 ± 0,85 | 46,2 | 47,9 |
| | 06 | 47,7 ± 0,70 | 48,4 | 47,0 |
| | 07 | 47,3 ± 1,56 | 48,9 | 45,7 |
| | 08 | 48,1 ± 1,56 | 49,6 | 46,5 |
| | 09 | 47,8 ± 3,40 | 51,2 | 44,4 |
| | 10 | 46,1 ± 2,73 | 48,9 | 43,4 |
| ES-H24-04 | 01 | 48,9 ± 1,18 | 47,7 | 50,1 |
| | 02 | 44,6 ± 0,62 | 44,0 | 45,3 |
| | 03 | 42,1 ± 0,18 | 41,9 | 42,3 |
| | 04 | 42,4 ± 1,05 | 43,5 | 41,4 |
| | 05 | 42,2 ± 0,39 | 42,6 | 41,8 |
| | 06 | 43,9 ± 1,26 | 42,6 | 45,1 |
| | 07 | 45,0 ± 1,47 | 43,5 | 46,5 |
| | 08 | 41,8 ± 0,53 | 42,3 | 41,3 |
| | 09 | 40,5 ± 0,56 | 41,1 | 40,0 |
| | 10 | 41,3 ± 0,62 | 41,9 | 40,6 |
| ES-H24-05 | 01 | 50,5 ± 2,40 | 52,9 | 48,1 |
| | 02 | 50,8 ± 1,34 | 52,2 | 49,5 |
| | 03 | 49,6 ± 1,57 | 51,1 | 48,0 |
| | 04 | 45,1 ± 4,17 | 49,3 | 40,9 |
| | 05 | 45,6 ± 3,36 | 48,9 | 42,2 |
| | 06 | 46,1 ± 0,73 | 46,8 | 45,3 |
| | 07 | 45,8 ± 1,28 | 44,5 | 47,1 |
| | 08 | 47,1 ± 1,02 | 46,1 | 48,1 |
| | 09 | 48,6 ± 2,41 | 46,1 | 51,0 |
| | 10 | 48,1 ± 2,90 | 45,2 | 51,0 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-H24-01 | 01 | 57,2 ± 0,88 | 56,3 | 58,1 |
| | 02 | 57,2 ± 0,88 | 56,3 | 58,1 |
| | 03 | 65,2 ± 0,39 | 64,8 | 65,6 |
| | 04 | 67,0 ± 9,48 | 76,5 | 57,5 |
| | 05 | 62,6 ± 2,77 | 65,4 | 59,9 |
| | 06 | 55,0 ± 3,17 | 58,2 | 51,9 |
| | 07 | 50,7 ± 2,30 | 48,4 | 53,0 |
| | 08 | 51,6 ± 0,35 | 52,0 | 51,3 |
| | 09 | 58,2 ± 6,65 | 51,5 | 64,8 |
| | 10 | 56,9 ± 1,46 | 55,5 | 58,4 |
| BU-H24-02 | 01 | 55,7 ± 1,14 | 54,5 | 56,8 |
| | 02 | 52,4 ± 1,08 | 53,5 | 51,3 |
| | 03 | 52,3 ± 3,81 | 48,5 | 56,1 |
| | 04 | 47,3 ± 1,15 | 48,4 | 46,1 |
| | 05 | 51,0 ± 1,12 | 49,9 | 52,1 |
| | 06 | 46,9 ± 2,99 | 49,9 | 43,9 |
| | 07 | 49,9 ± 1,10 | 51,0 | 48,8 |
| | 08 | 48,7 ± 1,07 | 49,8 | 47,7 |
| | 09 | 51,0 ± 0,54 | 51,5 | 50,4 |
| | 10 | 49,9 ± 0,23 | 50,1 | 49,7 |
| BU-H24-03 | 01 | 51,0 ± 4,15 | 46,8 | 55,1 |
| | 02 | 57,5 ± 9,40 | 48,1 | 66,9 |
| | 03 | 51,3 ± 1,35 | 50,0 | 52,7 |
| | 04 | 56,6 ± 0,61 | 56,0 | 57,2 |
| | 05 | 73,4 ± 3,70 | 69,7 | 77,1 |
| | 06 | 70,5 ± 6,59 | 77,1 | 63,9 |
| | 07 | 67,3 ± 0,82 | 66,5 | 68,1 |
| | 08 | 70,2 ± 2,49 | 67,7 | 72,7 |
| | 09 | 70,1 ± 1,01 | 71,1 | 69,1 |
| | 10 | 58,8 ± 5,13 | 63,9 | 53,7 |
| BU-H24-04 | 01 | 57,2 ± 4,30 | 61,5 | 52,9 |
| | 02 | 57,1 ± 5,52 | 62,6 | 51,5 |
| | 03 | 56,9 ± 3,26 | 60,1 | 53,6 |
| | 04 | 52,1 ± 4,20 | 56,3 | 47,9 |
| | 05 | 55,3 ± 3,11 | 58,4 | 52,2 |
| | 06 | 59,7 ± 0,86 | 58,9 | 60,6 |
| | 07 | 63,7 ± 4,20 | 59,5 | 67,9 |
| | 08 | 61,8 ± 3,64 | 65,4 | 58,1 |
| | 09 | 65,9 ± 3,32 | 69,2 | 62,6 |
| | 10 | 63,7 ± 0,96 | 64,7 | 62,8 |
| BU-H24-05 | 01 | 59,5 ± 9,34 | 68,8 | 50,2 |
| | 02 | 58,0 ± 6,95 | 64,9 | 51 |
| | 03 | 55,6 ± 5,50 | 61,1 | 50,1 |
| | 04 | 50,4 ± 1,77 | 52,1 | 48,6 |
| | 05 | 64,0 ± 5,06 | 58,9 | 69 |
| | 06 | 59,8 ± 6,01 | 53,8 | 65,8 |
| | 07 | 56,3 ± 1,56 | 54,7 | 57,9 |
| | 08 | 53,5 ± 2,09 | 55,6 | 51,4 |
| | 09 | 53,7 ± 3,43 | 57,1 | 50,2 |
| | 10 | 49,1 ± 1,30 | 50,4 | 47,8 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-H24-01 | 01 | 58,4 ± 0,58 | 57,8 | 59 |
| | 02 | 64,1 ± 1,95 | 66,0 | 62,1 |
| | 03 | 57,4 ± 0,59 | 58,0 | 56,8 |
| | 04 | 58,3 ± 2,89 | 61,2 | 55,5 |
| | 05 | 61,4 ± 4,35 | 65,7 | 57,0 |
| | 06 | 58,3 ± 2,98 | 61,3 | 55,3 |
| | 07 | 57,2 ± 3,59 | 60,8 | 53,6 |
| | 08 | 56,9 ± 2,17 | 59,1 | 54,7 |
| | 09 | 61,6 ± 2,22 | 63,8 | 59,4 |
| | 10 | 57,9 ± 3,65 | 61,6 | 54,3 |
| LA-H24-02 | 01 | 48,5 ± 3,44 | 45,1 | 52,0 |
| | 02 | 48,5 ± 3,44 | 45,1 | 52,0 |
| | 03 | 46,2 ± 5,05 | 41,2 | 51,3 |
| | 04 | 49,6 ± 0,38 | 49,2 | 50,0 |
| | 05 | 50,4 ± 3,29 | 53,7 | 47,2 |
| | 06 | 49,6 ± 1,22 | 50,8 | 48,4 |
| | 07 | 46,1 ± 2,04 | 44,0 | 48,1 |
| | 08 | 45,5 ± 6,22 | 39,3 | 51,7 |
| | 09 | 42,2 ± 0,06 | 42,3 | 42,1 |
| | 10 | 42,4 ± 3,74 | 46,1 | 38,6 |
| LA-H24-03 | 01 | 45,0 ± 2,95 | 48,0 | 42,1 |
| | 02 | 45,9 ± 2,70 | 48,6 | 43,2 |
| | 03 | 46,8 ± 0,30 | 46,5 | 47,1 |
| | 04 | 48,6 ± 0,46 | 49,0 | 48,1 |
| | 05 | 45,8 ± 1,62 | 44,2 | 47,5 |
| | 06 | 38,8 ± 1,33 | 40,1 | 37,5 |
| | 07 | 44,1 ± 1,05 | 45,2 | 43,1 |
| | 08 | 43,4 ± 3,24 | 46,7 | 40,2 |
| | 09 | 45,9 ± 1,09 | 47,0 | 44,8 |
| | 10 | 42,9 ± 2,55 | 45,5 | 40,4 |
| LA-H24-04 | 01 | 46,1 ± 0,90 | 45,2 | 47 |
| | 02 | 40,9 ± 0,48 | 41,4 | 40,5 |
| | 03 | 38,2 ± 1,65 | 39,8 | 36,5 |
| | 04 | 39,3 ± 0,71 | 40,0 | 38,5 |
| | 05 | 38,9 ± 0,57 | 38,4 | 39,5 |
| | 06 | 36,7 ± 5,09 | 31,6 | 41,7 |
| | 07 | 35,3 ± 7,05 | 28,3 | 42,4 |
| | 08 | 31,9 ± 6,56 | 25,3 | 38,5 |
| | 09 | 31,1 ± 4,54 | 26,3 | 35,6 |
| | 10 | 32,7 ± 3,66 | 29 | 36,3 |
| LA-H24-05 | 01 | 44,9 ± 4,01 | 48,9 | 40,9 |
| | 02 | 44,4 ± 3,65 | 48,0 | 40,7 |
| | 03 | 42,2 ± 7,51 | 49,7 | 34,7 |
| | 04 | 43,4 ± 7,03 | 50,4 | 36,4 |
| | 05 | 39,9 ± 4,48 | 44,4 | 35,4 |
| | 06 | 42,4 ± 1,54 | 43,9 | 40,9 |
| | 07 | 47,6 ± 4,72 | 52,3 | 42,8 |
| | 08 | 45,3 ± 3,94 | 49,2 | 41,3 |
| | 09 | 47,5 ± 1,41 | 48,9 | 46,1 |
| | 10 | 46,9 ± 1,87 | 48,7 | 45,0 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-H24-01 | 01 | 51,5 ± 1,06 | 50,5 | 52,6 |
| | 02 | 59,9 ± 2,66 | 57,3 | 62,6 |
| | 03 | 56,5 ± 6,71 | 49,8 | 63,2 |
| | 04 | 55,0 ± 2,98 | 52,0 | 57,9 |
| | 05 | 52,7 ± 3,06 | 55,8 | 49,7 |
| | 06 | 54,7 ± 4,25 | 58,9 | 50,4 |
| | 07 | 57,5 ± 6,20 | 63,7 | 51,3 |
| | 08 | 53,3 ± 5,48 | 58,8 | 47,8 |
| | 09 | 52,5 ± 4,57 | 57,1 | 48,0 |
| | 10 | 50,9 ± 5,91 | 56,8 | 45,0 |
| DG-H24-02 | 01 | 51,5 ± 0,13 | 51,6 | 51,3 |
| | 02 | 51,7 ± 0,90 | 52,6 | 50,8 |
| | 03 | 54,5 ± 0,25 | 54,8 | 54,3 |
| | 04 | 56,1 ± 6,36 | 62,5 | 49,7 |
| | 05 | 55,2 ± 3,96 | 59,2 | 51,3 |
| | 06 | 55,8 ± 7,16 | 63,0 | 48,7 |
| | 07 | 57,2 ± 6,51 | 63,7 | 50,7 |
| | 08 | 54,7 ± 5,43 | 60,1 | 49,3 |
| | 09 | 58,2 ± 9,46 | 67,6 | 48,7 |
| | 10 | 55,1 ± 7,55 | 62,6 | 47,5 |
| DG-H24-03 | 01 | 67,6 ± 4,27 | 71,9 | 63,3 |
| | 02 | 68,2 ± 3,25 | 71,4 | 64,9 |
| | 03 | 66,9 ± 3,71 | 70,6 | 63,2 |
| | 04 | 66,5 ± 1,14 | 67,6 | 65,3 |
| | 05 | 58,8 ± 0,52 | 58,3 | 59,3 |
| | 06 | 60,3 ± 0,97 | 61,3 | 59,4 |
| | 07 | 61,4 ± 1,86 | 63,3 | 59,5 |
| | 08 | 67,2 ± 1,12 | 66,1 | 68,3 |
| | 09 | 66,2 ± 1,77 | 64,5 | 68 |
| | 10 | 68,8 ± 6,08 | 74,9 | 62,7 |
| DG-H24-04 | 01 | 60,9 ± 2,33 | 58,5 | 63,2 |
| | 02 | 62,0 ± 2,85 | 59,2 | 64,9 |
| | 03 | 59,6 ± 3,72 | 55,9 | 63,4 |
| | 04 | 60,5 ± 3,84 | 56,7 | 64,4 |
| | 05 | 64,9 ± 3,05 | 61,8 | 67,9 |
| | 06 | 60,9 ± 6,38 | 54,6 | 67,3 |
| | 07 | 57,8 ± 4,02 | 53,8 | 61,9 |
| | 08 | 54,5 ± 4,57 | 50,0 | 59,1 |
| | 09 | 57,7 ± 1,80 | 55,9 | 59,5 |
| | 10 | 57,3 ± 1,12 | 56,2 | 58,4 |
| DG-H24-05 | 01 | 58,1 ± 0,62 | 57,5 | 58,7 |
| | 02 | 56,5 ± 1,42 | 55,0 | 57,9 |
| | 03 | 55,8 ± 2,16 | 53,6 | 57,9 |
| | 04 | 55,2 ± 0,28 | 55,5 | 55,0 |
| | 05 | 55,2 ± 2,04 | 57,2 | 53,2 |
| | 06 | 50,3 ± 2,36 | 52,7 | 48,0 |
| | 07 | 51,5 ± 2,81 | 54,3 | 48,7 |
| | 08 | 51,5 ± 3,49 | 55,0 | 48,1 |
| | 09 | 50,0 ± 3,10 | 53,1 | 46,9 |
| | 10 | 50,3 ± 1,63 | 52,0 | 48,7 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-H24-01 | 01 | 38,6 ± 4,42 | 43,0 | 34,1 |
| | 02 | 40,4 ± 4,37 | 44,7 | 36,0 |
| | 03 | 42,0 ± 3,03 | 45,0 | 39,0 |
| | 04 | 41,8 ± 1,89 | 43,7 | 39,9 |
| | 05 | 39,1 ± 2,92 | 42,0 | 36,2 |
| | 06 | 38,3 ± 2,85 | 41,2 | 35,5 |
| | 07 | 34,4 ± 4,16 | 38,6 | 30,3 |
| | 08 | 33,1 ± 4,10 | 37,2 | 29,0 |
| | 09 | 34,9 ± 0,37 | 34,5 | 35,2 |
| | 10 | 39,1 ± 3,79 | 35,3 | 42,9 |
| FI-H24-02 | 01 | 48,1 ± 7,47 | 55,6 | 40,6 |
| | 02 | 42,9 ± 0,54 | 42,3 | 43,4 |
| | 03 | 41,4 ± 2,04 | 39,3 | 43,4 |
| | 04 | 38,8 ± 0,93 | 37,9 | 39,7 |
| | 05 | 34,3 ± 2,00 | 36,3 | 32,3 |
| | 06 | 34,8 ± 2,23 | 37,0 | 32,6 |
| | 07 | 35,0 ± 3,57 | 38,5 | 31,4 |
| | 08 | 36,3 ± 1,62 | 37,9 | 34,6 |
| | 09 | 38,8 ± 2,43 | 36,4 | 41,2 |
| | 10 | 36,9 ± 1,98 | 35,0 | 38,9 |
| FI-H24-03 | 01 | 41,3 ± 4,74 | 36,6 | 46,1 |
| | 02 | 47,2 ± 2,25 | 45,0 | 49,5 |
| | 03 | 42,2 ± 3,38 | 38,8 | 45,6 |
| | 04 | 43,3 ± 2,32 | 41,0 | 45,7 |
| | 05 | 40,2 ± 2,72 | 37,5 | 42,9 |
| | 06 | 40,8 ± 1,68 | 39,1 | 42,5 |
| | 07 | 40,4 ± 1,21 | 39,1 | 41,6 |
| | 08 | 38,4 ± 0,10 | 38,3 | 38,5 |
| | 09 | 41,2 ± 2,31 | 38,9 | 43,5 |
| | 10 | 37,5 ± 3,11 | 34,4 | 40,6 |
| FI-H24-04 | 01 | 36,8 ± 3,45 | 33,3 | 40,2 |
| | 02 | 35,4 ± 1,08 | 34,3 | 36,4 |
| | 03 | 35,6 ± 1,19 | 36,8 | 34,4 |
| | 04 | 37,7 ± 1,25 | 39,0 | 36,5 |
| | 05 | 36,9 ± 4,24 | 41,2 | 32,7 |
| | 06 | 35,9 ± 4,56 | 40,5 | 31,4 |
| | 07 | 37,1 ± 4,23 | 41,4 | 32,9 |
| | 08 | 34,7 ± 2,82 | 37,5 | 31,9 |
| | 09 | 37,1 ± 3,15 | 40,2 | 33,9 |
| | 10 | 36,9 ± 1,62 | 38,5 | 35,2 |
| FI-H24-05 | 01 | 51,5 ± 3,48 | 48,0 | 55,0 |
| | 02 | 51,7 ± 4,00 | 47,7 | 55,7 |
| | 03 | 53,3 ± 2,68 | 50,7 | 56,0 |
| | 04 | 51,9 ± 0,99 | 50,9 | 52,9 |
| | 05 | 53,6 ± 0,81 | 52,8 | 54,5 |
| | 06 | 51,4 ± 3,84 | 47,6 | 55,2 |
| | 07 | 50,0 ± 1,50 | 48,5 | 51,5 |
| | 08 | 45,7 ± 2,94 | 42,8 | 48,7 |
| | 09 | 47,2 ± 0,50 | 46,7 | 47,7 |
| | 10 | 52,2 ± 2,86 | 55,1 | 49,4 |

Anlage 5: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an den 7-tägig gelagerten Holzoberflächen

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-H7-01 | 01 | 49,6 ± 3,00 | 46,6 | 52,6 |
| | 02 | 43,6 ± 4,01 | 39,6 | 47,6 |
| | 03 | 44,2 ± 3,10 | 41,1 | 47,3 |
| | 04 | 44,2 ± 4,02 | 40,2 | 48,2 |
| | 05 | 43,1 ± 4,65 | 38,4 | 47,7 |
| | 06 | 43,3 ± 2,74 | 40,6 | 46,0 |
| | 07 | 46,1 ± 3,07 | 43,0 | 49,1 |
| | 08 | 43,0 ± 6,52 | 36,5 | 49,6 |
| | 09 | 33,1 ± 3,55 | 29,6 | 36,7 |
| | 10 | 24,2 ± 0,36 | 23,8 | 24,5 |
| ES-H7-02 | 01 | 44,6 ± 0,90 | 43,7 | 45,5 |
| | 02 | 42,6 ± 3,50 | 46,1 | 39,1 |
| | 03 | 41,4 ± 2,13 | 43,6 | 39,3 |
| | 04 | 38,5 ± 1,08 | 37,4 | 39,5 |
| | 05 | 41,0 ± 1,90 | 39,1 | 42,8 |
| | 06 | 41,1 ± 1,19 | 39,9 | 42,3 |
| | 07 | 41,3 ± 4,29 | 45,6 | 37,0 |
| | 08 | 40,4 ± 0,92 | 39,5 | 41,3 |
| | 09 | 44,1 ± 1,33 | 45,5 | 42,8 |
| | 10 | 46,2 ± 0,39 | 46,6 | 45,8 |
| ES-H7-03 | 01 | 44,9 ± 1,05 | 45,9 | 43,8 |
| | 02 | 43,6 ± 1,35 | 42,3 | 45,0 |
| | 03 | 45,0 ± 2,52 | 47,5 | 42,5 |
| | 04 | 47,0 ± 0,18 | 47,1 | 46,8 |
| | 05 | 42,3 ± 3,05 | 45,4 | 39,3 |
| | 06 | 42,8 ± 1,15 | 41,7 | 44,0 |
| | 07 | 40,9 ± 1,08 | 42,0 | 39,8 |
| | 08 | 41,5 ± 1,08 | 40,4 | 42,6 |
| | 09 | 38,4 ± 1,55 | 39,9 | 36,8 |
| | 10 | 38,8 ± 0,09 | 38,9 | 38,7 |
| ES-H7-04 | 01 | 43,3 ± 6,27 | 49,6 | 37,1 |
| | 02 | 39,2 ± 4,59 | 43,8 | 34,6 |
| | 03 | 42,8 ± 4,94 | 47,7 | 37,8 |
| | 04 | 42,6 ± 5,91 | 48,5 | 36,7 |
| | 05 | 44,9 ± 3,51 | 48,4 | 41,4 |
| | 06 | 42,7 ± 5,24 | 48,0 | 37,5 |
| | 07 | 43,8 ± 3,34 | 47,1 | 40,4 |
| | 08 | 42,1 ± 2,81 | 44,9 | 39,3 |
| | 09 | 40,8 ± 4,72 | 45,6 | 36,1 |
| | 10 | 39,2 ± 2,27 | 41,4 | 36,9 |
| ES-H7-05 | 01 | 51,6 ± 0,40 | 51,2 | 52,0 |
| | 02 | 47,1 ± 3,16 | 44,0 | 50,3 |
| | 03 | 51,6 ± 0,87 | 52,5 | 50,7 |
| | 04 | 48,6 ± 2,20 | 46,4 | 50,8 |
| | 05 | 51,4 | 51,4 | 51,4 |
| | 06 | 49,5 ± 2,32 | 51,8 | 47,1 |
| | 07 | 48,3 ± 3,52 | 51,8 | 44,8 |
| | 08 | 50,6 ± 1,81 | 52,4 | 48,8 |
| | 09 | 51,4 ± 3,73 | 55,1 | 47,7 |
| | 10 | 50,1 ± 0,46 | 50,6 | 49,6 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-H7-01 | 01 | 67,5 ± 2,12 | 69,6 | 65,4 |
| | 02 | 55,3 ± 2,68 | 52,6 | 58,0 |
| | 03 | 66,1 ± 6,38 | 59,7 | 72,5 |
| | 04 | 60,8 ± 2,16 | 58,6 | 62,9 |
| | 05 | 61,0 ± 1,66 | 62,7 | 59,3 |
| | 06 | 57,0 ± 2,80 | 54,2 | 59,8 |
| | 07 | 60,4 ± 2,02 | 58,4 | 62,4 |
| | 08 | 56,6 ± 2,20 | 58,8 | 54,4 |
| | 09 | 56,4 ± 2,00 | 58,4 | 54,4 |
| | 10 | 50,4 ± 1,08 | 49,3 | 51,4 |
| BU-H7-02 | 01 | 58,5 ± 0,37 | 58,9 | 58,1 |
| | 02 | 58,7 ± 2,56 | 61,3 | 56,1 |
| | 03 | 55,5 ± 1,75 | 57,2 | 53,7 |
| | 04 | 46,1 ± 2,88 | 43,2 | 49,0 |
| | 05 | 50,9 ± 2,06 | 48,8 | 52,9 |
| | 06 | 50,8 ± 1,95 | 48,8 | 52,7 |
| | 07 | 56,4 ± 6,88 | 63,3 | 49,5 |
| | 08 | 58,1 | 58,1 | 58,1 |
| | 09 | 57,7 ± 2,82 | 60,6 | 54,9 |
| | 10 | 50,3 ± 4,81 | 45,5 | 55,1 |
| BU-H7-03 | 01 | 52,4 ± 5,28 | 57,7 | 47,1 |
| | 02 | 61,3 ± 1,68 | 63 | 59,6 |
| | 03 | 59,2 | 59,1 | 59,2 |
| | 04 | 55,5 ± 4,81 | 60,4 | 50,7 |
| | 05 | 47,6 ± 2,67 | 44,9 | 50,2 |
| | 06 | 52,3 ± 1,18 | 53,5 | 51,1 |
| | 07 | 57,0 ± 5,76 | 62,7 | 51,2 |
| | 08 | 46,9 ± 4,24 | 42,7 | 51,2 |
| | 09 | 50,7 ± 1,90 | 48,8 | 52,6 |
| | 10 | 51,5 ± 4,56 | 46,9 | 56,0 |
| BU-H7-04 | 01 | 57,0 ± 0,58 | 56,4 | 57,6 |
| | 02 | 60,9 ± 2,30 | 58,6 | 63,2 |
| | 03 | 60,8 ± 3,50 | 57,2 | 64,3 |
| | 04 | 62,7 ± 1,38 | 64,1 | 61,3 |
| | 05 | 58,2 ± 3,94 | 54,2 | 62,1 |
| | 06 | 62,1 ± 8,09 | 54,0 | 70,2 |
| | 07 | 66,0 ± 0,51 | 66,5 | 65,5 |
| | 08 | 68,6 ± 2,49 | 66,1 | 71,1 |
| | 09 | 67,6 ± 0,26 | 67,3 | 67,8 |
| | 10 | 62,8 ± 4,34 | 67,1 | 58,4 |
| BU-H7-05 | 01 | 58,0 ± 2,10 | 55,9 | 60,1 |
| | 02 | 61,9 ± 2,13 | 64 | 59,8 |
| | 03 | 63,2 ± 1,71 | 64,9 | 61,5 |
| | 04 | 62,9 ± 2,19 | 65,1 | 60,7 |
| | 05 | 55,5 ± 4,25 | 51,3 | 59,8 |
| | 06 | 60,5 ± 0,56 | 61,1 | 59,9 |
| | 07 | 59,7 ± 0,52 | 60,2 | 59,2 |
| | 08 | 56,5 ± 1,61 | 54,9 | 58,1 |
| | 09 | 57,5 ± 2,74 | 54,8 | 60,3 |
| | 10 | 58,8 ± 2,78 | 56,0 | 61,6 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-H7-01 | 01 | 53,2 ± 0,09 | 53,3 | 53,1 |
| | 02 | 50,2 ± 2,20 | 52,4 | 48,0 |
| | 03 | 48,7 ± 0,96 | 49,6 | 47,7 |
| | 04 | 49,7 ± 0,63 | 50,3 | 49,1 |
| | 05 | 51,2 ± 1,68 | 52,9 | 49,5 |
| | 06 | 53,5 ± 2,16 | 55,7 | 51,4 |
| | 07 | 52,7 ± 0,58 | 52,1 | 53,2 |
| | 08 | 51,0 ± 3,21 | 47,8 | 54,2 |
| | 09 | 50,3 ± 2,32 | 48,0 | 52,7 |
| | 10 | 50,0 ± 4,35 | 45,6 | 54,3 |
| LA-H7-02 | 01 | 41,5 ± 0,54 | 41 | 42,1 |
| | 02 | 39,2 ± 0,49 | 38,7 | 39,7 |
| | 03 | 39,0 ± 0,64 | 39,6 | 38,4 |
| | 04 | 38,2 ± 0,42 | 37,8 | 38,6 |
| | 05 | 37,8 | 37,8 | 37,8 |
| | 06 | 39,1 ± 0,47 | 38,6 | 39,5 |
| | 07 | 38,6 ± 0,43 | 39,0 | 38,2 |
| | 08 | 36,8 ± 2,88 | 33,9 | 39,7 |
| | 09 | 40,3 ± 2,86 | 37,4 | 43,1 |
| | 10 | 40,4 ± 4,55 | 35,9 | 45,0 |
| LA-H7-03 | 01 | 44,5 ± 1,69 | 46,2 | 42,8 |
| | 02 | 47,4 ± 3,62 | 51,0 | 43,8 |
| | 03 | 48,5 ± 4,19 | 52,7 | 44,3 |
| | 04 | 47,3 ± 5,42 | 52,7 | 41,9 |
| | 05 | 46,1 ± 5,51 | 51,6 | 40,6 |
| | 06 | 43,3 ± 2,18 | 45,5 | 41,1 |
| | 07 | 43,9 ± 0,21 | 43,7 | 44,1 |
| | 08 | 44,5 ± 0,47 | 44,1 | 45,0 |
| | 09 | 45,6 ± 0,96 | 46,6 | 44,6 |
| | 10 | 44,9 ± 0,21 | 44,7 | 45,1 |
| LA-H7-04 | 01 | 49,9 ± 2,25 | 47,6 | 52,1 |
| | 02 | 57,5 ± 5,12 | 62,7 | 52,4 |
| | 03 | 55,2 ± 0,41 | 54,8 | 55,7 |
| | 04 | 43,9 ± 5,95 | 37,9 | 49,8 |
| | 05 | 43,5 ± 5,25 | 38,3 | 48,8 |
| | 06 | 46,6 ± 2,11 | 44,5 | 48,7 |
| | 07 | 41,7 ± 1,39 | 40,3 | 43,0 |
| | 08 | 44,5 ± 2,91 | 41,6 | 47,5 |
| | 09 | 42,0 ± 1,42 | 40,6 | 43,5 |
| | 10 | 41,4 ± 3,87 | 37,6 | 45,3 |
| LA-H7-05 | 01 | 45,6 ± 4,45 | 41,10 | 50,00 |
| | 02 | 46,7 ± 3,35 | 43,30 | 50,00 |
| | 03 | 47,7 ± 2,60 | 45,10 | 50,30 |
| | 04 | 45,9 ± 0,64 | 45,30 | 46,60 |
| | 05 | 46,5 ± 3,16 | 43,30 | 49,70 |
| | 06 | 45,2 ± 2,57 | 42,60 | 47,70 |
| | 07 | 47,4 ± 3,43 | 44,00 | 50,80 |
| | 08 | 47,9 ± 3,31 | 44,60 | 51,20 |
| | 09 | 53,2 ± 9,01 | 44,20 | 62,30 |
| | 10 | 48,7 ± 0,59 | 49,30 | 48,10 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-H7-01 | 01 | 52,2 ± 1,12 | 51,0 | 53,3 |
| | 02 | 59,2 ± 1,28 | 57,9 | 60,5 |
| | 03 | 66,6 ± 5,80 | 72,4 | 60,8 |
| | 04 | 67,5 ± 6,48 | 73,9 | 61,0 |
| | 05 | 65,5 ± 0,87 | 66,3 | 64,6 |
| | 06 | 62,6 ± 2,70 | 65,3 | 59,9 |
| | 07 | 68,6 ± 2,26 | 70,8 | 66,3 |
| | 08 | 62,9 ± 3,47 | 59,4 | 66,4 |
| | 09 | 62,4 ± 6,82 | 55,6 | 69,2 |
| | 10 | 55,9 ± 3,25 | 52,7 | 59,2 |
| DG-H7-02 | 01 | 56,6 ± 4,79 | 61,3 | 51,8 |
| | 02 | 52,2 ± 2,40 | 54,6 | 49,8 |
| | 03 | 50,9 ± 0,63 | 51,5 | 50,2 |
| | 04 | 50,3 ± 1,52 | 51,8 | 48,8 |
| | 05 | 50,6 ± 2,84 | 53,4 | 47,7 |
| | 06 | 50,9 ± 2,80 | 53,7 | 48,1 |
| | 07 | 59,8 ± 2,11 | 57,7 | 61,9 |
| | 08 | 69,8 ± 4,23 | 74 | 65,6 |
| | 09 | 52,9 ± 3,47 | 49,4 | 56,4 |
| | 10 | 53,5 ± 4,65 | 48,9 | 58,2 |
| DG-H7-03 | 01 | 53,2 ± 0,48 | 53,7 | 52,8 |
| | 02 | 54,6 ± 1,22 | 53,4 | 55,8 |
| | 03 | 54,8 ± 2,93 | 57,8 | 51,9 |
| | 04 | 57,3 ± 4,29 | 61,6 | 53,1 |
| | 05 | 65,9 ± 0,78 | 66,7 | 65,1 |
| | 06 | 63,1 ± 5,41 | 57,7 | 68,5 |
| | 07 | 64,6 ± 5,29 | 59,3 | 69,9 |
| | 08 | 66,2 ± 2,45 | 63,8 | 68,7 |
| | 09 | 62,5 ± 5,61 | 56,9 | 68,1 |
| | 10 | 51,4 ± 0,99 | 50,4 | 52,3 |
| DG-H7-04 | 01 | 63,9 ± 2,92 | 66,9 | 61 |
| | 02 | 67,0 ± 4,81 | 71,8 | 62,2 |
| | 03 | 66,1 ± 2,38 | 68,4 | 63,7 |
| | 04 | 70,5 ± 3,06 | 73,5 | 67,4 |
| | 05 | 64,8 ± 0,56 | 64,3 | 65,4 |
| | 06 | 64,4 ± 0,12 | 64,3 | 64,5 |
| | 07 | 66,4 ± 2,18 | 68,5 | 64,2 |
| | 08 | 62,3 ± 0,94 | 61,3 | 63,2 |
| | 09 | 63,2 ± 2,42 | 65,6 | 60,8 |
| | 10 | 62,6 ± 3,23 | 65,8 | 59,3 |
| DG-H7-05 | 01 | 65,5 ± 3,37 | 62,1 | 68,8 |
| | 02 | 68,6 ± 4,18 | 72,7 | 64,4 |
| | 03 | 76,0 ± 3,24 | 72,8 | 79,2 |
| | 04 | 68,6 ± 2,56 | 66,0 | 71,1 |
| | 05 | 68,5 ± 1,09 | 67,4 | 69,5 |
| | 06 | 66,4 ± 2,58 | 63,8 | 69,0 |
| | 07 | 69,2 ± 6,52 | 62,7 | 75,7 |
| | 08 | 69,6 ± 4,80 | 64,8 | 74,4 |
| | 09 | 65,3 ± 3,59 | 61,7 | 68,9 |
| | 10 | 59,6 ± 2,89 | 62,5 | 56,7 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-H7-01 | 01 | 56,0 ± 2,57 | 58,6 | 53,4 |
| | 02 | 57,6 ± 3,02 | 60,6 | 54,6 |
| | 03 | 62,1 ± 1,88 | 64,0 | 60,2 |
| | 04 | 57,6 ± 4,43 | 62,0 | 53,2 |
| | 05 | 55,4 ± 3,67 | 59,0 | 51,7 |
| | 06 | 51,6 ± 0,20 | 51,8 | 51,4 |
| | 07 | 49,8 ± 1,50 | 48,3 | 51,3 |
| | 08 | 51,1 ± 2,38 | 48,7 | 53,5 |
| | 09 | 51,3 ± 2,10 | 49,2 | 53,4 |
| | 10 | 52,4 ± 0,88 | 51,5 | 53,3 |
| FI-H7-02 | 01 | 50,1 ± 0,82 | 50,9 | 49,3 |
| | 02 | 46,2 ± 1,57 | 47,8 | 44,6 |
| | 03 | 46,8 ± 0,30 | 47,1 | 46,5 |
| | 04 | 46,8 ± 0,51 | 47,3 | 46,3 |
| | 05 | 48,7 ± 0,40 | 48,3 | 49,1 |
| | 06 | 54,4 ± 6,49 | 47,9 | 60,8 |
| | 07 | 48,1 ± 0,30 | 47,8 | 48,4 |
| | 08 | 50,1 ± 3,50 | 46,6 | 53,6 |
| | 09 | 47,6 ± 1,79 | 45,9 | 49,4 |
| | 10 | 46,9 ± 2,26 | 44,6 | 49,1 |
| FI-H7-03 | 01 | 61,9 ± 0,18 | 62,1 | 61,7 |
| | 02 | 60,4 ± 0,39 | 60,8 | 60,0 |
| | 03 | 59,4 ± 0,78 | 60,2 | 58,6 |
| | 04 | 56,0 ± 0,89 | 56,9 | 55,1 |
| | 05 | 57,2 ± 0,48 | 56,7 | 57,7 |
| | 06 | 56,6 ± 0,14 | 56,5 | 56,7 |
| | 07 | 57,4 ± 0,94 | 56,4 | 58,3 |
| | 08 | 58,0 ± 1,42 | 56,6 | 59,4 |
| | 09 | 59,9 ± 2,78 | 57,1 | 62,6 |
| | 10 | 60,3 ± 3,64 | 56,7 | 64,0 |
| FI-H7-04 | 01 | 57,8 ± 3,64 | 54,2 | 61,4 |
| | 02 | 50,7 ± 7,29 | 43,4 | 58,0 |
| | 03 | 48,6 ± 5,77 | 42,8 | 54,4 |
| | 04 | 47,8 ± 4,53 | 43,2 | 52,3 |
| | 05 | 49,2 ± 3,77 | 45,4 | 53,0 |
| | 06 | 48,9 ± 0,84 | 48,0 | 49,7 |
| | 07 | 54,2 ± 6,20 | 48,0 | 60,4 |
| | 08 | 47,9 ± 3,25 | 44,7 | 51,2 |
| | 09 | 51,5 ± 6,86 | 44,6 | 58,3 |
| | 10 | 48,4 ± 3,87 | 44,6 | 52,3 |
| FI-H7-05 | 01 | 61,8 | 61,8 | 61,7 |
| | 02 | 59,5 ± 2,43 | 57,0 | 61,9 |
| | 03 | 60,6 ± 1,77 | 58,8 | 62,3 |
| | 04 | 59,5 | 59,5 | 59,5 |
| | 05 | 59,6 ± 1,73 | 61,3 | 57,9 |
| | 06 | 60,8 ± 3,35 | 64,2 | 57,5 |
| | 07 | 58,8 ± 0,57 | 58,2 | 59,3 |
| | 08 | 58,3 ± 0,45 | 57,8 | 58,7 |
| | 09 | 59,8 ± 2,38 | 62,2 | 57,4 |
| | 10 | 59,2 ± 0,54 | 59,7 | 58,7 |

Anlage 6: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an dem Frühholz der Tangentialfläche

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|-----------------|-------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-TF-01 | 01 | 64,6 ± 2,51 | 62,1 | 67,1 |
| | 02 | 59,9 ± 1,28 | 58,6 | 61,2 |
| | 03 | 64,7 ± 2,38 | 67,0 | 62,3 |
| | 04 | 63,2 ± 1,09 | 64,3 | 62,1 |
| | 05 | 57,9 | 57,8 | 57,9 |
| | 06 | 59,7 ± 3,06 | 62,8 | 56,7 |
| | 07 | 60,1 ± 3,68 | 63,8 | 56,4 |
| | 08 | 60,2 ± 4,07 | 64,2 | 56,1 |
| | 09 | 56,9 ± 2,40 | 59,3 | 54,5 |
| | 10 | 61,0 ± 1,40 | 62,4 | 59,6 |
| ES-TF-02 | 01 | 52,4 ± 4,03 | 48,4 | 56,4 |
| | 02 | 49,6 ± 5,41 | 44,2 | 55,1 |
| | 03 | 56,1 ± 3,50 | 52,6 | 59,6 |
| | 04 | 53,8 ± 4,10 | 57,9 | 49,7 |
| | 05 | 52,0 | 52,1 | 52,0 |
| | 06 | 50,8 ± 2,85 | 48,0 | 53,7 |
| | 07 | 55,6 ± 1,45 | 54,2 | 57,1 |
| | 08 | 54,9 ± 2,58 | 57,5 | 52,3 |
| | 09 | 42,9 ± 2,70 | 40,2 | 45,6 |
| | 10 | 44,3 ± 6,02 | 38,3 | 50,4 |
| ES-TF-03 | 01 | 66,2 ± 4,84 | 61,3 | 71 |
| | 02 | 64,5 ± 0,87 | 63,7 | 65,4 |
| | 03 | 61,7 ± 0,54 | 61,2 | 62,3 |
| | 04 | 63,7 ± 2,19 | 65,9 | 61,5 |
| | 05 | 62,0 ± 2,09 | 64,1 | 59,9 |
| | 06 | 60,4 ± 1,01 | 61,4 | 59,4 |
| | 07 | 58,8 ± 2,40 | 61,2 | 56,4 |
| | 08 | 55,7 ± 1,44 | 57,1 | 54,2 |
| | 09 | 54,5 ± 0,73 | 55,2 | 53,7 |
| | 10 | 55,6 ± 2,02 | 57,7 | 53,6 |
| ES-TF-04 | 01 | 53,4 ± 1,90 | 51,5 | 55,3 |
| | 02 | 49,8 ± 0,46 | 49,3 | 50,3 |
| | 03 | 50,7 ± 2,09 | 52,8 | 48,6 |
| | 04 | 51,6 ± 1,58 | 53,2 | 50,0 |
| | 05 | 48,7 ± 1,98 | 46,7 | 50,7 |
| | 06 | 52,8 ± 0,28 | 53,1 | 52,5 |
| | 07 | 53,4 ± 0,75 | 52,7 | 54,2 |
| | 08 | 52,6 ± 2,10 | 54,7 | 50,5 |
| | 09 | 50,3 ± 0,27 | 50,5 | 50 |
| | 10 | 50,2 ± 2,28 | 52,5 | 47,9 |
| ES-TF-05 | 01 | 68,5 ± 1,87 | 70,4 | 66,6 |
| | 02 | 67,0 ± 2,09 | 64,9 | 69,1 |
| | 03 | 67,8 ± 0,69 | 67,1 | 68,5 |
| | 04 | 60,6 ± 2,33 | 62,9 | 58,2 |
| | 05 | 60,4 ± 0,77 | 61,2 | 59,6 |
| | 06 | 66,2 ± 6,64 | 59,6 | 72,9 |
| | 07 | 56,5 ± 3,18 | 53,3 | 59,7 |
| | 08 | 57,4 ± 1,43 | 58,8 | 55,9 |
| | 09 | 55,3 ± 2,07 | 53,2 | 57,3 |
| | 10 | 60,2 ± 4,63 | 55,6 | 64,9 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-TF-01 | 01 | 59,5 ± 1,53 | 58,0 | 61,1 |
| | 02 | 51,6 ± 3,58 | 48,1 | 55,2 |
| | 03 | 48,1 ± 1,84 | 46,3 | 50,0 |
| | 04 | 49,7 ± 0,86 | 48,8 | 50,5 |
| | 05 | 48,9 ± 1,12 | 47,8 | 50,0 |
| | 06 | 49,4 ± 2,42 | 47,0 | 51,8 |
| | 07 | 50,0 ± 0,34 | 49,7 | 50,3 |
| | 08 | 47,5 ± 1,83 | 45,7 | 49,3 |
| | 09 | 49,0 ± 0,64 | 48,3 | 49,6 |
| | 10 | 56,6 ± 1,06 | 55,6 | 57,7 |
| BU-TF-02 | 01 | 45,2 ± 0,74 | 44,5 | 45,9 |
| | 02 | 43,6 ± 2,60 | 41,0 | 46,2 |
| | 03 | 43,9 ± 2,68 | 41,2 | 46,6 |
| | 04 | 44,5 ± 1,92 | 42,6 | 46,4 |
| | 05 | 47,1 ± 3,76 | 43,4 | 50,9 |
| | 06 | 46,2 ± 1,61 | 47,8 | 44,6 |
| | 07 | 43,5 ± 0,52 | 44,0 | 43,0 |
| | 08 | 48,4 ± 0,89 | 49,3 | 47,6 |
| | 09 | 45,6 ± 0,10 | 45,5 | 45,7 |
| | 10 | 44,6 ± 2,75 | 41,8 | 47,3 |
| BU-TF-03 | 01 | 34,3 ± 4,68 | 29,6 | 38,9 |
| | 02 | 42,0 ± 1,36 | 40,6 | 43,4 |
| | 03 | 37,2 ± 4,29 | 32,9 | 41,5 |
| | 04 | 37,3 ± 2,53 | 34,8 | 39,8 |
| | 05 | 38,1 ± 1,50 | 36,6 | 39,6 |
| | 06 | 38,7 ± 4,92 | 33,8 | 43,6 |
| | 07 | 40,3 ± 4,31 | 36,0 | 44,6 |
| | 08 | 36,6 ± 2,88 | 33,7 | 39,5 |
| | 09 | 32,1 ± 3,06 | 29,0 | 35,2 |
| | 10 | 32,2 ± 2,07 | 30,1 | 34,3 |
| BU-TF-04 | 01 | 46,5 ± 2,56 | 43,9 | 49 |
| | 02 | 44,5 ± 0,81 | 43,7 | 45,3 |
| | 03 | 48,9 ± 3,35 | 52,2 | 45,5 |
| | 04 | 48,0 ± 3,98 | 52,0 | 44,1 |
| | 05 | 47,6 ± 4,59 | 52,2 | 43,0 |
| | 06 | 43,9 ± 4,86 | 48,8 | 39,0 |
| | 07 | 39,8 ± 4,73 | 44,5 | 35,0 |
| | 08 | 40,3 ± 4,26 | 44,6 | 36,0 |
| | 09 | 40,0 ± 3,44 | 43,5 | 36,6 |
| | 10 | 42,8 ± 2,55 | 45,3 | 40,2 |
| BU-TF-05 | 01 | 39,8 ± 5,65 | 45,5 | 34,2 |
| | 02 | 51,5 ± 0,49 | 52,0 | 51,0 |
| | 03 | 49,9 ± 0,06 | 49,9 | 49,8 |
| | 04 | 52,8 ± 0,30 | 52,5 | 53,1 |
| | 05 | 48,5 ± 0,05 | 48,4 | 48,5 |
| | 06 | 52,8 ± 0,89 | 53,6 | 51,9 |
| | 07 | 50,7 ± 2,39 | 48,4 | 53,1 |
| | 08 | 60,0 ± 2,80 | 57,2 | 62,8 |
| | 09 | 57,9 ± 3,99 | 53,9 | 61,8 |
| | 10 | 58,1 ± 1,96 | 56,1 | 60,0 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-TF-01 | 01 | 36,7 ± 3,57 | 33,1 | 40,2 |
| | 02 | 38,2 ± 4,80 | 33,4 | 43,0 |
| | 03 | 37,8 ± 0,08 | 37,8 | 37,9 |
| | 04 | 38,9 ± 1,11 | 37,8 | 40,0 |
| | 05 | 32,1 ± 1,59 | 33,7 | 30,5 |
| | 06 | 27,9 ± 1,77 | 26,1 | 29,6 |
| | 07 | 33,1 ± 1,10 | 34,2 | 32,0 |
| | 08 | 30,8 ± 0,14 | 30,6 | 30,9 |
| | 09 | 29,9 ± 0,57 | 29,3 | 30,4 |
| | 10 | 29,5 ± 3,49 | 26,0 | 33 |
| LA-TF-02 | 01 | 25,1 ± 8,16 | 33,3 | 17,0 |
| | 02 | 24,8 ± 4,84 | 29,7 | 20,0 |
| | 03 | 27,2 ± 3,24 | 30,5 | 24,0 |
| | 04 | 27,5 ± 3,92 | 23,6 | 31,4 |
| | 05 | 25,3 ± 3,52 | 21,8 | 28,8 |
| | 06 | 28,2 ± 4,27 | 23,9 | 32,5 |
| | 07 | 28,5 ± 1,33 | 27,2 | 29,8 |
| | 08 | 24,7 ± 1,07 | 25,8 | 23,6 |
| | 09 | 26,7 ± 1,11 | 27,9 | 25,6 |
| | 10 | 31,4 ± 0,56 | 31,9 | 30,8 |
| LA-TF-03 | 01 | 32,1 ± 0,55 | 31,5 | 32,6 |
| | 02 | 31,1 ± 2,19 | 33,3 | 28,9 |
| | 03 | 27,6 ± 6,34 | 33,9 | 21,3 |
| | 04 | 25,8 ± 4,41 | 30,2 | 21,3 |
| | 05 | 32,5 ± 2,97 | 29,5 | 35,5 |
| | 06 | 32,9 ± 0,43 | 33,4 | 32,5 |
| | 07 | 25,3 ± 3,37 | 28,6 | 21,9 |
| | 08 | 25,0 ± 5,00 | 30,0 | 20,0 |
| | 09 | 23,0 ± 1,55 | 24,6 | 21,5 |
| | 10 | 26,8 ± 0,10 | 26,7 | 26,9 |
| LA-TF-04 | 01 | 24,5 ± 2,90 | 27,4 | 21,6 |
| | 02 | 31,8 ± 0,90 | 32,7 | 30,9 |
| | 03 | 18,9 ± 3,76 | 15,2 | 22,7 |
| | 04 | 25,6 ± 2,83 | 18,5 | 22,8 |
| | 05 | 20,8 ± 0,81 | 21,6 | 20,0 |
| | 06 | 18,1 ± 1,14 | 19,2 | 16,9 |
| | 07 | 18,6 ± 1,83 | 20,4 | 16,8 |
| | 08 | 22,0 ± 0,71 | 21,2 | 22,7 |
| | 09 | 16,0 ± 3,49 | 12,5 | 19,5 |
| | 10 | 23,8 ± 3,63 | 27,5 | 20,2 |
| LA-TF-05 | 01 | 26,9 ± 5,93 | 32,8 | 21,0 |
| | 02 | 20,5 ± 2,90 | 23,4 | 17,6 |
| | 03 | 22,9 ± 4,97 | 27,8 | 17,9 |
| | 04 | 17,4 ± 4,96 | 22,3 | 12,4 |
| | 05 | 14,2 ± 5,59 | 19,8 | 8,6 |
| | 06 | 22,1 ± 3,93 | 18,2 | 26,1 |
| | 07 | 25,8 ± 4,36 | 21,4 | 30,1 |
| | 08 | 20,9 ± 6,34 | 14,6 | 27,2 |
| | 09 | 23,8 ± 3,43 | 20,4 | 27,2 |
| | 10 | 23,6 ± 5,56 | 18,1 | 29,2 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-TF-01 | 01 | 39,8 ± 0,22 | 39,6 | 40,1 |
| | 02 | 40,4 ± 1,77 | 42,2 | 38,6 |
| | 03 | 42,4 ± 1,00 | 41,4 | 43,4 |
| | 04 | 42,1 ± 1,51 | 40,6 | 43,7 |
| | 05 | 40,0 ± 2,28 | 37,7 | 42,3 |
| | 06 | 39,9 ± 1,43 | 38,4 | 41,3 |
| | 07 | 40,4 ± 0,50 | 40,9 | 39,9 |
| | 08 | 39,5 ± 1,30 | 40,8 | 38,3 |
| | 09 | 40,3 ± 0,66 | 39,6 | 40,9 |
| | 10 | 40,7 ± 0,80 | 39,9 | 41,5 |
| DG-TF-02 | 01 | 45,2 ± 5,17 | 50,3 | 40 |
| | 02 | 48,0 ± 1,97 | 46,1 | 50 |
| | 03 | 49,8 ± 1,65 | 48,2 | 51,5 |
| | 04 | 46,3 ± 0,86 | 45,4 | 47,1 |
| | 05 | 48,7 ± 0,42 | 48,3 | 49,1 |
| | 06 | 48,0 ± 2,16 | 50,2 | 45,9 |
| | 07 | 47,0 ± 0,68 | 47,7 | 46,3 |
| | 08 | 45,4 ± 4,19 | 41,2 | 49,6 |
| | 09 | 45,5 ± 1,70 | 47,2 | 43,8 |
| | 10 | 41,7 ± 0,49 | 42,2 | 41,2 |
| DG-TF-03 | 01 | 52,8 ± 1,68 | 54,5 | 51,2 |
| | 02 | 55,8 ± 4,55 | 60,4 | 51,3 |
| | 03 | 54,4 ± 5,04 | 59,4 | 49,4 |
| | 04 | 51,5 ± 3,35 | 54,8 | 48,1 |
| | 05 | 52,4 ± 1,86 | 54,2 | 50,5 |
| | 06 | 53,4 ± 4,93 | 58,4 | 48,5 |
| | 07 | 50,1 ± 5,55 | 55,6 | 44,5 |
| | 08 | 48,6 ± 0,81 | 49,4 | 47,8 |
| | 09 | 46,6 ± 1,08 | 47,7 | 45,5 |
| | 10 | 48,3 ± 3,26 | 51,5 | 45 |
| DG-TF-04 | 01 | 41,2 ± 1,10 | 40,1 | 42,3 |
| | 02 | 41,9 ± 3,92 | 45,8 | 38 |
| | 03 | 45,1 ± 4,67 | 49,7 | 40,4 |
| | 04 | 41,2 ± 2,46 | 43,7 | 38,8 |
| | 05 | 38,3 ± 1,15 | 37,2 | 39,5 |
| | 06 | 39,6 ± 0,60 | 40,2 | 39 |
| | 07 | 38,8 ± 0,36 | 39,1 | 38,4 |
| | 08 | 39,8 ± 1,57 | 41,4 | 38,2 |
| | 09 | 41,9 ± 2,89 | 44,8 | 39 |
| | 10 | 40,2 ± 1,98 | 42,2 | 38,2 |
| DG-TF-05 | 01 | 46,8 ± 1,20 | 48,0 | 45,6 |
| | 02 | 44,8 ± 1,93 | 46,8 | 42,9 |
| | 03 | 40,6 ± 3,38 | 37,3 | 44 |
| | 04 | 44,6 ± 3,24 | 41,3 | 47,8 |
| | 05 | 47,4 ± 9,99 | 37,4 | 57,3 |
| | 06 | 51,2 ± 2,84 | 48,3 | 54 |
| | 07 | 54,0 ± 5,19 | 48,8 | 59,2 |
| | 08 | 42,7 ± 5,24 | 37,4 | 47,9 |
| | 09 | 45,3 ± 5,48 | 39,8 | 50,8 |
| | 10 | 47,5 ± 0,23 | 47,3 | 47,7 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-TF-01 | 01 | 33,0 ± 4,05 | 290 | 37,1 |
| | 02 | 34,0 ± 1,86 | 32,1 | 35,8 |
| | 03 | 33,1 ± 0,21 | 32,9 | 33,3 |
| | 04 | 31,3 ± 0,34 | 31,6 | 30,9 |
| | 05 | 32,8 ± 0,86 | 33,7 | 32,0 |
| | 06 | 36,9 ± 3,73 | 33,1 | 40,6 |
| | 07 | 29,8 ± 4,98 | 34,8 | 24,8 |
| | 08 | 32,7 ± 3,26 | 36,0 | 29,5 |
| | 09 | 28,2 ± 1,65 | 29,9 | 26,6 |
| | 10 | 28,5 ± 5,57 | 22,9 | 34,1 |
| FI-TF-02 | 01 | 36,3 ± 6,47 | 29,8 | 42,8 |
| | 02 | 37,4 ± 5,82 | 31,6 | 43,2 |
| | 03 | 38,9 ± 3,21 | 35,7 | 42,1 |
| | 04 | 37,2 ± 2,52 | 34,7 | 39,7 |
| | 05 | 31,1 ± 0,98 | 30,1 | 32,0 |
| | 06 | 33,5 ± 2,99 | 36,5 | 30,5 |
| | 07 | 34,0 ± 4,91 | 38,9 | 29,1 |
| | 08 | 34,7 ± 7,03 | 41,7 | 27,6 |
| | 09 | 34,1 ± 3,35 | 37,4 | 30,7 |
| | 10 | 31,4 ± 2,94 | 34,3 | 28,4 |
| FI-TF-03 | 01 | 42,6 ± 4,95 | 37,7 | 47,6 |
| | 02 | 42,8 ± 4,21 | 38,6 | 47 |
| | 03 | 38,6 ± 2,12 | 36,5 | 40,7 |
| | 04 | 40,4 ± 0,96 | 39,5 | 41,4 |
| | 05 | 40,0 ± 1,97 | 38,1 | 42,0 |
| | 06 | 42,5 ± 1,96 | 40,6 | 44,5 |
| | 07 | 45,5 ± 4,38 | 41,1 | 49,9 |
| | 08 | 45,7 ± 4,75 | 40,9 | 50,5 |
| | 09 | 46,2 ± 5,23 | 41,0 | 51,5 |
| | 10 | 45,1 ± 0,48 | 44,6 | 45,6 |
| FI-TF-04 | 01 | 38,8 ± 0,61 | 38,2 | 39,4 |
| | 02 | 41,3 ± 1,12 | 40,2 | 42,4 |
| | 03 | 43,1 ± 4,66 | 38,4 | 47,8 |
| | 04 | 37,2 ± 0,73 | 36,5 | 37,9 |
| | 05 | 35,9 ± 3,22 | 32,7 | 39,1 |
| | 06 | 35,6 ± 0,96 | 34,7 | 36,6 |
| | 07 | 35,6 ± 4,86 | 30,7 | 40,4 |
| | 08 | 35,6 ± 3,23 | 32,4 | 38,9 |
| | 09 | 32,2 ± 6,99 | 25,2 | 39,2 |
| | 10 | 32,3 ± 4,37 | 28,0 | 36,7 |
| FI-TF-05 | 01 | 41,0 ± 3,40 | 37,6 | 44,4 |
| | 02 | 37,3 ± 1,90 | 35,4 | 39,3 |
| | 03 | 37,0 ± 2,96 | 34,0 | 40,0 |
| | 04 | 37,3 ± 3,06 | 34,2 | 40,3 |
| | 05 | 39,2 ± 4,24 | 35,0 | 43,5 |
| | 06 | 44,3 ± 2,90 | 41,4 | 47,2 |
| | 07 | 41,2 ± 2,84 | 38,4 | 44,0 |
| | 08 | 41,5 ± 0,94 | 40,5 | 42,4 |
| | 09 | 46,3 ± 1,79 | 44,5 | 48,1 |
| | 10 | 44,6 ± 0,67 | 44,0 | 45,3 |

Anlage 7: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen an dem Spätholz der Tangentialfläche

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| ES-TS-01 | 01 | 45,9 ± 1,23 | 44,7 | 47,1 |
| | 02 | 47,3 ± 0,19 | 47,1 | 47,5 |
| | 03 | 47,5 ± 1,45 | 46,1 | 49,0 |
| | 04 | 42,9 ± 0,07 | 42,8 | 43,0 |
| | 05 | 43,8 ± 4,95 | 48,8 | 38,9 |
| | 06 | 42,3 ± 2,13 | 44,5 | 40,2 |
| | 07 | 46,4 ± 1,48 | 47,9 | 45,0 |
| | 08 | 40,7 ± 0,11 | 40,8 | 40,5 |
| | 09 | 40,5 ± 0,71 | 39,8 | 41,2 |
| | 10 | 38,6 ± 1,01 | 37,6 | 39,6 |
| ES-TS-02 | 01 | 49,6 ± 1,48 | 51,1 | 48,1 |
| | 02 | 50,7 ± 1,39 | 52,1 | 49,3 |
| | 03 | 47,4 ± 3,75 | 51,1 | 43,6 |
| | 04 | 46,5 ± 3,28 | 49,8 | 43,2 |
| | 05 | 42,9 ± 4,50 | 47,4 | 38,4 |
| | 06 | 42,0 ± 1,90 | 43,9 | 40,1 |
| | 07 | 43,2 ± 1,55 | 44,8 | 41,7 |
| | 08 | 45,7 ± 1,66 | 47,3 | 44,0 |
| | 09 | 44,3 ± 2,84 | 47,2 | 41,5 |
| | 10 | 45,3 ± 0,11 | 45,2 | 45,4 |
| ES-TS-03 | 01 | 44,4 ± 2,93 | 41,5 | 47,3 |
| | 02 | 45,8 ± 2,36 | 43,4 | 48,1 |
| | 03 | 43,4 ± 4,88 | 38,5 | 48,3 |
| | 04 | 45,1 ± 3,82 | 41,3 | 49,0 |
| | 05 | 46,9 ± 4,81 | 42,1 | 51,7 |
| | 06 | 46,7 ± 2,82 | 43,9 | 49,5 |
| | 07 | 46,8 ± 2,63 | 44,2 | 49,5 |
| | 08 | 43,3 ± 2,15 | 41,1 | 45,4 |
| | 09 | 41,6 ± 4,43 | 37,1 | 46,0 |
| | 10 | 41,6 ± 0,54 | 42,1 | 41,0 |
| ES-TS-04 | 01 | 54,4 ± 0,90 | 53,5 | 55,3 |
| | 02 | 52,1 ± 0,38 | 52,5 | 51,7 |
| | 03 | 52,1 | 52,2 | 52,1 |
| | 04 | 51,4 ± 0,63 | 52,0 | 50,8 |
| | 05 | 53,7 ± 0,19 | 53,5 | 53,9 |
| | 06 | 56,7 ± 4,06 | 52,6 | 60,7 |
| | 07 | 56,9 ± 1,07 | 55,8 | 57,9 |
| | 08 | 54,6 ± 1,16 | 55,8 | 53,5 |
| | 09 | 53,0 ± 0,98 | 54,0 | 52,1 |
| | 10 | 54,6 ± 2,26 | 52,4 | 56,9 |
| ES-TS-05 | 01 | 57,3 ± 3,87 | 53,4 | 61,1 |
| | 02 | 59,0 ± 4,89 | 54,1 | 63,9 |
| | 03 | 58,4 ± 0,31 | 58,7 | 58,0 |
| | 04 | 47,8 ± 2,36 | 45,4 | 50,1 |
| | 05 | 50,8 ± 1,90 | 48,9 | 52,7 |
| | 06 | 49,4 ± 3,08 | 46,4 | 52,5 |
| | 07 | 50,8 ± 0,20 | 50,6 | 51,0 |
| | 08 | 51,6 ± 0,35 | 51,3 | 52,0 |
| | 09 | 50,3 ± 3,25 | 47,1 | 53,6 |
| | 10 | 56,1 ± 4,29 | 51,8 | 60,4 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| BU-TS-01 | 01 | 53,3 ± 2,86 | 56,2 | 50,4 |
| | 02 | 53,8 ± 1,92 | 55,7 | 51,9 |
| | 03 | 54,6 ± 3,12 | 57,7 | 51,4 |
| | 04 | 51,0 ± 3,14 | 54,1 | 47,9 |
| | 05 | 53,2 ± 1,37 | 54,6 | 51,8 |
| | 06 | 55,6 ± 3,62 | 59,3 | 52,0 |
| | 07 | 50,6 ± 1,65 | 52,3 | 49,0 |
| | 08 | 52,5 ± 1,88 | 54,4 | 50,7 |
| | 09 | 49,3 ± 3,09 | 52,4 | 46,2 |
| | 10 | 51,7 ± 1,53 | 53,3 | 50,2 |
| BU-TS-02 | 01 | 69,0 ± 0,43 | 68,6 | 69,4 |
| | 02 | 67,5 ± 1,87 | 69,3 | 65,6 |
| | 03 | 59,2 ± 2,78 | 56,4 | 62,0 |
| | 04 | 60,1 ± 1,31 | 58,8 | 61,4 |
| | 05 | 61,1 ± 0,50 | 61,6 | 60,6 |
| | 06 | 60,6 ± 1,34 | 59,3 | 61,9 |
| | 07 | 54,2 ± 0,38 | 53,8 | 54,6 |
| | 08 | 54,0 ± 1,34 | 55,3 | 52,6 |
| | 09 | 54,6 ± 4,95 | 49,6 | 59,5 |
| | 10 | 62,8 ± 2,15 | 60,6 | 64,9 |
| BU-TS-03 | 01 | 50,3 ± 0,94 | 49,3 | 51,2 |
| | 02 | 49,5 ± 0,85 | 50,4 | 48,7 |
| | 03 | 48,1 ± 0,62 | 47,5 | 48,8 |
| | 04 | 48,3 ± 0,75 | 49,0 | 47,5 |
| | 05 | 49,0 ± 0,87 | 48,1 | 49,9 |
| | 06 | 49,8 ± 1,67 | 51,4 | 48,1 |
| | 07 | 48,0 ± 3,13 | 44,9 | 51,2 |
| | 08 | 49,1 ± 2,24 | 46,9 | 51,4 |
| | 09 | 45,2 ± 0,22 | 45,0 | 45,4 |
| | 10 | 48,6 ± 1,61 | 47,0 | 50,2 |
| BU-TS-04 | 01 | 47,9 ± 0,92 | 47,0 | 48,8 |
| | 02 | 49,9 ± 0,41 | 50,3 | 49,5 |
| | 03 | 48,1 ± 0,85 | 47,2 | 48,9 |
| | 04 | 46,3 ± 2,10 | 44,2 | 48,4 |
| | 05 | 52,4 ± 1,04 | 53,4 | 51,3 |
| | 06 | 48,2 ± 3,45 | 51,6 | 44,7 |
| | 07 | 51,5 ± 1,15 | 52,6 | 50,3 |
| | 08 | 47,0 ± 3,13 | 50,1 | 43,8 |
| | 09 | 54,1 ± 3,59 | 57,7 | 50,5 |
| | 10 | 50,4 ± 4,61 | 55,0 | 45,8 |
| BU-TS-05 | 01 | 47,6 ± 1,55 | 49,1 | 46,0 |
| | 02 | 50,8 ± 2,99 | 47,8 | 53,8 |
| | 03 | 53,4 ± 1,38 | 52,0 | 54,8 |
| | 04 | 54,2 ± 3,93 | 50,3 | 58,2 |
| | 05 | 56,1 ± 1,41 | 54,7 | 57,5 |
| | 06 | 52,6 ± 3,74 | 48,9 | 56,4 |
| | 07 | 59,0 ± 2,23 | 61,3 | 56,8 |
| | 08 | 47,8 ± 1,31 | 46,5 | 49,1 |
| | 09 | 52,3 ± 5,37 | 46,9 | 57,6 |
| | 10 | 44,6 ± 0,66 | 44,0 | 45,3 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| LA-TS-01 | 01 | 39,2 ± 1,59 | 37,6 | 40,8 |
| | 02 | 39,3 ± 1,74 | 37,6 | 41,1 |
| | 03 | 40,1 ± 2,12 | 38,0 | 42,2 |
| | 04 | 39,2 ± 0,45 | 38,8 | 39,7 |
| | 05 | 38,1 ± 1,61 | 36,5 | 39,8 |
| | 06 | 38,6 ± 0,43 | 38,2 | 39,0 |
| | 07 | 37,3 ± 0,91 | 36,4 | 38,2 |
| | 08 | 38,1 ± 1,09 | 39,2 | 37 |
| | 09 | 38,0 ± 0,27 | 38,3 | 37,7 |
| | 10 | 38,8 ± 1,15 | 39,9 | 37,6 |
| LA-TS-02 | 01 | 39,3 ± 2,40 | 36,9 | 41,7 |
| | 02 | 42,2 ± 0,92 | 41,3 | 43,2 |
| | 03 | 44,1 ± 3,71 | 40,4 | 47,8 |
| | 04 | 40,3 ± 0,62 | 40,9 | 39,7 |
| | 05 | 39,8 ± 1,94 | 37,8 | 41,7 |
| | 06 | 32,8 ± 0,41 | 33,2 | 32,4 |
| | 07 | 33,4 ± 0,29 | 33,7 | 33,1 |
| | 08 | 35,7 ± 1,62 | 37,3 | 34,1 |
| | 09 | 40,1 ± 1,09 | 41,2 | 39 |
| | 10 | 40,7 ± 1,00 | 39,7 | 41,7 |
| LA-TS-03 | 01 | 37,4 ± 1,55 | 35,9 | 39,0 |
| | 02 | 41,7 ± 3,68 | 38,0 | 45,4 |
| | 03 | 40,1 ± 0,47 | 39,7 | 40,6 |
| | 04 | 39,3 ± 0,05 | 39,2 | 39,3 |
| | 05 | 38,6 ± 0,24 | 38,4 | 38,9 |
| | 06 | 39,7 ± 1,68 | 38,0 | 41,4 |
| | 07 | 39,5 ± 1,62 | 37,9 | 41,1 |
| | 08 | 38,0 ± 1,31 | 39,3 | 36,7 |
| | 09 | 38,2 ± 2,48 | 40,6 | 35,7 |
| | 10 | 39,9 ± 1,54 | 41,4 | 38,4 |
| LA-TS-04 | 01 | 38,1 ± 0,17 | 38,2 | 37,9 |
| | 02 | 35,8 ± 0,56 | 35,3 | 36,4 |
| | 03 | 38,4 ± 0,12 | 38,5 | 38,2 |
| | 04 | 38,9 ± 1,37 | 37,5 | 40,3 |
| | 05 | 40,5 ± 0,41 | 40,1 | 41,0 |
| | 06 | 38,8 ± 1,00 | 39,8 | 37,9 |
| | 07 | 39,6 ± 0,22 | 39,4 | 39,9 |
| | 08 | 40,3 ± 1,16 | 41,5 | 39,1 |
| | 09 | 37,6 ± 3,33 | 41,0 | 34,3 |
| | 10 | 33,6 ± 3,21 | 36,8 | 30,4 |
| LA-TS-05 | 01 | 40,0 ± 0,52 | 39,5 | 40,5 |
| | 02 | 38,8 ± 0,22 | 38,6 | 39,1 |
| | 03 | 38,8 ± 0,85 | 38,0 | 39,7 |
| | 04 | 36,6 ± 0,74 | 37,3 | 35,8 |
| | 05 | 38,0 ± 0,86 | 38,9 | 37,2 |
| | 06 | 32,9 ± 5,73 | 38,7 | 27,2 |
| | 07 | 28,4 ± 7,92 | 36,3 | 20,5 |
| | 08 | 44,9 ± 8,14 | 36,8 | 53,1 |
| | 09 | 43,8 ± 5,30 | 38,5 | 49,1 |
| | 10 | 35,6 ± 3,99 | 39,6 | 31,6 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| DG-TS-01 | 01 | 52,3 ± 0,97 | 51,4 | 53,3 |
| | 02 | 51,3 ± 0,37 | 50,9 | 51,7 |
| | 03 | 55,5 ± 2,61 | 52,9 | 58,1 |
| | 04 | 48,8 ± 0,56 | 49,4 | 48,2 |
| | 05 | 48,3 ± 0,10 | 48,2 | 48,4 |
| | 06 | 51,7 ± 0,95 | 52,6 | 50,7 |
| | 07 | 49,1 ± 0,53 | 49,6 | 48,6 |
| | 08 | 50,0 ± 0,15 | 49,8 | 50,1 |
| | 09 | 52,6 ± 4,13 | 48,5 | 56,7 |
| | 10 | 49,6 ± 2,01 | 47,6 | 51,6 |
| DG-TS-02 | 01 | 50,9 ± 0,08 | 50,8 | 51,0 |
| | 02 | 52,5 ± 1,17 | 51,4 | 53,7 |
| | 03 | 52,0 ± 0,35 | 51,6 | 52,3 |
| | 04 | 63,3 ± 9,17 | 54,1 | 72,4 |
| | 05 | 55,8 ± 4,16 | 51,6 | 59,9 |
| | 06 | 50,9 ± 1,50 | 49,4 | 52,4 |
| | 07 | 53,3 ± 2,37 | 50,9 | 55,7 |
| | 08 | 50,7 ± 0,53 | 50,1 | 51,2 |
| | 09 | 47,1 ± 1,61 | 48,7 | 45,5 |
| | 10 | 51,6 ± 0,51 | 51,1 | 52,1 |
| DG-TS-03 | 01 | 57,6 ± 0,75 | 58,3 | 56,8 |
| | 02 | 57,0 ± 1,02 | 58,0 | 56,0 |
| | 03 | 55,4 ± 2,08 | 57,5 | 53,3 |
| | 04 | 55,2 ± 2,65 | 52,5 | 57,8 |
| | 05 | 56,4 ± 3,26 | 53,2 | 59,7 |
| | 06 | 56,8 ± 2,61 | 54,2 | 59,4 |
| | 07 | 58,2 ± 1,10 | 57,1 | 59,3 |
| | 08 | 60,7 ± 2,29 | 58,4 | 63,0 |
| | 09 | 61,3 ± 0,52 | 60,8 | 61,8 |
| | 10 | 62,1 ± 0,79 | 61,3 | 62,8 |
| DG-TS-04 | 01 | 48,6 ± 0,14 | 48,7 | 48,5 |
| | 02 | 46,3 ± 2,19 | 48,5 | 44,2 |
| | 03 | 42,9 ± 1,04 | 43,9 | 41,8 |
| | 04 | 42,2 ± 1,11 | 43,3 | 41,1 |
| | 05 | 40,8 ± 0,46 | 40,4 | 41,3 |
| | 06 | 41,6 | 41,6 | 41,6 |
| | 07 | 38,8 ± 1,21 | 40,0 | 37,5 |
| | 08 | 40,8 ± 0,95 | 39,9 | 41,8 |
| | 09 | 41,2 ± 1,26 | 40,0 | 42,5 |
| | 10 | 41,4 ± 3,59 | 37,8 | 45 |
| DG-TS-05 | 01 | 49,9 ± 1,87 | 48,1 | 51,8 |
| | 02 | 47,1 ± 1,45 | 45,6 | 48,5 |
| | 03 | 46,5 ± 3,74 | 42,8 | 50,2 |
| | 04 | 44,5 ± 1,70 | 42,8 | 46,2 |
| | 05 | 43,9 ± 0,17 | 43,7 | 44,0 |
| | 06 | 43,1 ± 0,66 | 43,8 | 42,5 |
| | 07 | 44,3 ± 2,93 | 47,3 | 41,4 |
| | 08 | 46,2 ± 1,47 | 47,6 | 44,7 |
| | 09 | 45,7 ± 0,09 | 45,6 | 45,8 |
| | 10 | 45,7 ± 2,34 | 43,4 | 48,1 |

| Bez. Prüfkörper | Nr. Messung | Mittelwert [Grad] | Berührungspunkt | |
|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------|
| | | | links [Grad] | rechts [Grad] |
| FI-TS-01 | 01 | 33,5 ± 2,33 | 35,8 | 31,1 |
| | 02 | 34,9 ± 1,67 | 36,5 | 33,2 |
| | 03 | 37,3 ± 0,58 | 36,8 | 37,9 |
| | 04 | 34,8 ± 0,99 | 33,8 | 35,8 |
| | 05 | 27,6 ± 5,75 | 33,4 | 21,9 |
| | 06 | 33,1 ± 4,09 | 37,2 | 29,0 |
| | 07 | 28,6 ± 0,66 | 29,3 | 28,0 |
| | 08 | 27,8 ± 0,86 | 26,9 | 28,6 |
| | 09 | 29,1 ± 0,07 | 29,2 | 29,0 |
| | 10 | 30,4 ± 3,77 | 34,1 | 26,6 |
| FI-TS-02 | 01 | 37,4 ± 0,62 | 38,1 | 36,8 |
| | 02 | 39,6 ± 1,56 | 38,1 | 41,2 |
| | 03 | 37,3 ± 0,68 | 37,9 | 36,6 |
| | 04 | 36,4 ± 3,68 | 40,1 | 32,7 |
| | 05 | 37,1 ± 3,66 | 40,8 | 33,4 |
| | 06 | 40,9 ± 1,81 | 39,1 | 42,7 |
| | 07 | 39,0 ± 0,88 | 39,9 | 38,1 |
| | 08 | 36,4 ± 2,90 | 39,3 | 33,5 |
| | 09 | 40,3 ± 2,72 | 37,6 | 43,0 |
| | 10 | 38,5 ± 1,70 | 36,8 | 40,2 |
| FI-TS-03 | 01 | 43,5 ± 1,69 | 41,8 | 45,2 |
| | 02 | 39,4 ± 1,93 | 41,3 | 37,5 |
| | 03 | 39,0 ± 4,13 | 43,1 | 34,8 |
| | 04 | 41,7 ± 4,80 | 46,5 | 36,9 |
| | 05 | 41,8 ± 2,33 | 44,1 | 39,4 |
| | 06 | 45,5 ± 2,53 | 48,1 | 43,0 |
| | 07 | 42,0 ± 2,83 | 44,9 | 39,2 |
| | 08 | 44,1 ± 4,03 | 48,2 | 40,1 |
| | 09 | 44,3 ± 4,36 | 48,6 | 39,9 |
| | 10 | 43,4 ± 3,74 | 47,2 | 39,7 |
| FI-TS-04 | 01 | 43,4 ± 0,84 | 44,3 | 42,6 |
| | 02 | 40,2 ± 2,19 | 38,0 | 42,4 |
| | 03 | 38,6 ± 2,19 | 36,4 | 40,8 |
| | 04 | 35,7 ± 1,04 | 34,6 | 36,7 |
| | 05 | 37,0 ± 1,47 | 38,5 | 35,6 |
| | 06 | 41,1 ± 2,10 | 39,0 | 43,2 |
| | 07 | 45,5 ± 3,44 | 42,1 | 48,9 |
| | 08 | 43,3 ± 0,60 | 43,8 | 42,7 |
| | 09 | 40,0 ± 2,51 | 37,5 | 42,5 |
| | 10 | 37,8 ± 1,61 | 36,2 | 39,4 |
| FI-TS-05 | 01 | 47,6 ± 1,69 | 49,2 | 45,9 |
| | 02 | 51,9 ± 4,26 | 47,6 | 56,2 |
| | 03 | 43,7 ± 2,11 | 45,8 | 41,6 |
| | 04 | 45,0 ± 2,75 | 47,7 | 42,2 |
| | 05 | 44,5 ± 3,24 | 47,7 | 41,3 |
| | 06 | 38,7 ± 4,37 | 43,1 | 34,4 |
| | 07 | 41,7 ± 1,63 | 43,3 | 40,0 |
| | 08 | 40,0 ± 1,76 | 41,8 | 38,3 |
| | 09 | 41,9 ± 1,02 | 40,8 | 42,9 |
| | 10 | 41,5 ± 1,85 | 39,6 | 43,4 |

Anlage 8: Ergebnisse der Längszugscherversuche – Vollholzproben

| Holzart | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 fv [N/mm ²] | Behandlung A2 fv [N/mm ²] | Behandlung A4 fv [N/mm ²] |
|---------|----------------|--|--|--|
| ES | 01 | 16,5 | 9,2 | 9,8 |
| | 02 | 14,8 | 9,7 | 9,8 |
| | 03 | 15,7 | 10,9 | 10,0 |
| | 04 | 15,2 | 10,2 | 10,3 |
| | 05 | 14,6 | 10,2 | 8,3 |
| | 06 | 16,6 | 10,3 | 10,9 |
| | 07 | 14,0 | 12,0 | 11,1 |
| | 08 | 16,9 | 9,9 | 10,7 |
| | 09 | 15,4 | 10,8 | 9,9 |
| | 10 | 14,6 | 10,2 | 10,0 |
| | MV | 15,4 | 10,3 | 10,1 |
| | SD | 1,0 | 0,8 | 0,8 |
| | VC | 6,3% | 7,4% | 7,7% |
| BU | 01 | 8,3 | 6,2 | 8,9 |
| | 02 | 13,9 | 8,6 | 7,5 |
| | 03 | 11,0 | 9,7 | 11,0 |
| | 04 | 10,9 | 12,9 | 5,5 |
| | 05 | 10,9 | 8,5 | 9,4 |
| | 06 | 14,3 | 9,3 | 8,6 |
| | 07 | 11,0 | 13,4 | 4,7 |
| | 08 | 10,9 | 8,1 | 9,3 |
| | 09 | 12,6 | 9,2 | 6,0 |
| | 10 | 12,5 | 7,0 | 5,7 |
| | MV | 11,6 | 9,3 | 7,7 |
| | SD | 1,7 | 2,3 | 2,1 |
| | VC | 15,0% | 24,8% | 27,4% |
| LA | 01 | 7,5 | 7,0 | 7,5 |
| | 02 | 10,9 | 8,9 | 5,7 |
| | 03 | 8,0 | 8,2 | 7,2 |
| | 04 | 13,2 | 9,2 | 6,4 |
| | 05 | 7,4 | 8,4 | 5,9 |
| | 06 | 6,3 | 8,8 | 6,8 |
| | 07 | 11,4 | 6,4 | 7,2 |
| | 08 | 9,0 | 7,6 | 7,8 |
| | 09 | 9,6 | 7,7 | 6,8 |
| | 10 | 6,6 | 8,8 | 5,8 |
| | MV | 9,0 | 8,1 | 6,7 |
| | SD | 2,3 | 0,9 | 0,7 |
| | VC | 25,2% | 11,2% | 10,9% |

Anlage 8. Ergebnisse der Längszugscherversuche – Vollholzproben (Fortsetzung)

| Holzart | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 fv [N/mm ²] | Behandlung A2 fv [N/mm ²] | Behandlung A4 fv [N/mm ²] |
|---------|----------------|--|--|--|
| DG | 01 | 8,7 | 6,0 | 5,5 |
| | 02 | 6,3 | 7,3 | 5,0 |
| | 03 | 7,4 | 7,2 | 6,4 |
| | 04 | 8,1 | 7,6 | 6,7 |
| | 05 | 8,4 | 6,3 | 5,5 |
| | 06 | 7,2 | 5,7 | 6,4 |
| | 07 | 6,6 | 7,6 | 5,0 |
| | 08 | 6,8 | 6,9 | 5,6 |
| | 09 | 8,9 | 6,4 | 5,0 |
| | 10 | 8,5 | 6,8 | 5,3 |
| | MV | 7,7 | 6,8 | 5,6 |
| | SD | 0,9 | 0,7 | 0,6 |
| | VC | 12,2% | 9,6% | 11,4% |
| FI | 01 | 8,1 | 7,5 | 6,0 |
| | 02 | 8,5 | 6,0 | 4,8 |
| | 03 | 8,9 | 6,2 | 6,7 |
| | 04 | 5,8 | 6,4 | 5,6 |
| | 05 | 7,2 | 6,3 | 6,0 |
| | 06 | 8,3 | 6,4 | 5,5 |
| | 07 | 8,3 | 6,0 | 5,8 |
| | 08 | 8,1 | 6,0 | 5,6 |
| | 09 | 7,7 | 5,8 | 4,9 |
| | 10 | 9,1 | 6,1 | 4,5 |
| | MV | 8,02 | 6,3 | 5,5 |
| | SD | 0,94 | 0,5 | 0,7 |
| | VC | 11,7% | 7,7% | 11,9% |

Anlage 9: Ergebnisse der Längszugscherversuche – PRF-Klebstoff

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| ES-PRF | 01 | 14,1 | 100 | 7,9 | 0 | 5,2 | 100 |
| | 02 | 12,0 | 100 | 8,8 | 0 | 5,1 | 100 |
| | 03 | 12,4 | 100 | 7,4 | 0 | 4,5 | 100 |
| | 04 | 13,1 | 100 | 8,1 | 0 | 5,3 | 100 |
| | 05 | 13,6 | 90 | 6,0 | 100 | 4,5 | 100 |
| | 06 | 11,7 | 100 | 7,3 | 100 | 5,3 | 90 |
| | 07 | 12,2 | 100 | 7,2 | 0 | 5,5 | 100 |
| | 08 | 12,2 | 100 | 7,5 | 100 | 4,7 | 90 |
| | 09 | 9,5 | 100 | 7,1 | 100 | 6,3 | 0 |
| | 10 | 10,6 | 100 | 6,4 | 100 | 4,9 | 0 |
| | MV | 12,1 | 99 | 7,4 | 50 | 5,1 | 78 |
| | SD | 1,4 | 0 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| | VC | 11,2% | 0 | 10,9% | 105,4% | 10,5% | 53,0% |
| BU-PRF | 01 | 11,8 | 90 | 7,6 | 90 | 5,0 | 90 |
| | 02 | 13,3 | 90 | 8,0 | 90 | 6,2 | 80 |
| | 03 | 13,1 | 90 | 8,7 | 80 | 6,1 | 50 |
| | 04 | 14,9 | 90 | 7,8 | 90 | 7,3 | 30 |
| | 05 | 11,9 | 90 | 9,3 | 80 | 7,7 | 70 |
| | 06 | 14,2 | 90 | 9,1 | 90 | 4,3 | 100 |
| | 07 | 13,7 | 90 | 7,7 | 90 | 6,0 | 50 |
| | 08 | 12,7 | 80 | 8,8 | 90 | 5,3 | 0 |
| | 09 | 14,3 | 90 | 8,1 | 90 | 7,8 | 40 |
| | 10 | 12,4 | 90 | 8,7 | 70 | 7,6 | 40 |
| | MV | 13,2 | 89 | 8,4 | 86 | 6,3 | 55 |
| | SD | 1,0 | 0,03 | 0,6 | 0,1 | 1,2 | 0,3 |
| | VC | 7,9% | 3,6% | 7,4% | 8,1% | 19,2% | 55,0% |
| LA-PRF | 01 | 9,3 | 90 | 7,4 | 30 | 4,3 | 0 |
| | 02 | 8,9 | 90 | 6,5 | 40 | - | 10 |
| | 03 | 8,9 | 80 | 4,9 | 30 | 5,5 | 20 |
| | 04 | 10,0 | 90 | 7,3 | 0 | 4,7 | 10 |
| | 05 | 8,8 | 60 | 6,8 | 10 | 5,3 | 60 |
| | 06 | 8,9 | 90 | 7,2 | 10 | 5,7 | 10 |
| | 07 | 6,1 | 90 | 6,4 | 10 | 5,7 | 20 |
| | 08 | 7,4 | 90 | 6,3 | 10 | 5,8 | 50 |
| | 09 | - | - | 5,6 | 20 | 5,2 | 90 |
| | 10 | 8,7 | 80 | 6,0 | 30 | 4,9 | 100 |
| | MV | 8,6 | 86 | 6,4 | 19 | 5,2 | 37 |
| | SD | 2,9 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 1,7 | 0,4 |
| | VC | 34,1% | 12,5% | 12,4% | 67,7% | 33,0% | 97,0% |

Anlage 9: Ergebnisse der Längszugscherversuche – PRF-Klebstoff (Fortsetzung)

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| DG-PRF | 01 | 7,2 | 50 | 7,2 | 50 | 7,2 | 50 |
| | 02 | 5,1 | 100 | 5,1 | 100 | 5,1 | 100 |
| | 03 | 5,0 | 100 | 5,0 | 100 | 5,0 | 100 |
| | 04 | 9,1 | 70 | 9,1 | 70 | 9,1 | 70 |
| | 05 | 7,7 | 90 | 7,7 | 90 | 7,7 | 90 |
| | 06 | 8,5 | 70 | 8,5 | 70 | 8,5 | 70 |
| | 07 | 10,2 | 50 | 10,2 | 50 | 10,2 | 50 |
| | 08 | 5,8 | 40 | 5,8 | 40 | 5,8 | 40 |
| | 09 | 7,5 | 80 | 7,5 | 80 | 7,5 | 80 |
| | 10 | 8,3 | 80 | 8,3 | 80 | 8,3 | 80 |
| | MV | 7,4 | 73 | 7,4 | 73 | 7,4 | 73 |
| | SD | 1,7 | 0,2 | 1,7 | 0,2 | 1,7 | 0, |
| | VC | 23,1% | 28,9% | 23,1% | 28,9% | 23,1% | 28,9% |
| FI-PRF | 01 | 8,4 | 100 | 6,2 | 20 | 4,3 | 50 |
| | 02 | 6,3 | 50 | 4,7 | 50 | 4,2 | 10 |
| | 03 | 6,2 | 50 | 5,5 | 30 | 5,0 | 10 |
| | 04 | 7,0 | 50 | 5,9 | 30 | 4,4 | 10 |
| | 05 | 8,1 | 50 | 6,7 | 40 | 5,4 | 20 |
| | 06 | 5,2 | 90 | 4,5 | 60 | 4,9 | 80 |
| | 07 | 5,7 | 80 | 6,4 | 50 | 3,7 | 70 |
| | 08 | 7,2 | 20 | 5,2 | 30 | 4,9 | 0 |
| | 09 | - | - | 6,1 | 30 | 4,2 | 0 |
| | 10 | 10,1 | 0 | 7,7 | 30 | 4,1 | 30 |
| | MV | 7,1 | 50 | 5,9 | 37 | 4,5 | 28 |
| | SD | 2,7 | 0,3 | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 0,3 |
| | VC | 37,4% | 66,7% | 16,5% | 33,8% | 0,1 | 103,5% |

Anlage 10: Ergebnisse der Längszugscherversuche – EPI-Klebstoff

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| ES-EPI | 01 | 6,9 | 100 | 5,1 | 0 | 5,9 | 0 |
| | 02 | 7,4 | 100 | 5,4 | 40 | 6,0 | 10 |
| | 03 | 9,5 | 100 | 5,0 | 10 | 5,7 | 0 |
| | 04 | 7,3 | 100 | 5,3 | 20 | 5,7 | 20 |
| | 05 | 11,8 | 70 | 4,9 | 30 | 5,9 | 60 |
| | 06 | 10,6 | 100 | 5,8 | 20 | 8,8 | 0 |
| | 07 | 11,2 | 100 | 5,6 | 10 | 5,3 | 20 |
| | 08 | 8,0 | 100 | 6,0 | 50 | 6,8 | 10 |
| | 09 | 11,3 | 100 | 5,5 | 30 | 5,4 | 10 |
| | 10 | 8,1 | 100 | 5,9 | 30 | 5,2 | 10 |
| | MV | 9,2 | 97 | 5,5 | 24 | 6,1 | 14 |
| | SD | 1,9 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 1,0 | 0,2 |
| | VC | 20,4% | 9,8% | 7,0% | 62,7% | 17,2% | 126,9% |
| BU-EPI | 01 | 7,9 | 100 | 7,2 | 100 | 8,1 | 20 |
| | 02 | 12,3 | 80 | 6,4 | 100 | 8,6 | 10 |
| | 03 | 10,9 | 100 | 10,7 | 90 | 8,0 | 20 |
| | 04 | 8,2 | 100 | 8,9 | 70 | 6,4 | 10 |
| | 05 | 11,9 | 90 | 6,4 | 100 | 5,7 | 20 |
| | 06 | 11,6 | 70 | 6,9 | 100 | 6,7 | 20 |
| | 07 | 10,9 | 100 | 7,8 | 100 | 7,8 | 0 |
| | 08 | 13,8 | 100 | 8,3 | 60 | 5,2 | 80 |
| | 09 | 11,8 | 90 | 4,5 | 40 | 6,1 | 0 |
| | 10 | 12,0 | 70 | 8,7 | 60 | 7,3 | 60 |
| | MV | 11,1 | 90 | 7,6 | 82 | 7,0 | 24 |
| | SD | 1,8 | 0,1 | 1,7 | 0,2 | 1,1 | 0,3 |
| | VC | 16,3% | 13,9% | 22,6% | 27,5% | 16,1% | 107,9% |
| LA-EPI | 01 | 7,2 | 50 | 5,8 | 10 | 4,5 | 20 |
| | 02 | 9,1 | 80 | 5,4 | 10 | 5,7 | 60 |
| | 03 | 8,7 | 90 | 4,0 | 10 | - | - |
| | 04 | 7,4 | 100 | 4,9 | 30 | 4,2 | 10 |
| | 05 | 7,8 | 70 | 5,9 | 50 | 5,5 | 40 |
| | 06 | 8,9 | 100 | 6,8 | 30 | 3,8 | 100 |
| | 07 | 9,0 | 100 | 5,3 | 10 | 4,4 | 100 |
| | 08 | 8,1 | 100 | 6,1 | 20 | 4,7 | 40 |
| | 09 | 8,2 | 70 | 5,5 | 70 | 4,8 | 20 |
| | 10 | 10,0 | 80 | 6,2 | 40 | 5,6 | 70 |
| | MV | 8,4 | 84 | 5,6 | 28 | 4,8 | 52 |
| | SD | 0,9 | 0,2 | 0,8 | 0,2 | 1,6 | 0,3 |
| | VC | 10,1% | 20,4% | 13,9% | 73,0% | 34,3% | 61,4% |

Anlage 10: Ergebnisse der Längszugscherversuche – EPI-Klebstoff (Fortsetzung)

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| DG- EPI | 01 | 7,0 | 100 | 5,5 | 100 | 5,9 | 50 |
| | 02 | 6,0 | 100 | 5,9 | 50 | 6,2 | 40 |
| | 03 | 7,0 | 90 | 6,4 | 50 | 5,8 | 10 |
| | 04 | 7,5 | 50 | 6,5 | 40 | 6,2 | 0 |
| | 05 | 7,6 | 100 | 6,4 | 50 | 6,2 | 30 |
| | 06 | 7,8 | 90 | 6,6 | 30 | 6,2 | 70 |
| | 07 | 7,7 | 80 | 7,0 | 70 | 6,2 | 20 |
| | 08 | 8,6 | 60 | 6,6 | 80 | 6,0 | 20 |
| | 09 | 7,6 | 100 | 5,2 | 60 | 5,5 | 30 |
| | 10 | 7,6 | 70 | 6,2 | 50 | 6,7 | 50 |
| | MV | 7,5 | 84 | 6,2 | 58 | 6,1 | 32 |
| | SD | 0,7 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| | VC | 8,9% | 21,9% | 9,0% | 35,2% | 5,0% | 65,6% |
| FI- EPI | 01 | 6,5 | 90 | 6,0 | 0 | 3,9 | 10 |
| | 02 | 6,1 | 40 | 4,7 | 10 | 6,1 | 0 |
| | 03 | 6,3 | 100 | 5,0 | 20 | 5,2 | 20 |
| | 04 | 7,1 | 90 | 5,5 | 50 | 6,2 | 10 |
| | 05 | 5,3 | 40 | 5,4 | 40 | 6,0 | 10 |
| | 06 | 7,1 | 50 | 6,0 | 50 | 5,6 | 0 |
| | 07 | 6,8 | 30 | 5,9 | 70 | 6,5 | 10 |
| | 08 | 5,6 | 30 | 5,2 | 40 | 6,2 | 20 |
| | 09 | 6,5 | 50 | 5,7 | 40 | 5,0 | 20 |
| | 10 | 6,9 | 30 | 5,7 | 20 | 5,2 | 10 |
| | MV | 6,4 | 55 | 5,5 | 34 | 5,6 | 11 |
| | SD | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,8 | 0,1 |
| | VC | 9,4% | 50,2% | 8,2% | 62,3% | 14,1% | 67,1% |

Anlage 11. Ergebnisse der Längszugscherversuche – MUF-Klebstoff

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| ES-MUF | 01 | 12,2 | 40 | 5,4 | 40 | 3,2 | 50 |
| | 02 | 13,6 | 10 | 5,9 | 100 | 5,0 | 20 |
| | 03 | 12,8 | 20 | 5,6 | 100 | 4,4 | 10 |
| | 04 | 11,0 | 50 | 4,9 | 100 | 4,9 | 30 |
| | 05 | 9,4 | 80 | 4,7 | 100 | 2,1 | 0 |
| | 06 | 11,6 | 60 | 4,8 | 100 | 4,8 | 10 |
| | 07 | 11,5 | 50 | 5,3 | 100 | 5,5 | 20 |
| | 08 | 12,4 | 40 | 5,6 | 100 | 5,0 | 40 |
| | 09 | 10,9 | 80 | 5,6 | 90 | 4,0 | 40 |
| | 10 | 9,3 | 90 | 5,0 | 80 | 5,4 | 30 |
| | MV | 11,5 | 52 | 5,3 | 91 | 4,4 | 25 |
| | SD | 1,4 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 1,1 | 0,2 |
| | VC | 12,0% | 50,3% | 7,6% | 21,0% | 24,1% | 63,2% |
| BU-MUF-1 | 01 | 11,1 | 100 | 9,8 | 50 | 4,9 | 0 |
| | 02 | 11,1 | 100 | 9,5 | 70 | 6,0 | 40 |
| | 03 | 8,0 | 100 | 8,1 | 20 | 4,9 | 90 |
| | 04 | 13,1 | 70 | 3,6 | 70 | 4,3 | 20 |
| | 05 | 8,9 | 30 | 5,7 | 80 | 2,7 | 20 |
| | 06 | 12,5 | 100 | 9,9 | 20 | 5,3 | 0 |
| | 07 | 5,2 | 60 | 7,2 | 30 | - | - |
| | 08 | 4,8 | 0 | 9,3 | 100 | 3,4 | 10 |
| | 09 | 12,3 | 50 | 6,1 | 100 | 3,2 | 30 |
| | 10 | 7,5 | 50 | 6,3 | 50 | 4,5 | 0 |
| | MV | 9,4 | 66 | 7,5 | 59 | 4,4 | 22 |
| | SD | 3,0 | 0,3 | 2,1 | 0,3 | 1,7 | 0,3 |
| | VC | 31,8% | 52,6% | 28,0% | 50,8% | 39,4% | 124,6% |
| BU-MUF-2 | 01 | 9,4 | 100 | 8,3 | 90 | 7,5 | 50 |
| | 02 | 9,6 | 100 | 8,4 | 50 | 6,2 | 100 |
| | 03 | 9,7 | 100 | 10,4 | 40 | 5,8 | 100 |
| | 04 | 11,4 | 100 | 8,9 | 90 | 7,0 | 90 |
| | 05 | 11,3 | 100 | 7,9 | 70 | 6,6 | 100 |
| | 06 | 10,8 | 100 | 8,5 | 80 | 7,6 | 90 |
| | 07 | 11,1 | 100 | 9,8 | 20 | 6,0 | 100 |
| | 08 | 12,6 | 100 | 9,2 | 40 | 6,9 | 100 |
| | 09 | 12,4 | 100 | 9,7 | 40 | 6,5 | 100 |
| | 10 | 14,2 | 100 | 10,6 | 10 | 7,4 | 90 |
| | MV | 11,3 | 100 | 9,2 | 53 | 6,7 | 92 |
| | SD | 1,5 | 0,0 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,2 |
| | VC | 13,2% | 0,0% | 10,2% | 53,4% | 9,3% | 16,8% |

Anlage 11: Ergebnisse der Längszugscherversuche – MUF-Klebstoff (Fortsetzung)

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| LA-MUF | 01 | 9,1 | 60 | 6,0 | 90 | 6,1 | 50 |
| | 02 | 8,6 | 60 | 6,8 | 90 | 7,0 | 10 |
| | 03 | 9,4 | 100 | 7,7 | 40 | 4,9 | 0 |
| | 04 | 7,8 | 100 | 6,4 | 40 | 6,2 | 20 |
| | 05 | 8,3 | 90 | 7,6 | 10 | 7,5 | 20 |
| | 06 | 7,5 | 100 | 7,5 | 20 | 5,7 | 20 |
| | 07 | 8,5 | 100 | 6,9 | 30 | 7,0 | 20 |
| | 08 | 9,4 | 50 | 7,8 | 20 | 6,3 | 20 |
| | 09 | 8,2 | 100 | 6,7 | 10 | 6,4 | 0 |
| | 10 | 8,2 | 80 | 7,1 | 10 | 6,6 | 0 |
| | MV | 8,5 | 84 | 7,0 | 36 | 6,4 | 16 |
| | SD | 0,6 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,7 | 0,21 |
| | VC | 7,6% | 23,9% | 8,6% | 85,1% | 11,6% | 94,1% |
| DG-MUF | 01 | 9,5 | 20 | 6,3 | 50 | 4,6 | 0 |
| | 02 | 12,1 | 60 | 5,5 | 10 | 5,0 | 40 |
| | 03 | 7,2 | 50 | 2,6 | 20 | - | 10 |
| | 04 | 10,7 | 30 | 8,2 | 30 | 6,0 | 10 |
| | 05 | 8,8 | 70 | 6,7 | 20 | 3,9 | 10 |
| | 06 | 8,7 | 60 | 7,2 | 30 | 5,6 | 0 |
| | 07 | 3,7 | 50 | 6,6 | 30 | 4,9 | 20 |
| | 08 | 8,5 | 50 | 6,4 | 10 | 3,5 | 20 |
| | 09 | 7,8 | 50 | 7,0 | 30 | 6,8 | 0 |
| | 10 | 10,5 | 70 | 6,2 | 30 | 4,1 | 30 |
| | MV | 8,8 | 51 | 6,3 | 26 | 4,9 | 14 |
| | SD | 2,3 | 0,2 | 1,5 | 0,1 | 1,9 | 0,1 |
| | VC | 26,3% | 31,3% | 23,6% | 45,1% | 37,4% | 96,4% |
| FI-MUF | 01 | 7,2 | 0 | 5,9 | 30 | 4,6 | 0 |
| | 02 | 6,8 | 20 | 5,0 | 90 | 5,2 | 10 |
| | 03 | 7,7 | 20 | 5,7 | 50 | 5,2 | 0 |
| | 04 | 8,0 | 20 | 5,0 | 20 | 4,8 | 20 |
| | 05 | 6,9 | 40 | 5,9 | 10 | 4,4 | 10 |
| | 06 | 6,2 | 40 | 5,0 | 40 | 5,1 | 10 |
| | 07 | 8,4 | 0 | 6,4 | 40 | 4,8 | 10 |
| | 08 | 6,8 | 90 | 5,8 | 10 | 5,2 | 0 |
| | 09 | 6,5 | 100 | 4,8 | 90 | 5,4 | 10 |
| | 10 | 7,3 | 50 | 5,3 | 20 | 5,0 | 10 |
| | MV | 7,2 | 38 | 5,5 | 40 | 5,0 | 8 |
| | SD | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,1 |
| | VC | 9,6% | 90,1% | 9,9% | 73,6% | 6,7% | 79,1% |

Anlage 12. Ergebnisse der Längszugscherversuche – PUR-Klebstoff

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| ES-PUR | 01 | 8,9 | 100 | 4,5 | 0 | 5,4 | 10 |
| | 02 | 9,9 | 100 | 4,1 | 100 | 5,3 | 80 |
| | 03 | 12,6 | 30 | 4,5 | 0 | 5,6 | 0 |
| | 04 | 13,0 | 0 | 4,6 | 0 | 4,8 | 0 |
| | 05 | 9,4 | 100 | 5,1 | 0 | 6,0 | 10 |
| | 06 | 12,9 | 0 | 3,5 | 100 | 5,8 | 0 |
| | 07 | 10,3 | 20 | 4,3 | 100 | 5,8 | 0 |
| | 08 | 12,1 | 10 | 4,3 | 0 | 3,8 | 10 |
| | 09 | 9,5 | 100 | 5,7 | 0 | 3,8 | 90 |
| | 10 | 9,9 | 100 | 5,2 | 0 | 6,0 | 30 |
| | MV | 10,8 | 56 | 4,6 | 30 | 5,2 | 23 |
| | SD | 1,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 0,3 |
| | VC | 15,0% | 84,3% | 13,4% | 161,0% | 16,1% | 147,9% |
| BU-PUR-1 | 01 | 10,1 | 90 | 7,0 | 0 | 4,1 | 0 |
| | 02 | 9,9 | 100 | 6,5 | 0 | 4,9 | 0 |
| | 03 | 10,6 | 100 | 7,2 | 0 | 3,3 | 20 |
| | 04 | 11,2 | 100 | 7,1 | 0 | 4,9 | 30 |
| | 05 | 9,9 | 100 | 7,0 | 0 | 5,7 | 0 |
| | 06 | 9,2 | 100 | 4,9 | 0 | 4,8 | 0 |
| | 07 | 11,3 | 100 | 3,3 | 0 | 6,3 | 20 |
| | 08 | 10,5 | 100 | 7,3 | 0 | 5,6 | 0 |
| | 09 | 11,6 | 100 | 6,9 | 0 | 5,6 | 0 |
| | 10 | 10,7 | 100 | 7,8 | 0 | 5,7 | 0 |
| | MV | 10,5 | 99 | 6,5 | 0 | 5,1 | 7 |
| | SD | 0,8 | 0 | 1,3 | 0 | 0,9 | 0,1 |
| | VC | 7,2% | 3,2% | 20,6% | - | 17,3% | 165,6% |
| BU-PUR-2 | 01 | | | | | 6,6 | 10 |
| | 02 | | | | | 6,1 | 10 |
| | 03 | | | | | 6,9 | 5 |
| | 04 | | | | | 6,4 | 10 |
| | 05 | | | | | 5,7 | 5 |
| | 06 | | | | | 5,9 | 0 |
| | 07 | | | | | 6,8 | 5 |
| | 08 | | | | | 5,7 | 0 |
| | 09 | | | | | 7,3 | 5 |
| | 10 | | | | | 6,1 | 0 |
| | MV | | | | | 6,3 | 5 |
| | SD | | | | | 0,6 | 0 |
| | VC | | | | | 8,7% | 81,6% |

Anlage 12: Ergebnisse der Längszugscherversuche – PUR-Klebstoff (Fortsetzung)

| Bez. Versuchsreihe | Nr. Prüfkörper | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| LA-PUR | 01 | 7,6 | 40 | 8,7 | 40 | 5,8 | 0 |
| | 02 | 11,2 | 50 | 8,0 | 0 | 8,3 | 30 |
| | 03 | 11,8 | 80 | 5,4 | 0 | 7,3 | 20 |
| | 04 | 10,7 | 70 | 4,4 | 50 | - | 0 |
| | 05 | 10,0 | 40 | 4,8 | 10 | 6,0 | 40 |
| | 06 | 10,7 | 60 | 8,1 | 40 | 6,1 | 10 |
| | 07 | 10,3 | 80 | 6,2 | 10 | 7,2 | 30 |
| | 08 | 9,6 | 80 | 5,5 | 50 | 8,1 | 10 |
| | 09 | 10,7 | 50 | 5,4 | 40 | 5,0 | 20 |
| | 10 | - | 10 | 4,9 | 20 | 5,5 | 20 |
| | MV | 10,3 | 56 | 6,1 | 26 | 6,6 | 18 |
| | SD | 3,4 | 0,2 | 1,6 | 0,2 | 2,4 | 0,1 |
| | VC | 33,5% | 40,5% | 25,5% | 77,3% | 35,8% | 73,1% |
| DG-PUR | 01 | 5,9 | 30 | 5,5 | 10 | 5,3 | 0 |
| | 02 | 10,2 | 100 | 5,8 | 0 | 5,9 | 0 |
| | 03 | 7,0 | 40 | 5,0 | 0 | 4,6 | 0 |
| | 04 | 9,8 | 40 | 4,1 | 0 | 5,6 | 0 |
| | 05 | 8,0 | 40 | 3,3 | 0 | 4,6 | 20 |
| | 06 | 7,3 | 20 | 4,0 | 10 | 4,0 | 10 |
| | 07 | 6,0 | 50 | 5,3 | 0 | 3,5 | 0 |
| | 08 | 8,0 | 40 | 5,6 | 0 | 5,3 | 10 |
| | 09 | 8,8 | 20 | 3,5 | 0 | 5,8 | 0 |
| | 10 | 9,4 | 90 | 4,3 | 0 | 5,3 | 0 |
| | MV | 8,0 | 47 | 4,6 | 2 | 5,0 | 4 |
| | SD | 1,5 | 0,3 | 0,9 | 0,0 | 0,8 | 0,1 |
| | VC | 18,8% | 57,7% | 19,6% | 210,8% | 16,1% | 174,8% |
| FI-PUR | 01 | 7,4 | 80 | 4,6 | 50 | 4,6 | 30 |
| | 02 | 8,7 | 40 | 4,6 | 100 | 3,4 | 20 |
| | 03 | 9,9 | 50 | 4,5 | 100 | 4,1 | 40 |
| | 04 | 6,7 | 10 | 4,9 | 10 | 4,7 | 10 |
| | 05 | 9,4 | 60 | 4,8 | 30 | 4,1 | 30 |
| | 06 | 10,9 | 90 | 4,1 | 100 | 4,7 | 10 |
| | 07 | 7,8 | 10 | 5,2 | 20 | 4,8 | 90 |
| | 08 | 8,9 | 100 | 3,8 | 80 | 4,4 | 0 |
| | 09 | 7,2 | 90 | 5,2 | 10 | 4,2 | 10 |
| | 10 | 7,4 | 70 | 3,7 | 10 | 4,5 | 0 |
| | MV | 8,4 | 60 | 4,5 | 51 | 4,3 | 24 |
| | SD | 1,4 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| | VC | 16,1% | 53,9% | 11,7% | 78,7% | 9,1% | 111,5% |

Anlage 13: Ergebnisse der Delaminierungsprüfung im AS 3 Parameterstudien (H0- frisch gehobelt; S0- frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)

| Klebstoff | Holzart | Oberflächen- beschaffenheit | Gesamtprozentsatz der Delaminierung [%] | Delaminierung einer einzelnen Klebstoffflae [%] | |
|-----------|---------|--------------------------------|---|--|-------|
| | | | | Min | Max |
| PRF | ES | H0 | 0,1 | 0,0 | 0,9 |
| | | S0 | 0,1 | 0,0 | 0,6 |
| | | H7 | 4,3 | 0,0 | 13,8 |
| | BU | H0 | 0,5 | 0,0 | 1,6 |
| | | S0 | 0,4 | 0,0 | 2,8 |
| | | H7 | 1,3 | 0,0 | 3,4 |
| | LA | H0 | 1,7 | 0,0 | 5,5 |
| | | S0 | 7,1 | 1,6 | 21,3 |
| | | H7 | 2,0 | 0,0 | 4,5 |
| FI | H0 | 1,0 | 0,0 | 3,7 | |
| | S0 | 0,5 | 0,0 | 3,0 | |
| | | | | | |
| EPI | ES | H0 | 18,2 | 6,3 | 64,4 |
| | | S0 | 49,2 | 25,0 | 85,6 |
| | | H7 | 16,1 | 2,5 | 21,6 |
| | BU | H0 | 46,7 | 25,3 | 78,4 |
| | | S0 | 75,8 | 44,4 | 94,7 |
| | | H7 | 39,5 | 16,9 | 56,9 |
| | LA | H0 | 27,8 | 3,9 | 63,9 |
| | | S0 | 89,9 | 80,6 | 94,8 |
| | | H7 | 14,6 | 2,9 | 31,6 |
| FI | H0 | 0,4 | 0,0 | 2,3 | |
| | S0 | 8,0 | 0,0 | 32,3 | |
| | | | | | |
| MUF | ES | H0 | 16,8 | 0,9 | 24,7 |
| | | S0 | 9,5 | 1,9 | 19,1 |
| | | H7 | 27,2 | 7,8 | 38,4 |
| | BU | H0 | 5,8 | 1,9 | 10,0 |
| | | S0 | 7,4 | 0,0 | 13,8 |
| | | H7 | 6,3 | 1,6 | 13,4 |
| | LA | H0 | 2,9 | 0,0 | 8,1 |
| | | S0 | 10,4 | 0,0 | 37,1 |
| | | H7 | 12,2 | 3,2 | 34,5 |
| FI | H0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| | S0 | 4,8 | 0,0 | 15,7 | |
| | | | | | |
| PUR | ES | H0 | 81,4 | 56,3 | 100,0 |
| | | S0 | 29,0 | 2,5 | 73,4 |
| | | H7 | 59,5 | 23,8 | 100,0 |
| | BU | H0 | 88,9 | 79,4 | 100,0 |
| | | S0 | 54,5 | 29,7 | 81,6 |
| | | H7 | 61,5 | 11,3 | 93,4 |
| | LA | H0 | 50,7 | 19,0 | 72,9 |
| | | S0 | 87,6 | 63,5 | 96,8 |
| | | H7 | 37,6 | 14,5 | 66,1 |
| FI | H0 | 2,0 | 0,0 | 4,7 | |
| | S0 | 0,1 | 0,0 | 1,0 | |
| | | | | | |

Anlage 14: Ergebnisse der Blockscherprüfung im AS 3 Parameterstudien (H0- frisch gehobelt; S0- frisch geschliffen; H7-gehobelt, 7-tägig gelagert)

| Klebstoff | Holzart | Oberflächen- beschaffen- heit | Behandlung A1 | | Behandlung A2 | | Behandlung A4 | |
|-----------|---------|-------------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] | fv [N/mm ²] | Holzbruch [%] |
| PRF | ES | H0 | 13,8 | 91 | 8,6 | 93 | 7,5 | 96 |
| | | S0 | 14,1 | 85 | 8,5 | 86 | 7,3 | 98 |
| | | H7 | 14,3 | 97 | 9,2 | 81 | 7,6 | 97 |
| | BU | H0 | 18,2 | 76 | 9,1 | 87 | 8,5 | 72 |
| | | S0 | 20,4 | 90 | 10,5 | 81 | 9,6 | 92 |
| | | H7 | 18,1 | 53 | 8,7 | 89 | 8,1 | 86 |
| | LA | H0 | 10,0 | 91 | 6,6 | 91 | 5,8 | 82 |
| | | S0 | 9,1 | 92 | 6,3 | 82 | 5,8 | 71 |
| | | H7 | 9,8 | 80 | 6,6 | 94 | 5,7 | 83 |
| | FI | H0 | 8,0 | 83 | 4,4 | 75 | 3,9 | 81 |
| | | S0 | 7,7 | 95 | 3,9 | 60 | 3,8 | 90 |
| | EPI | ES | H0 | 16,8 | 84 | 9,2 | 45 | 7,6 |
| S0 | | | 13,3 | 87 | 7,9 | 36 | 6,8 | 29 |
| H7 | | | 14,9 | 96 | 9,7 | 50 | 7,4 | 5 |
| BU | | H0 | 18,6 | 98 | 8,4 | 55 | 7,3 | 18 |
| | | S0 | 14,7 | 46 | 6,0 | 1 | 4,2 | 0 |
| | | H7 | 17,9 | 94 | 8,4 | 38 | 7,5 | 12 |
| LA | | H0 | 9,7 | 100 | 5,6 | 61 | 4,8 | 23 |
| | | S0 | 8,4 | 60 | 3,9 | 4 | 2,8 | 0 |
| | | H7 | 9,7 | 99 | 5,6 | 31 | 5,2 | 26 |
| FI | | H0 | 8,4 | 98 | 4,2 | 59 | 3,9 | 37 |
| | | S0 | 8,2 | 93 | 4,1 | 16 | 3,7 | 30 |
| MUF | | ES | H0 | 13,4 | 69 | 8,9 | 87 | 7,5 |
| | S0 | | 14,4 | 81 | 9,8 | 78 | 8,0 | 78 |
| | H7 | | 15,1 | 80 | 9,6 | 78 | 8,2 | 55 |
| | BU | H0 | 18,0 | 95 | 9,9 | 83 | 8,4 | 46 |
| | | S0 | 18,3 | 80 | 9,6 | 77 | 8,3 | 52 |
| | | H7 | 18,0 | 87 | 9,2 | 100 | 7,7 | 43 |
| | LA | H0 | 9,9 | 91 | 6,3 | 90 | 5,2 | 49 |
| | | S0 | 9,0 | 82 | 5,8 | 89 | 5,4 | 42 |
| | | H7 | 9,1 | 87 | 6,1 | 81 | 5,0 | 49 |
| | FI | H0 | 8,2 | 85 | 4,5 | 68 | 3,9 | 73 |
| | | S0 | 7,7 | 77 | 4,2 | 53 | 3,9 | 47 |
| | PUR | ES | H0 | 13,0 | 81 | 7,2 | 15 | 6,3 |
| S0 | | | 16,0 | 92 | 9,1 | 27 | 7,6 | 16 |
| H7 | | | 14,1 | 90 | 8,6 | 13 | 7,1 | 5 |
| BU | | H0 | 19,4 | 73 | 6,2 | 0 | 4,7 | 0 |
| | | S0 | 19,8 | 97 | 8,5 | 2 | 7,8 | 2 |
| | | H7 | 18,2 | 79 | 6,9 | 1 | 4,7 | 0 |
| LA | | H0 | 9,9 | 76 | 4,9 | 16 | 4,6 | 4 |
| | | S0 | 9,8 | 70 | 3,9 | 1 | 2,9 | 0 |
| | | H7 | 9,8 | 81 | 5,5 | 28 | 4,7 | 18 |
| FI | | H0 | 8,2 | 83 | 4,4 | 34 | 3,8 | 26 |
| | | S0 | 8,2 | 74 | 4,2 | 53 | 3,9 | 66 |

Anlage 15: Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche im AS 4

| Klebstoff | Holzart | Versuchsreihe | Bruchlast F_{Bruch} [N] | Biegespannung [N/mm ²] | |
|-----------|---------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|-----|
| PRF | ES | NK | 86667 | 117 | |
| | | WK | 79833 | 107 | |
| | UB | NK | 84950 | 114 | |
| | | WK | 90333 | 122 | |
| | GB | NK | 89400 | 120 | |
| | | WK | 79667 | 107 | |
| | LA | NK | 49033 | 66 | |
| | | WK | 41700 | 56 | |
| | EPI | ES | NK | 87900 | 118 |
| | | | WK | 81067 | 109 |
| UB | | NK | 82050 | 110 | |
| | | WK | 88967 | 120 | |
| GB | | NK | 61950 | 83 | |
| | | WK | 73633 | 99 | |
| LA | | NK | 53067 | 71 | |
| | | WK | 54833 | 74 | |
| MUF | | ES | NK | 62533 | 84 |
| | | | WK | 55533 | 75 |
| | UB | NK | 95100 | 128 | |
| | | WK | 55733 | 75 | |
| | GB | NK | 63067 | 85 | |
| | | WK | 62200 | 84 | |
| | LA | NK | 45500 | 61 | |
| | | WK | 57467 | 77 | |
| | PUR | ES | NK | 74567 | 100 |
| | | | WK | 81433 | 110 |
| UB | | NK | 90267 | 121 | |
| | | WK | 72800 | 98 | |
| GB | | NK | 10250 | 135 | |
| | | WK | 93200 | 125 | |
| LA | | NK | 54367 | 73 | |
| | | WK | 45300 | 61 | |

Anlage 16: Ergebnisse der Delaminierungsprüfung im AS 4

| Klebstoff | Holzart | Versuchsreihe | Gesamtprozentsatz der Delaminierung [%] | Delaminierung einer einzelnen Klebstoffflae [%] | | |
|-----------|---------|---------------|---|--|------|------|
| | | | | Min | Max | |
| PRF | ES | NK | 0,5 | 0 | 0 | |
| | | WK | 0,8 | 0 | 0 | |
| | UB | NK | 5,0 | 0 | 7,4 | |
| | | WK | 2,6 | 0 | 0 | |
| | GB | NK | 1,0 | 0 | 5,5 | |
| | | WK | 4,1 | 0 | 15,1 | |
| | LA | NK | 2,3 | 0 | 5,6 | |
| | | WK | 0,5 | 0 | 2,4 | |
| | EPI | ES | NK | 58,0 | 34,1 | 82,3 |
| | | | WK | 35,1 | 13,9 | 55,4 |
| UB | | NK | 62,7 | 39,8 | 86,1 | |
| | | WK | 38,9 | 51,2 | 77,9 | |
| GB | | NK | 32,3 | 0 | 50,3 | |
| | | WK | 39,9 | 34,8 | 100 | |
| LA | | NK | 24,0 | 8,6 | 21,3 | |
| | | WK | 24,0 | 39,0 | 71,5 | |
| MUF | | ES | NK | 53,4 | 53,0 | 65,5 |
| | | | WK | 70,8 | 27,1 | 60,0 |
| | UB | NK | 13,9 | 12,3 | 37,2 | |
| | | WK | 46,2 | 21,3 | 100 | |
| | GB | NK | 51,0 | 34,8 | 81,7 | |
| | | WK | 26,2 | 0 | 9,8 | |
| | LA | NK | 7,8 | 0 | 16,0 | |
| | | WK | 7,9 | 1,2 | 27,1 | |
| | PUR | ES | NK | 50,7 | 49,1 | 53,6 |
| | | | WK | 69,9 | 65,9 | 81,4 |
| UB | | NK | 45,2 | 12,2 | 69,1 | |
| | | WK | 59,8 | 35,0 | 67,1 | |
| GB | | NK | 67,5 | 51,8 | 96,3 | |
| | | WK | 60,4 | 65,0 | 83,5 | |
| LA | | NK | 22,3 | 15,1 | 21,7 | |
| | | WK | 27,3 | 16,3 | 36,0 | |

Anlage 17: Ergebnisse der Blockscherprüfung im AS 4

| Klebstoff | Holzart | Versuchsreihe | f_v [N/mm ²] | Holzbruch [%] | |
|-----------|---------|---------------|----------------------------|---------------|------|
| PRF | ES | NK | 15,8 | 73,3 | |
| | | WK | 15,1 | 68,3 | |
| | UB | NK | 16,4 | 98,3 | |
| | | WK | 17,1 | 81,1 | |
| | GB | NK | 16,5 | 72,2 | |
| | | WK | 17,2 | 76,1 | |
| | LA | NK | 10,7 | 75,6 | |
| | | WK | 11,2 | 78,3 | |
| | EPI | ES | NK | 14,7 | 90,0 |
| | | | WK | 14,5 | 80,0 |
| UB | | NK | 16,5 | 90,0 | |
| | | WK | 15,1 | 82,2 | |
| GB | | NK | 15,0 | 83,3 | |
| | | WK | 13,3 | 75,0 | |
| LA | | NK | 10,6 | 90,0 | |
| | | WK | 10,3 | 87,2 | |
| MUF | | ES | NK | 11,6 | 55,6 |
| | | | WK | 10,6 | 47,7 |
| | UB | NK | 14,8 | 87,8 | |
| | | WK | 11,5 | 44,1 | |
| | GB | NK | 15,7 | 51,1 | |
| | | WK | 16,8 | 78,9 | |
| | LA | NK | 9,8 | 84,4 | |
| | | WK | 11,0 | 93,9 | |
| | PUR | ES | NK | 15,1 | 67,8 |
| | | | WK | 16,0 | 95,0 |
| UB | | NK | 16,1 | 85,6 | |
| | | WK | 17,4 | 79,4 | |
| GB | | NK | 17,8 | 71,7 | |
| | | WK | 17,3 | 82,8 | |
| LA | | NK | 10,3 | 97,8 | |
| | | WK | 12,2 | 97,8 | |