



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Institut für Baustoffe
ETH Zürich
Schafmattstr. 6
8093 Zürich



Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau

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

Forschungsbericht

**Thema: Ermittlung optimaler Bearbeitungsverfahren für
Kleboberflächen und Optimierung des Herstellungsverfahrens
Schleifen**

Projekt Nummer: 2011.14

Industriepartner:	Abrasives Industries AG Purbond Türmerleim
Sachbearbeiter:	Dipl.-Ing. (FH) Joachim Alves Dipl.-Ing. Philipp Hass Sven Schlegel
Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt BAFU Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung Abteilung Wald
Bearbeitungszeitraum:	2/2012 – 01/2013

Ort, Datum, Unterschrift

Prof. Dr.- Ing. habil. Dr. h.c.
Peter Niemz
ETH Zürich
Institut für Baustoffe -
Holzphysik

Ort, Datum, Unterschrift

Dr.- Ing. Klaus Rehm
Berner Fachhochschule
Hochschule für Architektur,
Holz und Bau

Einleitung

Durch den Waldumbau, infolge drohender klimatischer Veränderungen, ist in Zukunft mit einem wachsenden Anteil an Laubholz zu rechnen. Eine mögliche Verwendung des Rohstoffs ist die Nutzung im tragenden Holzbau. Jedoch müssen hier noch grundlegende Probleme geklärt werden. Um die Sicherheit, bei der Verarbeitung von Laubholz im tragenden Holzbau, zu gewährleisten müssen die Klebstoffe der Industrie verschiedene Normen erfüllen. Diese in den Normen geforderten Festigkeitskennwerte müssen von dem verklebten Holz unter unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen erfüllt werden. Dabei treten vorrangig bei erhöhter Holzfeuchte Probleme auf, die Mindeststandards für eine Zulassung im tragenden Holzleimbau, zu erfüllen.

Die Verklebungsgüte von Verbindungen bei Holz und Holzwerkstoffen ist stark von der Oberflächenqualität der zu verklebenden Materialien abhängig. Die Beschaffenheit der Oberfläche wirkt sich dabei besonders auf die Prüfung A4 nach DIN prEN 302 (2011) (Ermittlung der Zugscherfestigkeit von Verklebungen im feuchten Zustand nach Kochwasserlagerung) aus. Hierbei unterliegt die Festigkeit der Verklebung einer großen Streuung. Die derzeit üblichen Bearbeitungsverfahren zur Erzeugung der Oberfläche sind Hobeln Stirnplanfräsen und Schleifen. Mit Ausnahme des Umfangsfräsens weisen diese Verfahren sehr lückenhafte Beschreibungen des Herstellungsprozesses auf. Bei der Verklebung von Laubhölzern bewirken die höhere Dichte sowie die höheren Quell- und Schwindmasse bei Feuchteeinwirkung hohe Spannungen in der Klebefuge. Diese Forschungsarbeit soll den Einfluss verschiedener Bearbeitungsverfahren auf die Festigkeit von Klebeverbindungen quantifizieren. Dazu wird der Einfluss von verschiedenen mechanischen Oberflächenbearbeitungen (Stirnplanfräsen, Umfangsfräsen und Schleifen) auf die Verklebungsgüte mit verschiedenen Klebstoffen (Einkomponenten Polyurethanklebstoff (1K-PUR), Phenol-Resorzin-Formaldehyd Harz (PRF) und Melamin- Harnstoff- Formaldehyd Harz (MUF) untersucht. Zusätzlich werden die Auswirkungen einer chemischen Vorbehandlung der Oberfläche mit Primern für die Verklebung mit 1K-PUR betrachtet. Die entsprechend behandelten Prüfkörper werden in Anschluss an die, in der DIN prEN 302-1 (2011) beschriebenen Lagerfolgen A1 (Lagerung im Normalklima), A4 (Kochwasserlagerung) und A5 (Kochwasserlagerung und Rücktrocknung zur Ausgangsmasse), der Zugscherprüfung unterzogen.

Diese Forschungsarbeit ist das Ergebnis aus der Kooperation der Abteilung Holz und Bau der Berner Fachhochschule unter der Leitung von Dr. Ing. Klaus Rehm, der Arbeitsgruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe der ETH Zürich, geleitet von Prof. Dr. Peter Niemz, sowie den Industriepartnern Abrasives Industries AG, Purbond und Türmerleim.

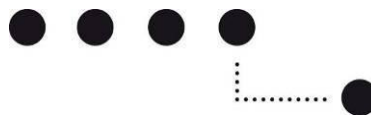
Verantwortlich für die Ausführung, sowie das Erstellen des Berichts sind seitens der AHB Biel Dr.-Ing. Klaus Rehm und Dipl.-Ing. (FH) Joachim Alves, sowie Dipl.-Ing Philipp Hass und Sven Schlegel, für die ETH Zürich. Der erste Teil des Berichts befasst sich mit der Oberflächencharakterisierung der unverklebten Fügefläche. Dieser wurde an der Berner Fachhochschule angefertigt. Der zweite Teil dient der Ermittlung der Kennwerte die von der Norm DIN prEN 302-1 (2011) gefordert werden um die Güte einer Verklebung zu beurteilen. Dieser Teil des Berichtes wurde von den Mitarbeitern der ETH Zürich angefertigt.

Teil I:

Ermittlung optimaler Bearbeitungsverfahren für Kleboberflächen und Optimierung Schleifen

Abschlussbericht

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Burgdorf, Biel



Bericht Nr.	9310-SB-01
Auftrag Nr.	9310.DPL
Klassifizierung	offen
Datum	Stand: 04.12.2012
Auftraggeber	BFH
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Soothurnstrasse 102, CH-2504 Biel

Verfasser Dr.-Ing. Klaus Rehm
Dipl.-Ing. (FH) Joachim Alves

Projektverantwortlicher Dr.-Ing. Klaus Rehm

Abteilungsleiter René Graf

INHALTSVERZEICHNIS

1	Ausgangslage / Stand der Technik	7
2	Zielsetzungen	9
2.1	Wissenschaftlich-technischen Ziele – Optimierung der Verklebung	9
2.2	Wissenschaftlich-technischen Ziele – Modellierung Schleifprozess	9
3	Projektbeteiligte	10
4	Vorgehensweise	11
4.1	Herstellung und Charakterisierung der Verklebungsoberflächen	11
4.2	Verklebungstests der Oberflächen	11
4.3	Ableitung von Solleigenschaften und Vorzugsverfahren	12
4.4	Untersuchung von Modellansätzen für das Schleifen	12
5	Recherche zum Stand der Technik bei der Beschreibung von Holzoberflächen und der Modellierung von Schleifvorgängen	13
5.1	Beschreibung der Holzoberfläche	13
5.1.1	Einfluss von Holzstruktur und Feuchtigkeit	13
5.1.2	Beschreibung der auftretenden Oberflächenschädigungen	13
5.1.3	Messtechnische Erfassung von Holzoberflächen	15

5.2	Beschreibung der Schleifwerkzeuge	17
5.3	Vergleichende Betrachtung der Beschreibung von geometrisch bestimmten Schneiden	18
5.3.1	Messtechnische Erfassung von Schleifwerkzeug-Oberflächen	20
6	Arbeitspaket 1: Herstellung von Oberflächen für die Verklebung und Charakterisierung der Oberflächen	21
6.1	Einleitung	21
6.2	Versuchsvorbereitung	22
6.3	Bearbeitungsverfahren	22
6.4	Verwendete Maschinen	22
6.4.1	Presse	22
6.4.2	Hobeln	23
6.4.3	Stirnplanfräsen	24
6.4.4	Schleifen	25
6.5	Beurteilung der Oberfläche	25
6.5.1	Kontaktwinkel	26
6.5.2	FT-IR Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer)	26
6.6	Auswertung	28
6.6.1	Kontaktwinkel	28
6.6.2	Auswertung der Ergebnisse	30
6.6.3	Auswertung der FT-IR Spektrometer	34
7	ARBEITSPAKET 4: Untersuchung von Model-lansätzen für das Schleifen, Abschätzung des Forschungsaufwandes	35
8	Verzeichnisse	36
8.1	Tabellenverzeichnis	36
8.2	Abbildungsverzeichnis	36
8.3	Literaturverzeichnis	37

1 Ausgangslage / Stand der Technik

Die Festigkeit von geklebten Verbindungen von Holz und Holzwerkstoffen ist stark von der Oberfläche der zu verklebenden Materialien abhängig. Je nach Klebstoff und Material entscheiden die Art der Bearbeitung und die Bearbeitungsqualität darüber, ob die Verklebung den Anforderungen entspricht. Die von Fertigungsverfahren abhängige Oberflächenqualität wirkt sich insbesondere bei der A4 Prüfung nach EN 302 (Prüfung im feuchten Zustand) aus.

Besonders gravierend sind die Auswirkungen bei der Laubholzverklebung. Hier bewirken die gegenüber Nadelhölzern höhere Dichte und die höheren Quell- und Schwindmasse bei Feuchteeinwirkung hohe Spannungen in den Klebfugen.

Für die Erzeugung von Kleboberflächen an Vollholz in konstruktiven Verbindungen, z.B. in Leimholzträgern, Leimholzplatten aber auch bei Keilzinkenverbindungen werden unterschiedliche Bearbeitungsverfahren genutzt. Derzeit werden Verklebungsflächen meist durch Umfangsfräsen hergestellt. Daneben wird auch Stirnplanfräsen angewendet bzw. werden die Oberflächen durch Schleifen (Bandschleifen, meist auf Breitbandschleifmaschinen) hergestellt. Ein Einfluss des Bearbeitungsverfahrens ist sowohl aus der industriellen Praxis als auch aus der Forschung bekannt. Dabei spielen alle Oberflächenmerkmale, die durch die Bearbeitung bedingt sind, (Rauheit, Welligkeit, Verdichtung der Oberfläche, Rissbildungen) eine Rolle.

Die Festigkeit der Klebverbindungen, insbesondere die Nassfestigkeit, unterliegt heute einer grossen Streuung, die die Beherrschung der Prozesse erschwert.

Insbesondere bei Laubholz ist die Erfüllung der erforderlichen Delaminierungstests nach EN 391 besonders schwierig. Aber auch bei der Prüfung der Lagerfolge A4 nach EN 302 treten vielfach Probleme auf. Die Ursachen der Unterschiede in der Verklebungsgüte zwischen den Bearbeitungsverfahren sind bisher weitgehend unbekannt. Mögliche Ursachen könnten in den unterschiedlichen Eigenschaften des Holzes im Bereich der Klebfuge liegen (Rückverformung der Verdichtung oder teilweise Zerstörung des Holzes bei Wassereinwirkung).

Es ist auch nicht bekannt, ob verschiedene Klebstoffe eine unterschiedliche Oberfläche benötigen um eine optimale Verklebung zu erreichen.

Es wurden verschiedene Untersuchungen zum Vergleich von Bearbeitungsverfahren hinsichtlich der Verklebung von Oberflächen durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden meist durch Firmen beauftragt bzw. durchgeführt, die entsprechende

Maschinen herstellen und die Eignung ihrer Maschinen und Werkzeuge hervorheben wollen. Umfassende und vergleichbare Untersuchungen sind nicht bekannt. Festigkeitsuntersuchungen zum Vergleich von Klebstoffen sind ebenfalls in grossem Umfang bekannt. Diese Untersuchungen berücksichtigen die vorgängige Bearbeitung der zu verklebenden Oberflächen und deren Charakterisierung meist nur unzureichend. Gewisse Trends sind aus Industrierversuchen bekannt (z.B. gute Verklebungseigenschaften beim Stirnplanfräsen). Ein Vergleich der Bearbeitungsverfahren ist hierbei selten vorhanden. Die verwendeten Materialien sind zwischen den unterschiedlichen Untersuchungen nicht ausreichend vergleichbar, da das Ziel der Untersuchungen meist der Vergleich von Klebstoffen und Klebverfahren ist.

Für die Verklebung relevante Oberflächeneigenschaften sind:

- Welligkeit (Einfluss auf die notwendige Klebfugendicke)
- Rauheit, Fasrigkeit (Einfluss auf die notwendige Klebfugendicke und die Penetration)
- Verdichtung, Rissbildung (Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Oberfläche und die Penetration)
- Oberflächenspannung / Randwinkelmessung von Flüssigkeiten (Einfluss auf die Ausbildung der Kontaktflächen)
- Verhalten der Oberflächen nach Einwirkung von Flüssigkeiten (Wasser, Lösungsmittel von Klebstoffen) und Einfluss auf die Verklebung (Prüfung der Verklebungsgüte z.B. Delaminierungstest, A 4 Prüfung).

Der Einfluss der Bearbeitungsverfahren, insbesondere des Schleifens, auf diese Oberflächeneigenschaften, ist nur partiell bekannt.

Die Beschreibung von Spanungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide ist in der Forschung auch für Holz mehrfach untersucht worden. So existieren Modelle für Schnittkraft und Spanbildung (z.B. von Kivimaa, Fischer, Sitkay/Csanády, Tröger, Rehm). Hier können durchaus Aussagen zur Beeinflussung der Oberfläche durch einzelne Verfahrensparameter wie Schnittgeschwindigkeit oder Schneidenverschleiss getroffen werden.

Für das Schleifen von Holz bestehen kaum Ansätze zur Beschreibung des Verfahrens. Für spezielle Anwendungen wurden Untersuchungen zum Abtrag an Holzwerkstoffen durchgeführt (Riegel 1997, Osterrath 2000).

Eine Modellierung des Verfahrens hinsichtlich des Einflusses des Werkstoffes auf Abtrag, Standzeit und Qualität sowie des Einflusses von Werkzeugeigenschaften auf die Qualität der Oberfläche sind nicht bekannt.

2 Zielsetzungen

2.1 Wissenschaftlich-technischen Ziele – Optimierung der Verklebung

Der Einfluss der Bearbeitungsverfahren und der damit erzeugten Oberflächen auf die Festigkeit verschiedener Klebverbindungen soll quantifiziert werden.

Aus den Ergebnissen werden Verfahrensanleitungen abgeleitet, die Grenzwerte für technologische Einflussgrößen beinhalten um die Streuung der Verklebungsfestigkeit zu senken und die mittlere Festigkeit zu erhöhen. Damit wird die Zuverlässigkeit der Verklebung erhöht.

Voruntersuchungen (Elstermann, 2011) haben gezeigt, dass sowohl unter ausgewählten Prozessbedingungen gefräste als auch geschliffene Oberflächen eine gute und konstante Nassfestigkeit haben. Zwischen den Fräsverfahren wurden deutliche Unterschiede ermittelt. Das Stirnplanfräsen erwies sich als sehr gut geeignet.

Aus den quantifizierten Zusammenhängen zwischen den Oberflächeneigenschaften und der Klebfestigkeit soll auf die Wechselwirkung zwischen der Oberfläche und der Verklebung geschlossen werden. Es wird untersucht, ob einzelnen Eigenschaften der Oberfläche ein direkter quantifizierbarer Einfluss auf die Festigkeit zugeordnet werden kann. Dies soll Grundlage einer Verfahrensabgrenzung und Qualitätssicherung bei der Herstellung von Kleboberflächen sein.

In die Untersuchungen werden auch unterschiedliche Klebstoffsysteme (PUR, MUF) einbezogen, dabei wird untersucht, ob die Klebstoffsysteme unterschiedlich auf Änderungen der Oberflächeneigenschaften reagieren.

Die Beschreibung des Fräsprozesses und die Reproduzierbarkeit der Fräsbedingungen sind heute weitgehend gegeben. Dagegen liegen derartige Untersuchungen für das Stirnplanfräsen und insbesondere für das Schleifen nur sehr lückenhaft vor. Die für die Verklebung notwendigen Beschreibungen sollen im Rahmen des Projektes untersucht werden.

In der Praxis wird die Holzoberfläche vor dem Klebstoffauftrag teilweise mit geringen Wassermengen benetzt. Die Auswirkungen dieses Vorgehens auf die Holzoberfläche und die Klebstoffverteilung werden untersucht.

2.2 Wissenschaftlich-technischen Ziele – Modellierung Schleifprozess

Das Schleifen von Holz ist auch heute noch ein Prozess, der fast ausschliesslich erfahrungsbasiert durchgeführt wird. Die Einflussfaktoren auf Qualität,

Energieverbrauch, Standzeit und weitere wichtige Mechanismen sind kaum bestimmbar. Für das Schleifen fehlen heute noch weitgehend Ansätze zur Beschreibung und Modellierung der Verfahrenseinflüsse.

In dem Projekt wird geprüft, ob sich Ansätze für Prozessmodell zum Zusammenhang von Schleifparametern (z.B. Körnung, Kornbindung, Schnittgeschwindigkeit, Standzeit) zu der Verklebungsqualität finden lassen.

Dabei werden vorhandene Ansätze der Modellierung geprüft und die Möglichkeiten der Realisierung einer industriell verwertbaren Modellierung abgeschätzt.

Auf Grund der zur Verfügung stehenden Mittel für das Projekt wird die Durchführung einer Modellierung nicht möglich sein. Schwerpunkt der Arbeit ist daher, Ansätze für eine weitergehende Modellierung aus bestehenden vergleichbaren Problemstellungen abzuleiten und die Machbarkeit abzuschätzen.

3 Projektbeteiligte

Projektförderung:

Bundesamt für Umwelt

Forschungsstellen:

Berner Fachhochschule,
Departement Architektur, Holz und Bau,
Solothurnstr. 102
2504 Biel,

Projektleiter: Dr.-Ing. Klaus Rehm

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Joachim Alves

ETH Zürich
Institut für Baustoffe, Holzphysik
Schafmattstrasse 6
CH 8093 Zürich

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing.habil. Dr.h.c. Peter Niemz

Projektbearbeiter:

4 Vorgehensweise

4.1 Herstellung und Charakterisierung der Verklebungsoberflächen

Es werden Oberflächen für die Verklebung hergestellt und physikalisch und chemisch charakterisiert. Für die Oberflächenherstellung werden folgende Verfahren genutzt:

- Umfangsfräsen
- Stirnplanfräsen
- Bandschleifen.

Die Oberflächencharakterisierung erfolgt nach den Merkmalen:

- Mechanische Struktur (Rauheit, Welligkeit)
- Verdichtung der Oberflächen und Rückverformung nach Wassereinwirkung durch den Klebstoff
- Rissbildung in / unter der Oberfläche
- Oberflächenspannung (Randwinkelmessung)
- Charakterisierung mit FTIR Spektroskopie

4.2 Verklebungstests der Oberflächen

Es wurden folgende Klebstoffsysteme genutzt:

1 K-PUR (2 Varianten)

MUF PUR (1 Variante)

PRF PUR (1 Variante)

Alle erzeugten Oberflächen werden mit den Klebstoffvarianten verklebt.

Die Klebverbindungen werden getestet:

- Prüfung von Klebfugeneigenschaften in Normklima
- Prüfung von Klebfugeneigenschaften nach Lagerfolge (A4, im nassen Zustand)
- In situ Prüfung der Vorgänge im Bereich der Klebfuge bei Wassereinwirkung
- Ergebnis:

Die Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften auf die Verklebung sind im Ergebnis der Arbeiten bekannt.

4.3 Ableitung von Solleigenschaften und Vorzugsverfahren

Im Ergebnis der Tests werden Vorzugsvarianten für einzelne Anwendungen vorgeschlagen.

Es werden Bearbeitungsverfahren und deren optimale Parameter für die Verklebung der Oberflächen ermittelt, woraus eine Vorzugsmatrix abgeleitet wird.

4.4 Untersuchung von Modellansätzen für das Schleifen

Es werden vorhandene Modellansätze für Schleifverfahren untersucht

- • Schleifen Metall
- • Schleifen Holzwerkstoffe
- • Fräsen von Holz
- • mechanische Modellierung von Holz und insbesondere Rissentstehung an Holz

Der Forschungsaufwand und der Nutzen möglicher Prozessmodellierungen beim praktischen Einsatz wird abgeschätzt.

5 Recherche zum Stand der Technik bei der Beschreibung von Holzoberflächen und der Modellierung von Schelfvorgängen

5.1 Beschreibung der Holzoberfläche

5.1.1 Einfluss von Holzstruktur und Feuchtigkeit

Die Holzstruktur wird überwiegend durch die Anisotropie (Orthotropie) und die Elastizität bestimmt. Frühholzbereiche besitzen durch ihre Zellwandstärke eine geringere Elastizität. Dadurch federt der Zellkörper stärker ein. Bei normalen umgebungsbedingungen versagt Holz im Allgemeinen durch Sprödbbruch. [Rie97] Gebrochene und gequetschte Zellwände oder Fasern können sich bei Feuchtigkeitseinfluss zum Beispiel durch Leim wieder in Richtung ihres Ausgangszustand zurückbewegen und somit eine Ungleichmässige Oberfläche erzeugen. Zudem sind die beschädigten Bereiche geringer Belastbar.

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff, dadurch kann eine verdichtete Holzoberfläche durch Aufnahme von Flüssigkeit rau werden. Hierbei stellen sich die verdichteten Fasern an der Oberfläche wieder auf. Aber auch die unterhalb der Oberfläche liegenden deformierten Zellen gehen teilweise wieder in ihre Ausgangslage zurück. Auch die erhöhte Welligkeit zwischen den Früh- und Spätholzbanden ist hierauf zurück zu führen. Der Anstieg der Rauheit bei feuchteinwirkung kann über den Einsatz von neuwertigen Schneiden vermindert werden. Ein Zusammenhang zwischen der Gefügeschädigung durch stumpfe Werkzeuge und zunehmender Rauheit, Welligkeit und Anzahl deformierter Zellschichten ist generell zu erkennen. [Sch00]

5.1.2 Beschreibung der auftretenden Oberflächenschädigungen

Bei der Bearbeitung von Massivholzoberflächen kommt es durch verschiedene Einflüsse zu Beschädigungen an der Holzstruktur. Die erstellte Oberfläche soll optimalerweise ihr natürliches Erscheinungsbild erhalten und nicht durch Bearbeitungsspuren an Qualität verlieren. Genormte, reproduzierbare Oberflächen wie es sie in der Metallindustrie gibt es für Holzoberflächen nicht. Als heterogener Werkstoff gibt Holz wenig bis keine Möglichkeit Sicht- oder Tastvergleiche zu realisieren. Oft ist es notwendig, dass Prüfer mit hohem Fachwissen und sensibler Auffassungsgabe Oberflächen beurteilen. Fehlende objektive Qualitätsgrößen erschweren die Reproduzierbarkeit von Oberflächen.

Die Strukturrauheit von Holz ist nicht beeinflussbar und kann daher im Gegensatz zur Bearbeitungsrauheit nicht verändert werden. Somit muss eine Differenzierung zwischen diesen Größen gemacht werden, um die Oberflächenqualität objektiv bewerten zu können.

Fräsen	Holzschliff
Maß- und Formabweichungen Verfahrenstypische Bearbeitungs Spuren	Verfahrenstypische Bearbeitungsspuren
• Fäden (Schnittflächenrauheit) • Messerschläge (kinematische Rauheit) • unvollständig abgetrennte Holzbestandteile (Fasern)	• unvollständig abgetrennte Holzbestandteile (Fasern) • Texturen (Schleifriefen) • Abdrücke ausgebrochener Schleifkörner
Gefügeschädigungen bestandteile (Fasern)	Gefügeschädigungen
• Vorspaltrisse in den Holzkörper • Deformationen und Brüche innerhalb der obersten Zellschichten (Pyrolyseerscheinungen)	• Deformationen und Brüche innerhalb der obersten Zellschichten

Tabelle 1: Topographiemerkmale einzelner Bearbeitungsschritte [Sch00]

Die in Tabelle 1 unter Fräsen aufgeführten oberflächennahen Schädigungen des Holzgefüges haben einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Grenzschicht. Diese Schädigungen der Holzstruktur sind allerdings zu vernachlässigen, wenn im Anschluss ohnehin geschliffen wird.

Beim Schleifen von Holz kommt es überwiegend zum Spanen mit negativem Spanwinkel. Abbildung 1 zeigt die Schädigung im Holz die durch so eine Beanspruchung hervorgerufen werden kann. Diese Effekte werden durch zu hohen Druck oder Verwendung eines bereits abgenutzten Schleifmittels verstärkt.

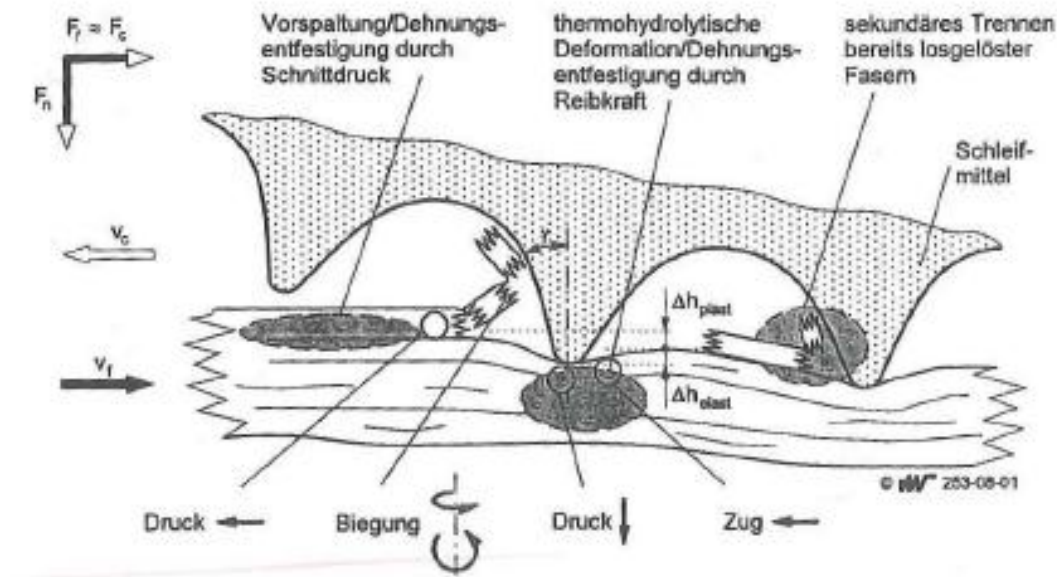


Abbildung 1: Beanspruchung eines Holzkörpers durch Spanen mit negativem Spanwinkel [Rie97]

5.1.3 Messtechnische Erfassung von Holzoberflächen

Die neuartigen Mess und Bewertungsverfahren ermöglichen durch eine flächige Aufnahme der Profile eine differenzierte Bewertung von Rauheitsanteilen. So wird die Bearbeitungsrauheit von der Strukturrauheit mittels Bildanalyse getrennt und kann dadurch ohne dessen Einflüsse bewertet werden. Folgende Einflussfaktoren müssen hierbei berücksichtigt werden:

- Oberflächenstruktur nach der Bearbeitung (Höhenprofil)
- Messgenauigkeit (Auflösung des Messsystems)
- Horizontaler Messbereich (Aussagesicherheit)
- Gegenseitiger Einfluss von Sensor und Oberfläche

	zerstörend / beschädigend	berührend	berührungslos	
			optisch	nicht optisch
mit Profilwiedergabe	- Rastertunnelmikroskopie¹⁾ - Rasterelektronenmikroskopie mit stereoskopischer Auswertung¹⁾	mechanische Tastschnittverfahren : a.) kontinuierliche Abtastung b.) intermittierende Abtastung	- Sensorsystem mit dynamischer Fokussierung - Lichtschnittverfahren - Lichtmikroskop mit stereoskopischer Auswertung - Moiréverfahren - Interferenzverfahren (Holographie, Speckles- und Weißlichtverfahren)	- Rasterkraftmikroskopie³⁾ - berührungsloser Oberflächentaster mit schwingender Diamantspitze^{3) 4)}
ohne Profilwiedergabe	- Pastenausbreitungstest - Tuschierverfahren	- pneumatische Verfahren ²⁾ (Solex- und Ansaugverfahren)	- Erfassung der räumlichen Abstrahlcharakteristik - Oberflächen-Vergleichsmuster	- kapazitive Verfahren

© W 316-05-00

Abbildung 2: Meßverfahren zur Erfassung von Oberflächen [Sch00]

- 1 Zerstörend, da die Oberfläche elektrisch leitend gemacht werden muß (im Allgemeinen wird die Oberfläche mit Gold besputtert).
- 2 Berührend, da die Sensoren auf die Oberfläche aufgesetzt werden.
- 3 Berührungslos, da die Wechselwirkungskräfte minimal gehalten werden, so daß selbst weiche Materialien abbildbar sind.
- 4 Sensor Typ Nanoswing 100, Firma Hommelwerke GmbH, Schwenningen; Patent OE 38 20 518

Die Norm VDI 3414 befasst sich in den vier Blättern:

- Blatt 1: Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen, Oberflächenmerkmale
- Blatt 2: Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen - Prüf- und Meßmethoden
- Blatt 3: Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen - Gefräste, gesägte, gehobelt, gebohrte und gedrehte Oberflächen
- Blatt 4: Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen - Geschliffene Oberflächen

mit der Problematik der Holzoberflächen. Trotz aufwendiger und moderner Messmethodik kann vielfach nur eine sensorische (manuelle) Bewertung vorgeschlagend werden.

Aber mit diesem Normentwurf steht erstmals eine einheitliche Richtlinie der Oberflächenmessung für Holzwerkstoffe mit empfohlenen Kennwerten zur Verfügung.

Einzelne Oberflächeneigenschaften (Verdichtung, Rissbildung) lassen sich nicht direkt separat messtechnisch erfassen.

Auf eine tiefere Darstellung der Inhalte der VDI-Richtlinie wird hier verzichtet. Insbesondere ist in dieser Richtlinie eine aktuelle Zusammenfassung der Messverfahren unter Berücksichtigung der sensorischen Beurteilung für die Holzbearbeitung enthalten.

5.2 Beschreibung der Schleifwerkzeuge

Beim Schleifen von Holz werden in der Regel drei verschiedene Verfahren unterschieden. Das Bandschleifen, Schleifen mit rotierendem Werkzeug und das Schwingschleifen. In Abbildung 3 sind diese drei verfahren getrennt aufgelistet und nach Anwendungen und Technik unterteilt.

3	Bandschleifen				Schleifen mit rotierendem Werkzeug				Schwingschleifen			
4	Plan-	Rund-	Profil-	Form-	Plan-	Rund-	Profil-	Form-	Plan-	Rund-	Profil-	Form-
5	im Gegenlauf		im Gleichlauf		im Gegenlauf		im Gleichlauf		rotierend	kreisförmig oszillierend	linear oszillierend	
6	Umfangs-		Seiten-		Umfangs-		Seiten-/Säim-		Kurzhub-		Langhub-	
7	Längs-	Schräg-	Quer- (Querlauf)	Normal- (Quer)	Längs-	Schräg-	Quer-	Normal-	Längs-	Schräg-	Quer-	Normal-
8	mit konstanter Zustellung		mit konstantem Anpreßdruck		mit konstanter Zustellung		mit konstantem Anpreßdruck		mit konstanter Zustellung		mit konstantem Anpreßdruck	
9	mit Band- oszillation		ohne Band- oszillation									

© IW 253-30-00

Abbildung 3: Übersicht der Fertigungsverfahren "Schleifen von Holz und Holzwerkstoffen [Rie97]

Zudem unterscheiden sich die Verfahren grundsätzlich in 2 Anwendungen in Abbildung 4 sind diese beiden verschiedenen Arten dargestellt:

- Glätten (Schleifen mit konstantem Druck)
- Kalibrieren (Schleifen mit konstanter Zustellung)

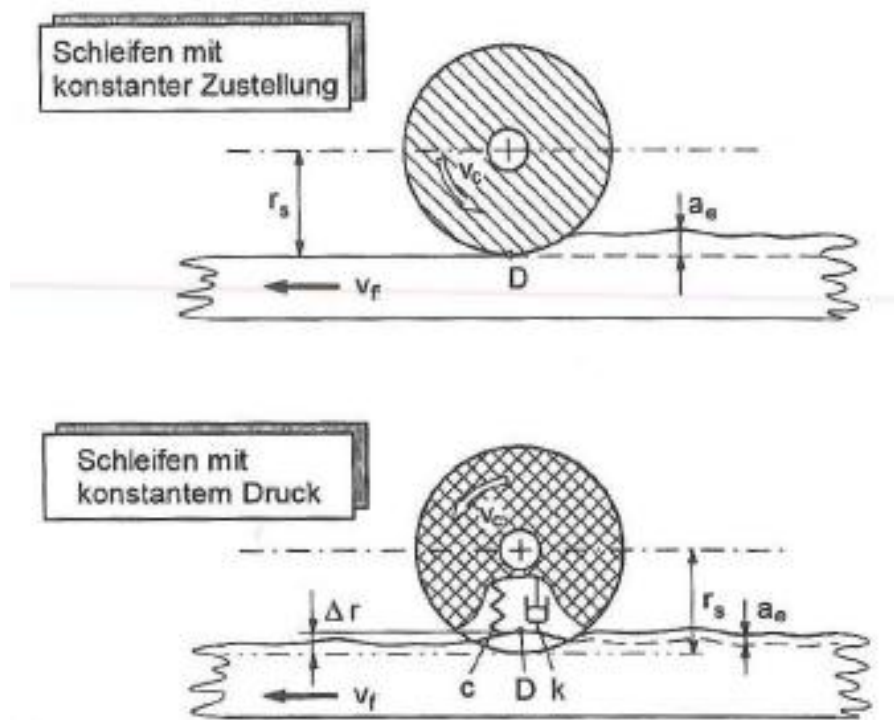


Abbildung 4: Arten der Prozessführung beim Schleifen mit Schleifmitteln auf Unterlage [Rie97]

Die Norm VDI 3414, Blatt4: Beurteilung von Holz- und Holzwerkstoffoberflächen - Geschliffene Oberflächen beinhaltet auch typische Schleifverfahren und die Beschreibung der Schleifwerkzeuge. Eine quantifizierbare Beschreibung der Schleifwerkzeuge ist hier auch nicht enthalten. Neben der Angabe der Körnung und der groben Beschreibung der Streuung (offen - geschlossen) und der Bindungsmaterialien werden keine Angaben gemacht.

Für eine Modellierung sind hier auch quantifizierte Beschreibungen notwendig.

5.3 Vergleichende Betrachtung der Beschreibung von geometrisch bestimmten Schneiden

Die Schneidengeometrie wird in der Industrie sowie in der Forschung einheitlich durch eingeführte Kenngrößen beschrieben. So werden die Verschleisskenngrößen wie zum Beispiel die Verschleissmarkenbreite mit VB und der Schneidenversatz mit SV benannt. Ebenso kommen Messgrößen zum Kolkverschleiss (Abbildung 5) zur Anwendung.

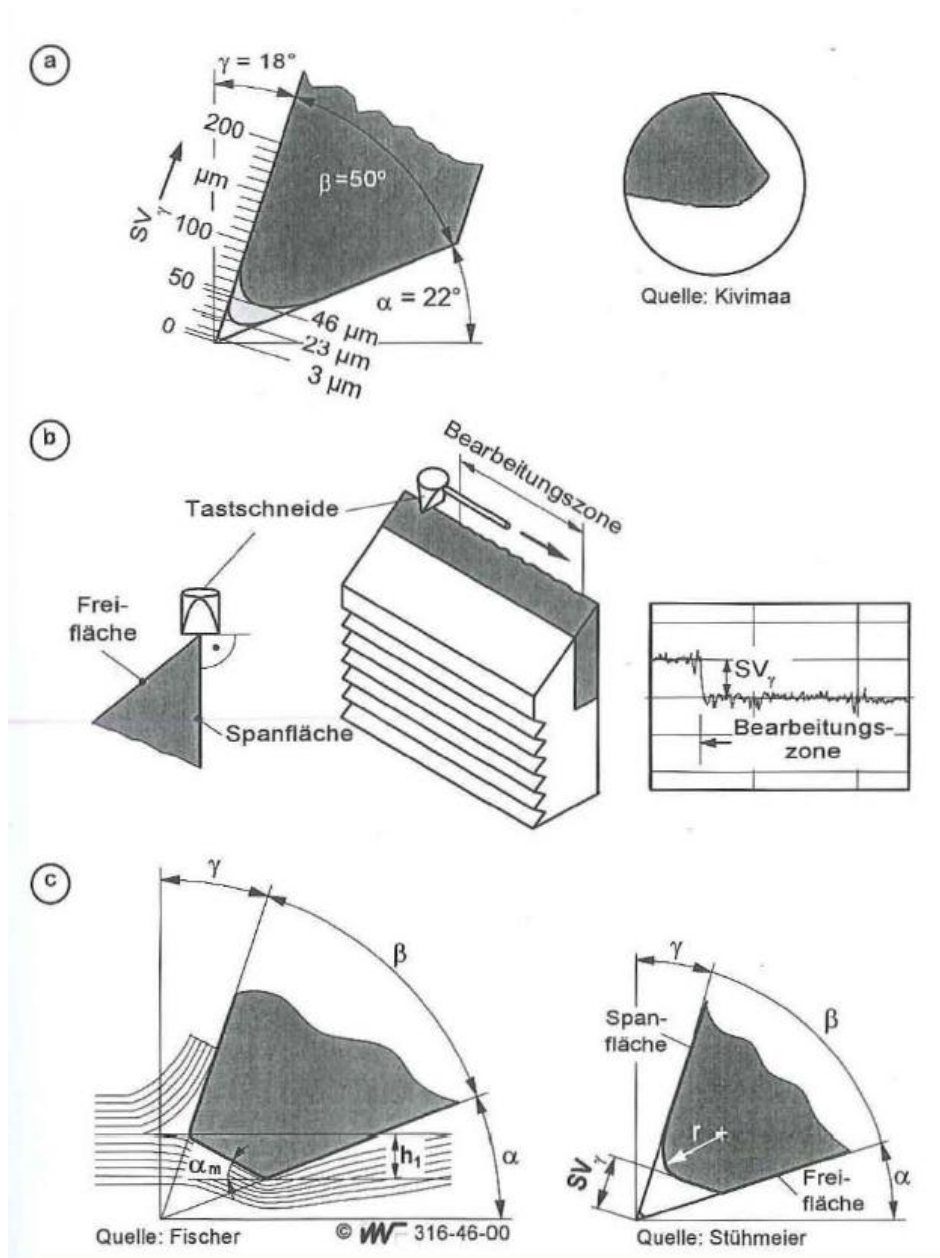


Abbildung 5: Schneidenverschleißmessung beim Fräsen von Massivholz [Sch00]

- a) Verschleissformen (Verrundungsverschleiss)
- b) SV - Messung
- c) Abstumpfung h Mikrofreiwinkel α und Schneidenradius r

Beim Schleifen kann eine ähnliche Beschreibung wie für eine Einzelschneide (Abbildung 5) nicht zum einsatz kommen. Die regellos geformten Schleifkörner ergeben hier eine grosse Anzahl von Scheiden, dadurch ist die Beschreibung der Schleifmitteltopographie nur in statistischer Weise sinnvoll. Abbildung 6 zeigt den Aufbau eines schleifmittels.

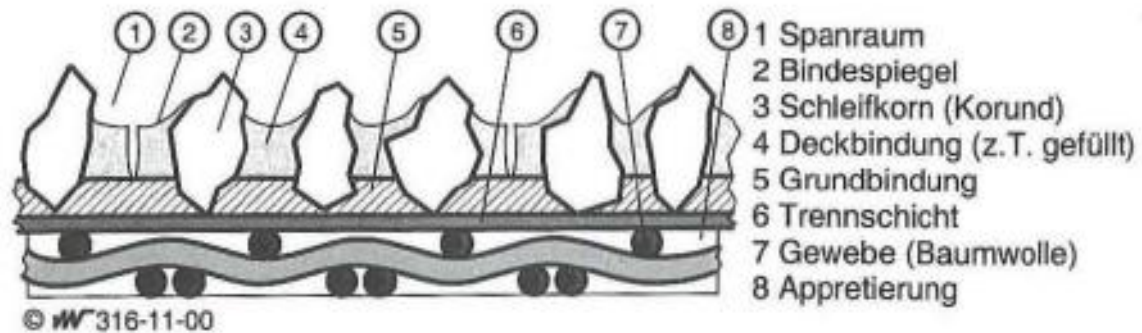


Abbildung 6: Schematischer Aufbau von Schleifmitteln auf Unterlage [Sch00]

Für die Oberflächengüte nach dem Schleifen von Massivholz sind die Korndichte und die Kornhöhenverteilung ebenso wichtig wie die Körnung selbst. Neueste Oberflächenmessverfahren erlauben es zwar, die Oberfläche von Schleifmitteln dreidimensional zu erfassen, jedoch gibt es bis jetzt noch wenig oder nur geringe Erfahrungen für die Erfassung von Schleifmitteln der Holzindustrie. Gerade die Abschätzung von Messunsicherheiten fehlt hier. [Sch00]

5.3.1 Messtechnische Erfassung von Schleifwerkzeug-Oberflächen

In Abbildung 2 sind verschiedene Messverfahren aufgeführt. Zur ausreichenden Charakterisierung der Schleifmitteloberflächen ist eine flächige Messung notwendig, wobei tastende Messverfahren zu langsam sind und nicht realistisch eingesetzt werden können.

Das Tastschnittverfahren mit Tastspitzen als taktile Sensoren liefert dabei gute Messergebnisse bei der Bestimmung der Oberflächengüte von Schleifmitteln. Durch eine hohe laterale Auflösung können die Kornspitzen auf Mikrometer-Bruchteile genau erfasst werden. Eine Beschädigung oder Auslenkung der Tastspitze wurde nicht beobachtet.

Durch die erforderliche hohe Auflösung wird jedoch eine grosse Menge an Messdaten erzeugt und viel Zeit in Anspruch genommen. Probemessungen mit Fehlerabschätzung sind daher zur Ermittlung der notwendigen Auflösung zu empfehlen. [Sch00]

Die einzelnen Kornspitzen sind mittels optischen Verfahren nur sehr schwer oder mit Messfehlern zu bestimmen, da diese wie eine spiegelnde Oberfläche wirken. Hingegen ist die Bindung oft matt-schwarz und absorbiert das Licht der Sensoren.

Dieser grosse Unterschied verursacht eine hohe Fehlerrate im Profil. Variation der Messgeräte (verschiedene Hersteller) oder auftragen von dünnen Schichten zur Verbesserung der optischen Eigenschaften ergaben keine deutliche Verbesserung der Ergebnisse.

Die Messfehler optischer Verfahren auf Grund der Reflexion spiegelnder Flächen der Schleifkörner müssen durch Algorithmen eliminiert werden. Standardverfahren zur Messung sind auch heute noch nicht in der Anwendung.

Verschleiss von Schleifmittel

Durch die Veränderung der Korngeometrie während des Schleifens von Holz, durch Kornausbrüche und Absplitterungen und dem Zusetzen der Spanräume wird der Verschleiss bestimmt. Hierbei ist zu berücksichtigen dass ein Zusetzen der Spanräume kein Dauerzustand sein muss. Es kann zur so genannten Selbstreinigung kommen. Hingegen ist ein Ausbrechen, Verrunden oder Absplittern von Körnern irreversibel.

Die Messung des Verschleisses ist teilweise möglich, hier wird eine Veränderung des Oberflächenprofils aufgenommen, die weitgehend mit dem Verschleiss korreliert. Schleifmittel mit mehrlagigem Korn oder selbstschärfende Schleifmittel mit Abrieb der Unterlage können dagegen kaum im Verschleiss der Körnung bestimmt werden, die ist der Verschleiss durch die Veränderung der Makrostruktur bestimmt.

6 Arbeitspaket 1: Herstellung von Oberflächen für die Verklebung und Charakterisierung der Oberflächen

6.1 Einleitung

In der Holzindustrie werden verschiedene Leime mit verschiedenen Holzoberflächen je nach Bedarf kombiniert. Dabei ist die Erfahrung von einzelnen Personen für die Vorbereitung von Oberflächen vor der Verleimung ausschlaggebend. Es gibt keine allgemeinen Vorschriften, oder genormte Bearbeitungsschritte. In verschiedenen Anforderungsebenen und Qualitätsebenen kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Holz wird nach dem Hobeln, Fräsen oder Schleifen verleimt, mit Einsatz von Primer oder auch ohne und in Kombination mit den unterschiedlichsten Leimen. Es kann keine Vorbehandlungsmethode einem Verleimverfahren zugeordnet werden. Erschwerend kommt hinzu, dass jede Holzsorte andere Rahmenbedingungen mit sich bringt und anders auf ein Verfahren reagiert. Diese können sogar bei gleichen

Holzsorten aus unterschiedlichen Regionen voneinander abweichen. Eine Aussage über die bestmögliche Vorbehandlung einer bestimmten Holzsorte für einen bestimmten Leim, kann nicht ohne Belastungsversuche bestimmt werden.

6.2 Versuchsvorbereitung

Damit der Einfluss der Holzstruktur auf die Oberfläche so gering wie möglich bleibt, ist das gesamte verwendete Holz aus einem Stamm geschnitten worden.

Das eingesetzte Holz (Buche) wurde so aufgetrennt, dass möglichst stehende Jahrringe entstehen.

Nach dem Vortrocknen an der freien Luft für 2 Wochen auf ca. 12% relative Holzfeuchte ist jedes Brett einzeln begutachtet und die Zuschnittgrösse mittels Schablone aufgetragen worden. Dadurch wurden Rotkern und Äste in den späteren Probestücken vermieden. Danach wurde es auf 700mm x 120mm x 12mm (bzw. 8mm) gehobelt.

Ab dem Zeitpunkt wurde das Holz ausschliesslich bei Normalklima (20°C und 65% relativer Luftfeuchte) in einer Klimakammer gelagert. Die relative Holzfeuchte stellt sich bei dem Klima auf die Normfeuchte von 12-13% ein.

6.3 Bearbeitungsverfahren

Zur Verleimung sind die Zuschnitte mit dem jeweiligen Verfahren

- Umfangsplanfräsen (Hobeln),
- Stirnplanfräsen,
- Quer- und
- Längsschleifen)

bearbeitet, danach jedes Brett zu 2 Teilen von 320mm x 130mm x 5mm aufgetrennt.

6.4 Verwendete Maschinen

6.4.1 Presse

Die Siempelkamp Presse und die Presslehre (Abbildung 7) wurden benutzt um die Zuschnitte zu verleimen. Die verwendeten Primer und Leime wurden abgewogen (genaue Angaben ETH-Zürich). Dazu wurden die jeweils 6 zu verleimenden Paare (320x120x10) übereinander in die Pressleere gelegt und mit 3 MPa verpresst.

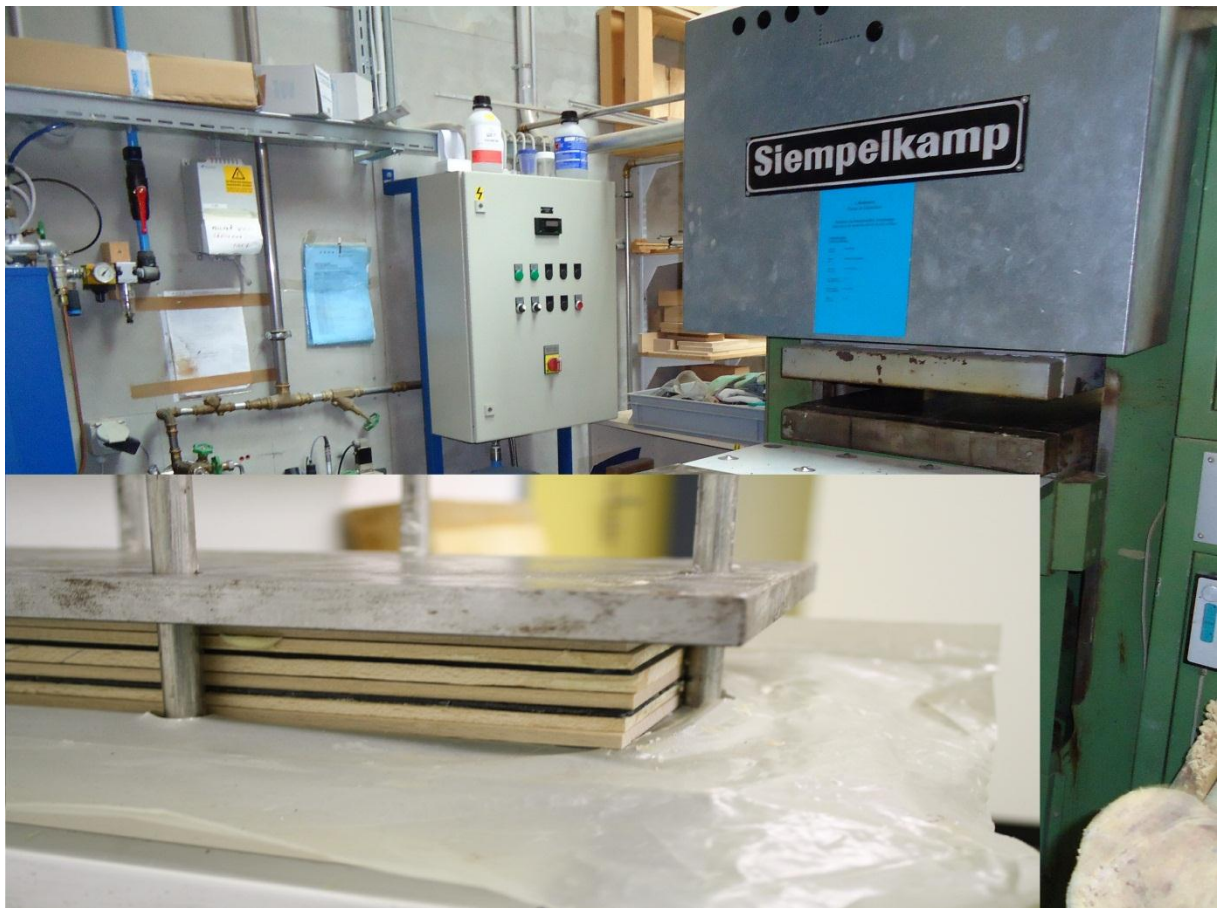


Abbildung 7: Presse der Firma Siempelkamp und Presslehre

6.4.2 Hobeln

Abbildung 8 zeigt die verwendete Hobelmaschine. Es wurden frisch geschärfte Messer genutzt. Die Tabelle 2 zeigt die Parameter.



Abbildung 8: Hobelmaschine der Firma Brugg

Tabelle 2: Parameter Hobelmaschine

Variable	Wert
V_f (Vorschubgeschwindigkeit)	8m/min
a_e (Arbeitseingriff)	1mm
D (Flugkreisdurchmesser)	130mm
f_z (Schneidenzahl)	4
n (Drehzahl)	5000 U/min
λ (Achswinkel)	0°

6.4.3 Stirnplanfräsen

Für das stirnplanfräsen wurde die in Abbildung 9 gezeigte CNC-Maschine der Firma MAKa verwendet. Der benutzte Fräser wurde um 0.2° in Fräsrichtung geneigt um dem Werkzeug genügend Freilauf auf der Rückseite zu geben. Die Vorschubgeschwindigkeit lag bei 6m/min, der Durchmesser des Fräasers war 80.4 mm und die Spanabnahme betrug 3mm.

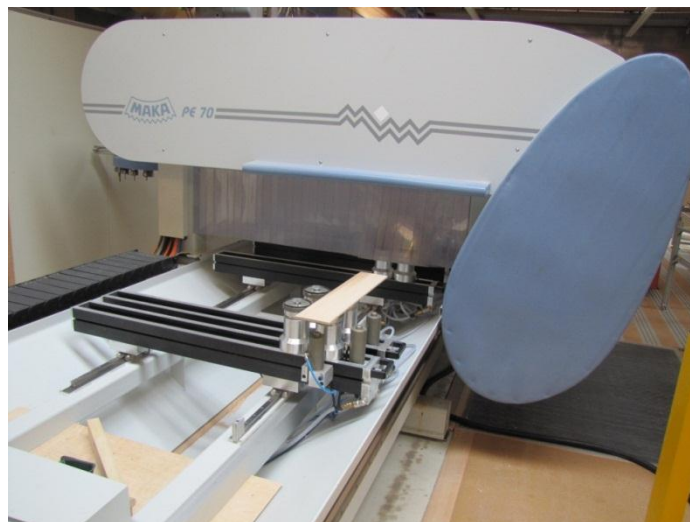


Abbildung 9: 5-Achs CNC-Maschine der Firma MAKa

Tabelle 3: Parameter Stirnplanfräsen

Variable	Wert
V_f (Vorschubgeschwindigkeit)	6m/min
a_e (Arbeitseingriff)	3mm
D (Flugkreisdurchmesser)	80,4mm
f_z (Schneidenzahl)	3

n (Umdrehungen/min)	8000
Anstellwinkel	0,2°
Länge ab Schaft	120,2mm

6.4.4 Schleifen

Das Quer- und Längsschleifen ist mit Hilfe der in Abbildung 10 gezeigten Heesemann Breitbandschleifmaschine durchgeführt worden. Pro Brett wurde 1mm in 0.3mm Schritten abgetragen. Das Schleifpapier hatte die Körnung 100 und war vorher unbenutzt. Der Vorschub war 6m/min.



Abbildung 10: Breitbandschleifmaschine MFA6 Impression der Firma Heesemann

Tabelle 4: Parameter Schleifen

Variable	Wert
V_f (Vorschubgeschwindigkeit)	6m/min
V_c (Bandgeschwindigkeit)	14.4m/s
a_e (Arbeitseingriff)	0.3mm
Körnung	100

6.5 Beurteilung der Oberfläche

6.5.1 Kontaktwinkel

In Abbildung 11 ist das Gerät zum messen des Kontaktwinkel der Firma Krüss abgebildet. Durch die Spritze wird ein Tropfen Wasser auf die Oberfläche des Probestückes gegeben. Mit der Kamera ist ein Video davon aufgezeichnet worden.

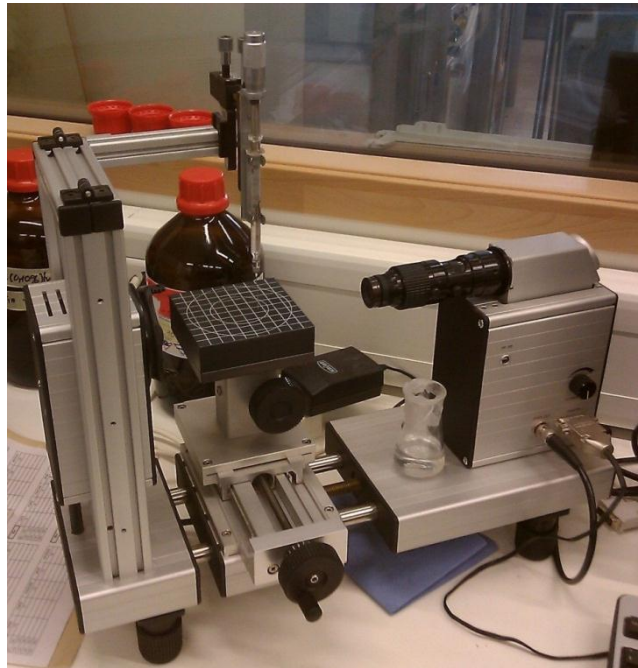


Abbildung 11: Gerät zur Kontaktwinkelmessung der Firma Krüss

6.5.2 FT-IR Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer)

Das FT-IR der Firma PerkinElmer ist in Abbildung 12 zu sehen. Eine durch ein Mikrotrom sehr dünn geschnittene Holzprobe wird mit dem Druckbalken auf den Kristall in der Mitte der Edelstahlplatte fest aufgedrückt und dann das Spektrum gemessen.



Abbildung 12: FT-IR Spectrum 100 der Firma PerkinElmer

Insgesamt sind 2 Messungen für 5 Proben pro Bearbeitung (Hobeln, Stirnplanfräsen, Querschleif, Längsschleif) und Vorbehandlung (Natur, DMF-Primer, VKS20-Primer) zu 4 Zeitpunkten (0, 3, 6, 24 Stunden) gemacht worden. Zudem noch 2 Messung für 5 Proben Hobeln O₂ (Lagerung unter O₂ Ausschluss) bei 2 Vorbehandlungen (Natur, DMF-Primer) zu 2 Zeitpunkten (0,24 Stunden). Dies sind insgesamt 480 + 40 Messungen.

Bei der Messung der Proben mit VKS20-Primer kam es zu einer hartnäckigen Verschmutzung des Kristalls, welche erst spät bemerkt wurde. Die betroffenen Proben sind bekannt und die Auswirkungen auf die Ergebnisse wurden bei der Auswertung berücksichtigt.

Tabelle 5: Übersicht der FT-IR Messungen

Bearbeitung	Hobeln	Stirnplanfräsen	Längsschleifen	Querschleifen	Hobeln O ₂	
Varianten	Natur	DMF	VKS20		Natur	DMF
Proben	5				5	
Zeitpunkte	0 Std.	3 Std.	6 Std.	24 Std.	0 Std.	24 Std.
Messungen	2				2	
Gesamt	480 Messungen				40 Messungen	

6.6 Auswertung

6.6.1 Kontaktwinkel

Bei der Auswertung der Videos zur Kontaktwinkelmessung hat die automatische Erkennung mit dem zugehörigen Programm nicht korrekt funktioniert (Abbildung 13). Widersprüchliche Kontaktwinkel wurden gemessen. Kontaktwinkel von fast 180° sind nicht plausibel. Auch nach der Bereinigung der offensichtlichen Fehlmessungen ist die Streuung noch viel zu hoch (Abbildung 14). Wahrscheinlichster Grund dafür liegt in der Struktur der Holzoberfläche, die dem Programm die Abgrenzung zwischen Holzprobe und Wassertropfen erschwert.

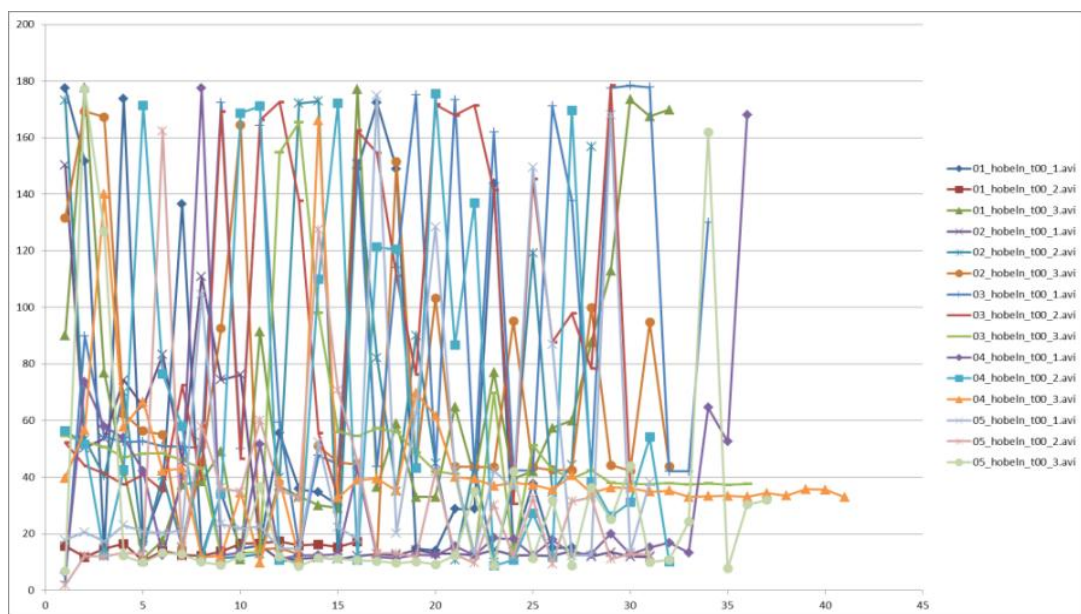


Abbildung 13: Auswertung der Kontaktwinkel durch das zugehörige Programm

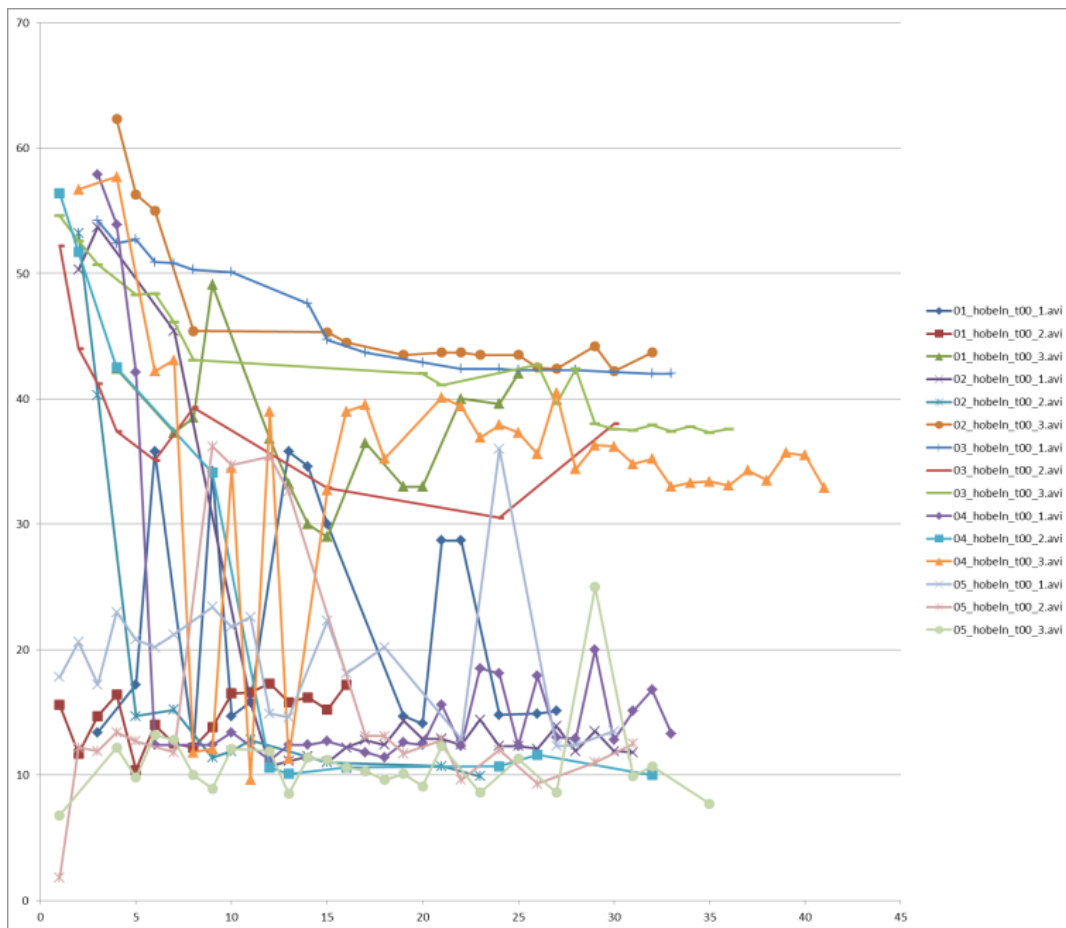


Abbildung 14: Auswertung der Kontaktwinkel durch das zugehörige Programm nach Bereinigung von offensichtlichen Messfehlern

Die Auswertung der Kontaktwinkel ist dadurch manuell auf einem Bildschirm mit Hilfe einer bedruckten Folie (Abbildung 15) gemacht worden. Die Videos sind nach 10 Sekunden angehalten und der Winkel wurde gemessen. Die Skalierung der Folie war im Abstand von 5° aufgedruckt. Dies ist somit auch die Ablesegenauigkeit der Methode.

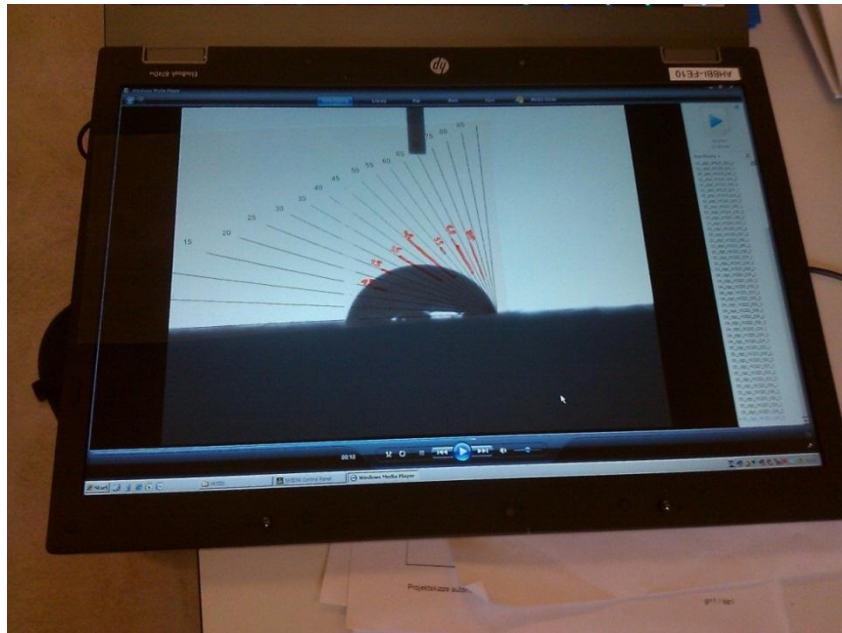


Abbildung 15: Ablesen des Kontaktwinkels mit Hilfe einer bedruckten Folie

Insgesamt sind 3 Messungen für 5 Proben pro Bearbeitung (Hobeln, Stirnplanfräsen, Querschleiff, Längsschleiff) und Vorbehandlung (Natur, DMF-Primer, VKS20-Primer) zu 4 Zeitpunkten (0, 3, 6, 24 Stunden) gemacht worden. Dies sind insgesamt 720 Messungen. Alle Messungen sind in das Ergebnis eingeflossen.

Tabelle 6: Übersicht der Kontaktwinkelmessungen

Bearbeitung	Hobeln	Stirnplanfräsen	Schleifen längs	Schleifen quer
Varianten	Natur	DMF	VKS20	
Proben	5			
Zeitpunkte	0 Std.	3 Std.	6 Std.	24 Std.
Messungen	3			
Gesamt	720 Messungen			

6.6.2 Auswertung der Ergebnisse

Die 15 Messungen pro Bearbeitung, Vorbehandlung und Zeitpunkt sind jeweils zu einem Mittelwert zusammengefasst und dann in einem Diagramm als zeitlicher Verlauf des Kontaktwinkels ausgegeben worden.

In Abbildung 16 sind die Verläufe der Kontaktwinkel der verschiedenen Bearbeitungen über die Zeit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass generell der Kontaktwinkel über die Zeit ansteigt. Der geringere Kontaktwinkel nach 24 Stunden für das Querschleifen ist in der Differenz kleiner als die Ablesegenauigkeit. 6

Stunden nach der Bearbeitung liegen die Kontaktwinkel der verschiedenen Oberflächen sehr nahe beieinander.

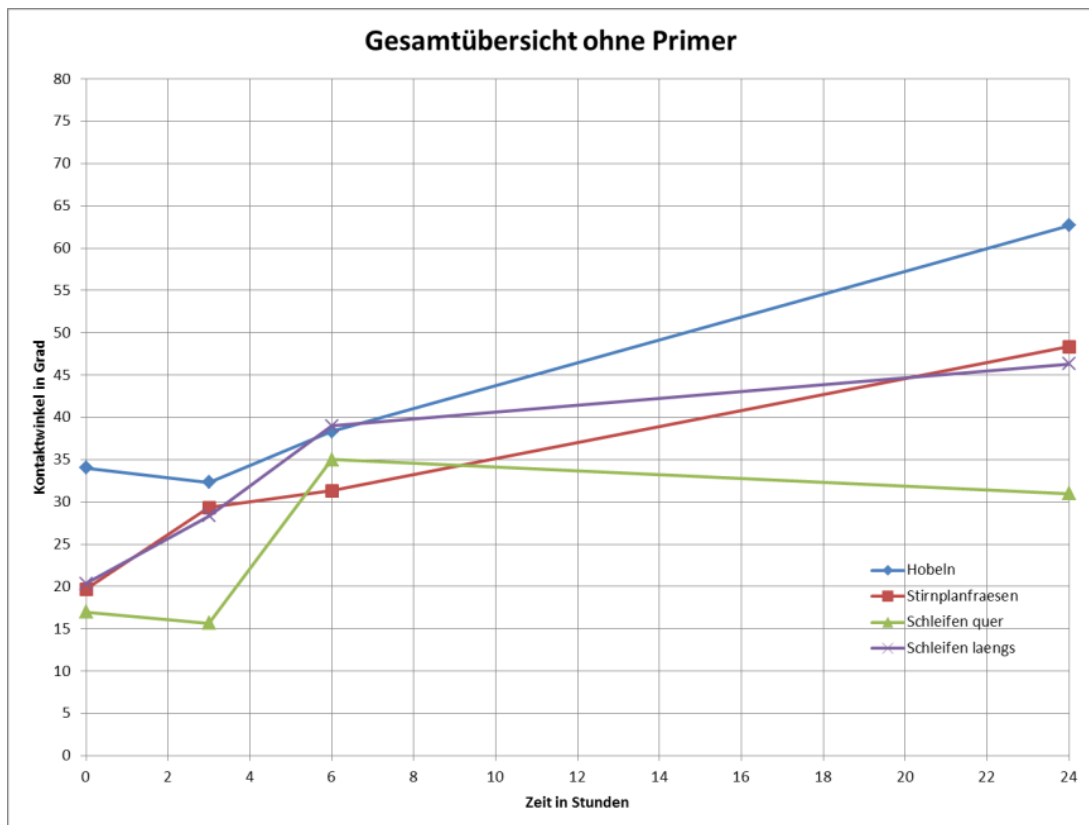


Abbildung 16: Kontaktwinkel aller Oberflächen unbehandelt, aufgetragen über die Zeit

Die Oberflächen die mit dem DMF-Primer behandelt worden sind, zeigen nach der Einwirkzeit von 30 Minuten einen geringeren Kontaktwinkel als unbehandelte Oberflächen (Abbildung 17). Teilweise war der Wassertropfen zum Messzeitpunkt nach 10 Sekunden völlig ins Holz eingezogen, was einen Kontaktwinkel von 0° erklärt. Nach 6 Stunden hat der Effekt des Primers sichtlich nachgelassen und nach 24 Stunden ist keine Auswirkung mehr zu erkennen.

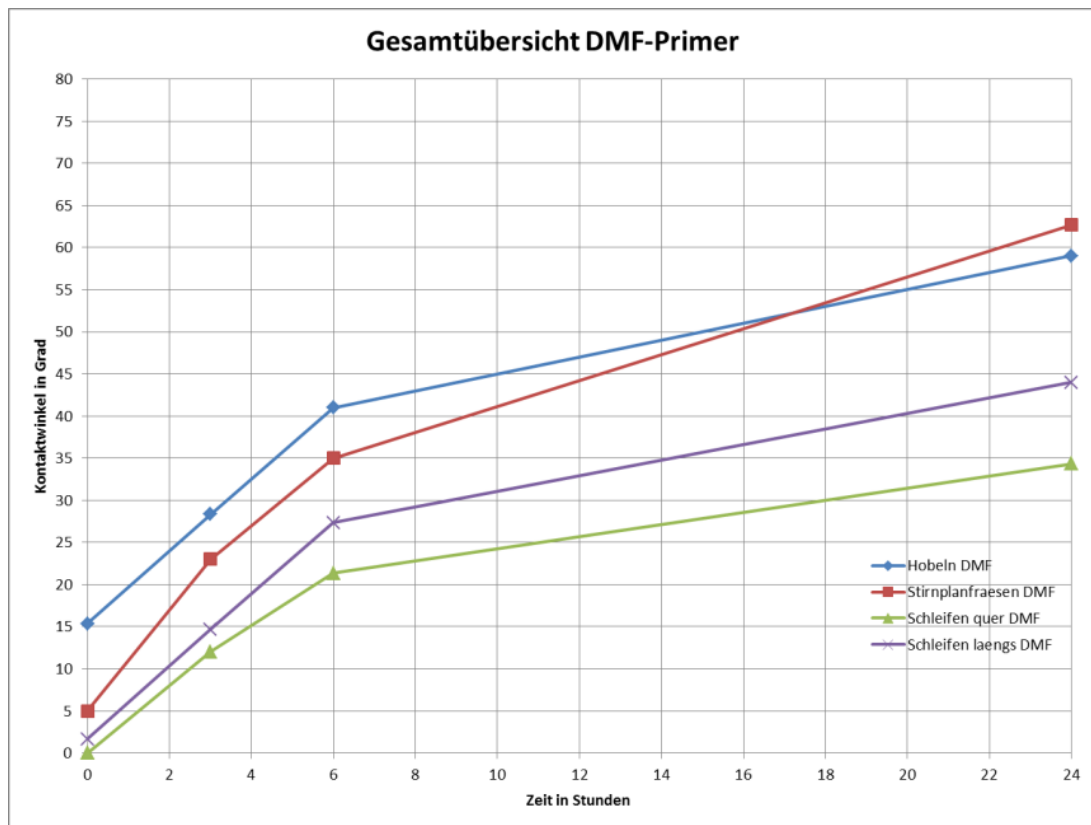


Abbildung 17: Kontaktwinkel aller Oberflächen mit DMF-Primer, aufgetragen über die Zeit

In Abbildung 18 sind die Kontaktwinkel aller Oberflächen, vorbehandelt mit VKS20-Primer über die Zeit aufgetragen. Der Primer hat eine Einwirkzeit von 24 Stunden. Das grosse Diagramm zeigt den Verlauf im gleichen Massstab wie Abbildung 10 und 11. Das kleine Diagramm zeigt dieselben Daten, vergrössert. Die Differenz der Messungen liegt meistens unterhalb der Messgenauigkeit. Somit lässt sich sagen, dass die Kontaktwinkel konstant bleiben. Die Oberfläche hat sich nach dem Auftrag des Primer leicht klebrig/ölig angefühlt. Dieser Eindruck spiegelt sich auch in den hohen Kontaktwinkeln wieder.

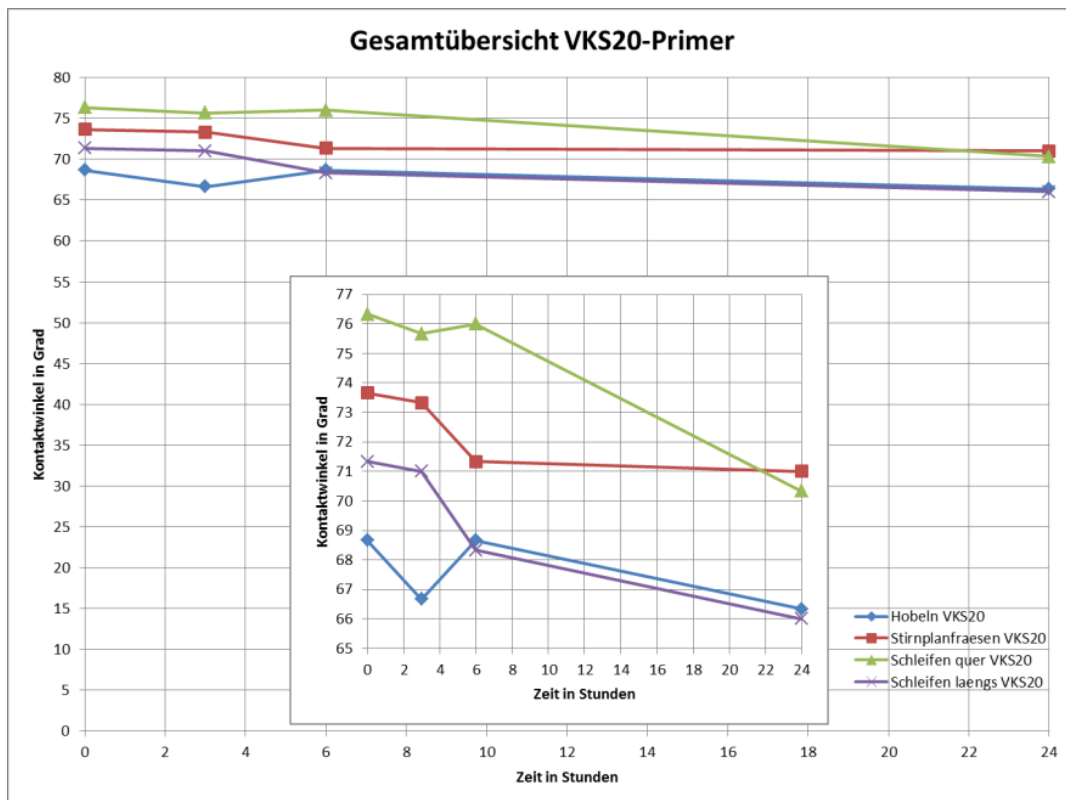


Abbildung 18: Kontaktwinkel aller Oberflächen mit VKS20-Primer, aufgetragen über die Zeit

Wenn man die Bearbeitungsmethode nicht berücksichtigt und alle Daten getrennt nach Vorbehandlung zusammenfasst, ergibt sich der Verlauf wie in Abbildung 19. Hier bestätigen sich die vorher beschriebenen Ergebnisse. Der DMF-Primer verringert in den ersten Stunden nach dem Auftragen den Kontaktwinkel. Dieser Effekt ist aber nach 24 Stunden nicht mehr messbar. Der VKS20-Primer hingegen erhöht den Kontaktwinkel permanent.

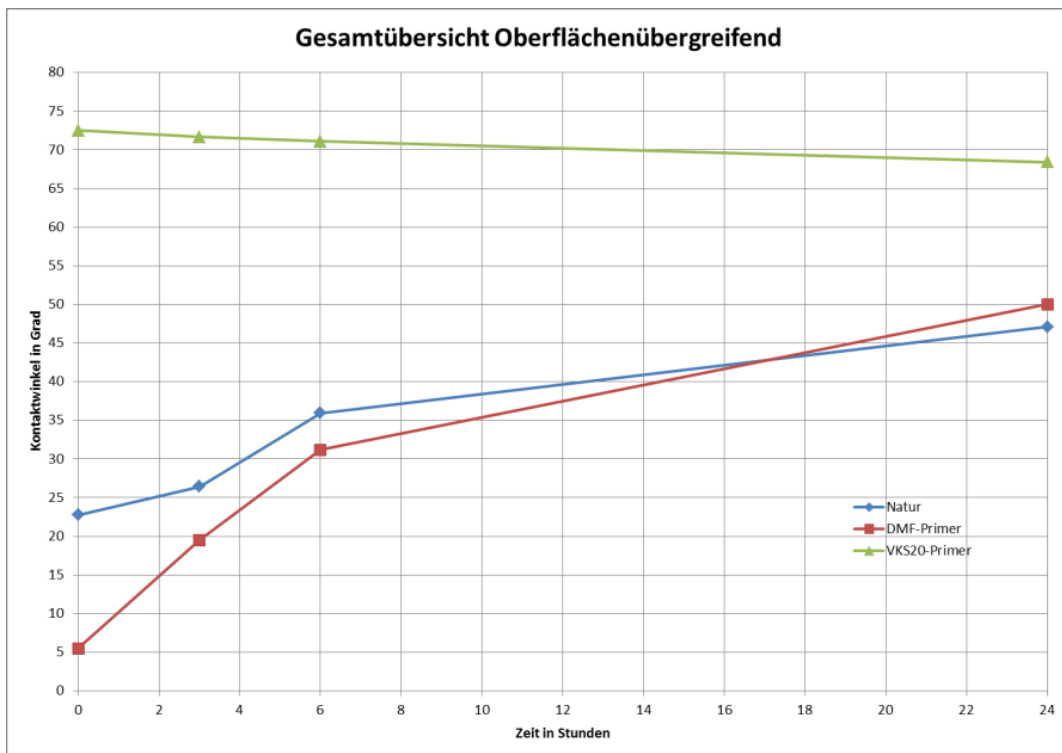


Abbildung 19: Mittelwert der Kontaktwinkel aller Oberflächen nach Vorbehandlung getrennt, aufgetragen über die Zeit

Die Bearbeitungsverfahren Schleifen und Strinplanfräsen zeigen nach der Bearbeitung ohne Primern die besten Voraussetzungen für eine Verklebung. Allerdings ändern sich diese Bedingungen innerhalb kurzer Zeit und liegen nach ca. 6h auf dem gleichen Niveau wie das Umfangsfräsen. Querschleifen bildet die reaktivsten Oberflächen.

DMF-Primer verbessern die Verklebbarkeit wesentlich, allerdings ist hier je nach Primer ein starker Zeiteinfluss vorhanden, so dass nach 6 h der Einfluss nicht mehr messbar ist.

VSK20 Primer erhöhen den Kontaktwinkel permanent und dauerhaft, hier kann mit dieser Messung auf Grund der Funktionsweise des Primers kein Rückschluss auf die Verbesserung der Verklebbarkeit gezogen werden.

6.6.3 Auswertung der FT-IR Spektrometer

Die Auswertung der Messungen der FT-IR erfordert eine aufwendige statistische Arbeit, die gegenwärtig nicht abgeschlossen ist.

Es soll festgestellt werden, ob die FT-IR-Eigenschaften der Oberflächen mit der Verklebungsgüte korrelieren und so die verschiedenen Primer und Bearbeitungen auch ohne aufwendige Verklebungstest hinsichtlich der Verklebbarkeit und der Verklebungsfestigkeit beurteilt werden können.

Dies würde die Spezifizierung von Oberflächenvorbereitungen weitgehend vereinfachen.

Die Ergebnisse werden nach Abschluss der Datenanalyse veröffentlicht.

7 ARBEITSPAKET 4: Untersuchung von Modellansätzen für das Schleifen, Abschätzung des Forschungsaufwandes

Auf Grund des stark reduzierten Förderbeitrages mussten die Arbeiten zur Modellbildung weitgehend in eine Masterarbeit übertragen werden, die im Jahr 2013 abgeschlossen wird.

Derzeit kann festgestellt werden, dass es keine geeigneten Modelle gibt, die auf den Schleifprozess von Holz angewendet werden können.

Im Rahmen der Masterarbeit werden die vorhandenen Modellansätze verglichen und ein geeigneter Ansatz für ein Schleifverfahren der Holzbearbeitung angepasst. Damit soll festgestellt werden, inwieweit derartige Ansätze eine praktische Relevanz für die Prozessoptimierung in der Holzbearbeitung, insbesondere in der Erzeugung von Kleboberflächen haben.

Die Ergebnisse werden nach Abschluss der Masterarbeit publiziert.

8 Verzeichnisse

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Topographiemerkmale einzelner Bearbeitungsschritte [Sch00] 14

Tabelle 2: Parameter Hobelmaschine 24

Tabelle 3: Parameter Stirnplanfräsen 24

Tabelle 4: Parameter Schleifen 25

Tabelle 5: Übersicht der FT-IR Messungen 27

Tabelle 6: Übersicht der Kontaktwinkelmessungen 30

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beanspruchung eines Holzkörpers durch Spanen mit negativem Spanwinkel [Rie97] 15

Abbildung 2: Meßverfahren zur Erfassung von Oberflächen [Sch00] 16

Abbildung 3: Übersicht der Fertigungsverfahren "Schleifen von Holz und Holzwerkstoffen [Rie97] 17

Abbildung 4: Arten der Prozeßfüllung beim Schleifen mit Schleifmitteln auf Unterlage [Rie97] 18

Abbildung 5: Schneidenverschleißmessung beim Fräsen von Massivholz [Sch00] 19

Abbildung 6: Schematischer Aufbau von Schleifmitteln auf Unterlage [Sch00] 20

Abbildung 7: Presse der Firma Siempelkamp und Presslehre 23

Abbildung 8: Hobelmaschine der Firma Brugg 23

Abbildung 9: 5-Achs CNC-Maschine der Firma MAKKA 24

Abbildung 10: Breitbandschleifmaschine MFA6 Impression der Firma Heesemann 25

Abbildung 11: Gerät zur Kontaktwinkelmessung der Firma Krüss 26

Abbildung 12: FT-IR Spectrum 100 der Firma PerkinElmer	27
Abbildung 13: Auswertung der Kontaktwinkel durch das zugehörige Programm	28
Abbildung 14: Auswertung der Kontaktwinkel durch das zugehörige Programm nach Bereinigung von offensichtlichen Messfehlern	29
Abbildung 15: Ablesen des Kontaktwinkels mit Hilfe einer bedruckten Folie	30
Abbildung 16: Kontaktwinkel aller Oberflächen unbehandelt, aufgetragen über die Zeit	31
Abbildung 17: Kontaktwinkel aller Oberflächen mit DMF-Primer, aufgetragen über die Zeit	32
Abbildung 18: Kontaktwinkel aller Oberflächen mit VKS20-Primer, aufgetragen über die Zeit	33
Abbildung 19: Mittelwert der Kontaktwinkel aller Oberflächen nach Vorbehandlung getrennt, aufgetragen über die Zeit	34

8.3 Literaturverzeichnis

- [Sch00] Schadoffsky, O.: „Topographiebewertung zur Prozessbeurteilung beim
Fräsen und Schleifen von Massivholz“, Technische Universität
Braunschweig, IWF.-Essen, Vulkann –Verl., 2000
- [Rie97] Riegel, A.: „Holz- und Lackzwischen Schliff Beitrag zur Prozessoptimierung“
,Technisch Universität Dresden, Dissertation, 1997

Teil II:

Inhalt

1	Zielstellung	39
2	Stand der Forschung auf diesem Gebiet.....	40
3	Voruntersuchung zur chemischen Behandlung	40
4	Material und Methoden.....	42
4.1	Forschungsplan.....	42
4.2	Klebstoffe	43
4.3	Prüfkörper	44
4.4	Zugscherversuche.....	44
5	Ergebnisdarstellung	45
5.1	Zugscherversuche.....	45
5.2	Holzbruch	50
6	Ergebnis Diskussion.....	52
6.1	Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1	52
6.2	Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4	55
6.3	Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5	59
6.4	Holzbruch	63
7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ansatz für weitere Untersuchungen	64
8	Abbildungsverzeichnis.....	66
9	Tabellenverzeichnis	67
10	Quellen	68

1 Zielstellung

Gegenstand dieser Forschungsarbeit ist die Oberflächencharakterisierung der Fügefläche nach den oben genannten mechanischen und chemischen Bearbeitungen. Mittels einer Infrarotspektroskopie sollen mögliche Veränderungen der Fügefläche detektiert werden. Dafür wird die Fügefläche auf Veränderungen hinsichtlich der chemischen bzw. mechanischen Bearbeitung untersucht und parallel dazu der Einfluss der Fügeflächenalterung betrachtet. Hierzu werden die Spektroskope der Fügefläche nach den einzelnen Behandlungen und jeweils nach einer Alterung von 3, 6 und 24 Stunden miteinander verglichen.

Mittels Kontaktwinkelmessung wird die freie Oberflächenenergie der Fügefläche ermittelt um Rückschlüsse auf die Benetzungsqualität ziehen zu können. Dazu werden die gleichen Proben wie bei der Infrarotspektroskopie verwendet. Das letzte Merkmal, was zur Oberflächencharakterisierung ermittelt wird, ist die Rauigkeit der Fügefläche.

Die Ermittelten Kennwerte werden auf ihre Korrelation mit Zugscherfestigkeit und Holzbruch untersucht, die hier als Mass für Güte der Verklebung dienen.

Um die Zuverlässigkeit von Verklebungen zu erhöhen, werden aus den Ergebnissen Verfahrensanleitungen abgeleitet, welche die Streuung der Festigkeit senken sollen. Das Verhalten der unterschiedlichen Klebstoffsysteme bei Änderung der Oberflächenbeschaffenheit, sowie die lückenhafte Beschreibung im Bereich des Stirnplanfräsens und des Schleifens werden untersucht. Des Weiteren wird die Auswirkung einer chemischen Vorbehandlung auf die Holzoberfläche und die daraus resultierende Festigkeit der Klebung näher betrachtet. Im Gegensatz zum nationalen Forschungsprogramm Nr. 66, welches sich mit der Grundlagenforschung im Bereich der Bruchmechanik von Verklebungen befasst, soll in dieser Forschungsarbeit anwendungstechnische Probleme bei der Klebung von Holz untersucht und beschrieben werden.

Die wissenschaftliche Beschreibung dieser Zusammenhänge kann in der Praxis zur Erhöhung der Prozesssicherheit führen. Die ermittelten Erkenntnisse der Prozessparameter, sowie die daraus resultierenden geringeren Stillstandzeiten könnten die Prozesskosten senken und die Qualität der Verklebung erhöhen. Bei erfolgreichem Projektverlauf kann eine optimierte Laubholzverklebung erreicht werden, was zu einer Stärkung der Schweizer Klebstoffhersteller und der Laubholzverarbeiter führt (TEISCHINGER 2007).

2 Stand der Forschung auf diesem Gebiet

Es sind Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Bearbeitungsverfahren der Klebefläche auf die Festigkeit von Holzverklebungen bekannt. Diese wurden zum überwiegenden Teil von Firmen beauftragt und durchgeführt, die die Eignung ihrer Maschinen und Werkzeuge darstellen wollen. Die Fülle an Untersuchungen, zu den Festigkeiten verschiedener Klebstoffe, befasst sich nur unzureichend mit der vorhergehenden Bearbeitung der Oberfläche und deren Charakterisierung. Demzufolge fällt ein Vergleich zwischen Oberflächenbearbeitung und resultierender Festigkeit der Klebung schwer.

In der Holzforschung existieren einige Modelle für die Beschreibung von Spanungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden. Unter anderem finden sich Arbeiten zur Schnittkraft und Spanbildung (z.B. von KIVIMAA 1950, MAGOSS / CSANADY 2011). Für das Schleifen von Holz existieren entsprechende Untersuchungen nur für spezielle Anwendungen (RIEGEL 1997). Der Einfluss des Werkstoffes auf Abtrag, Standzeit und Qualität, sowie der Einfluss von Werkzeugeigenschaften auf die Qualität der Oberfläche sind nicht bekannt.

3 Voruntersuchung zur chemischen Behandlung

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die gezielte Beeinflussung der Fügeiteiloberfläche und die damit verbundene Verbesserung der Nassfestigkeit. Grundlage für die Untersuchung bildet die Norm DIN prEN 302-1 (2011), die als Kriterium für die Festigkeit die Proben hinsichtlich ihrer Zugscherfestigkeit und des Holzbruchanteils vergleicht.

Entscheidend für die Verbesserung der Festigkeit von Klebfugen ist sowohl die Beschaffenheit der Fügefläche als auch das Eindringverhalten des Klebstoffs in die Holzstruktur. Entsprechende Arbeiten zu dieser Thematik wurden unter anderem von ASHTON (1973), NIEMZ (2009), HASS (2012) verfasst.

Für die Untersuchung wurden neun verschiedene Primer, hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Klebfugenfestigkeit, getestet.

Die erste Gruppe bestand aus verschiedenen Methylendiphenyldiisocyanaten (MDI) der Firma BAYER. Für die Behandlung wurden die Gemische Desmodur® VK10, VKS20 und VKS70 verwendet. Diese Produkte bestehen aus Diphenylmethan-4,4'-diisocyanaten die sich vorrangig in ihrer Viskosität und der Acidität unterscheiden. Des Weiteren wurden die aliphatischen Polyisocyanate Bayhydur® 304 und 305

hinsichtlich ihres Einflusses auf Verklebungsgüte getestet. Diese chemischen Substanzen wurden aufgrund von Herstellerangaben für die Untersuchungen ausgewählt.

Bei der zweiten Gruppe an Primern handelt es sich um organische Quellmittel deren Einfluss bereits von MANTANIS (1994) untersucht wurde. Dabei handelt es sich um die Primer: Dimethylsulfoxid (DMSO), Dimethylformamid (DMF) und Dioxan.

Die Letzte Substanz die zum Einsatz gebracht wurde war die ionische Flüssigkeit EMIMAc. Deren quellende Wirkung auf Holz wurde von LUCAS (2010) [9] in einem Artikel beschrieben.

Alle genannten Primer wurden indirekt auf Prüfkörper aus Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) appliziert. Die Ausnahme stellt hier die Applikation von EMIMAc dar. EMIMAc wurde mit Hilfe einer Airbruschpistole aufgetragen. Nach einer Einwirkdauer von 30 Minuten bzw. 24 Stunden wurden aus den vorbehandelten Brettern Prüfkörper, gemäss den Anweisungen von DIN prEN 302-1 (2011), hergestellt. Diese wurden im Anschluss an die Lagerfolgen A1 (Lagerung im Normalklima), A4 (Kochwasserlagerung mit Prüfung im nassen Zustand), und A5 (Kochwasserlagerung und Prüfung nach Lagerung im Normalklima bis zum Erreichen der Ausgangsmasse) der Zugscherprüfung (nach DIN prEN 302-1 (2011)) unterzogen. Dabei konnten sowohl bei der Zugscherfestigkeit als auch bei der Einschätzung des Holzbruchanteils erhebliche Unterschiede festgestellt werden. Dies zeigt eine deutliche Beeinflussung der Klebefugenfestigkeit durch eine chemische Vorbehandlung.

Nach Auswertung der Ergebnisse wurden für die Kombination mit den mechanischen Bearbeitungsverfahren (Stirnplanfräsen, Umfangsfräßen und Schleifen) der Fügeflächen zwei chemische Substanzen ausgewählt. Für weitere Versuche werden die Primer DMF, mit einer Einwirkzeit von 30 Minuten und VKS20, mit einer Einwirkdauer von 24 Stunden verwendet.

4 Material und Methoden

4.1 Forschungsplan

Tabelle 7: Aufgabenaufteilung

Arbeitsschritt		Verantwortlichkeit
Material	Holzauswahl	BFH AHB
	Zuschnitt	BFH AHB
	Trocknung	BFH AHB
	Primer	ETHZ
	Klebstoffe	ETHZ
Vorunter- suchungen	Oberflächenrauigkeit	BFH AHB
	Oberflächenenergie	BFH AHB
	ESEM	BFH AHB
	Primer Auswahl	ETHZ
Prüfkörper- herstellung	mech. Oberflächenbearbeitung	BFH AHB
	chem. Oberflächenbehandlung	ETHZ
	Verklebung	BFH AHB
	Prüfkörperzuschnitt	ETHZ
	Lagerfolgen nach DIN prEN 302-1 (2011)	ETHZ
Prüfung	Zugscherprüfung/Holzbruchanteil	ETHZ
evtl. zusätzliche Untersuchungen	Fügeflächencharakterisierung (NIR)	BFH AHB
	Delaminierung	BFH AHB/ ETHZ

Nach der Sitzung, vom 24.7.2012, wurde sich auf die mechanischen Oberflächenbearbeitungen Stirnplanfräsen, Längsschleifen, Querschleifen und Hobeln geeinigt. Die Fügeflächen werden jeweils mit Kauramin 683/688 (MUF), Aerodux 185 RL / HP 155 (PRF) und HBS 309 (1K-PUR) verklebt. Der 1K-PUR Klebstoff wird zusätzlich noch mit den beiden Primern DMF und VKS20 kombiniert (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Kombinationen von mechanischen und chemischen Bearbeitungsverfahren

	Kauramin 683/688	Aerodu x 185 RL / HP 155	HBS 309 ohne chemische Behandlung	HBS 309 und Dimethylformamid als chemische Vorbehandlung	HBS 309 und Desmodur® VKS 20 als chemische Vorbehandlung
Stirn- plan- fräsen	MUF_f	PRF_f	PUR_f	DMF_f	VKS_f
Schlei- fen längs	MUF_l	PRF_l	PUR_l	DMF_l	VKS_l
Schlei- fen quer	MUF_q	PRF_q	PUR_q	DMF_q	VKS_q
Hobeln	MUF_h	PRF_h	PUR_h	DMF_h	VKS_h

Im Folgenden werden die Varianten wie folgt bezeichnet:

1. Die Klebung mit HBS 309 ohne chemische Behandlung: PUR
2. Die Klebung mit HBS 309 und Dimethylformamid als chemische Vorbehandlung: DMF
3. Die Klebung mit HBS 309 und Desmodur® VKS 20 als chemische Vorbehandlung: VKS
4. Die Klebung mit Aerodux 185 RL / HP 155: PRF
5. Die Klebung mit Kauramin 683/688: MUF

4.2 Klebstoffe

Alle physikalischen Eigenschaften sowie Verarbeitungs- und Lagerbedingungen der Klebstoffe können den Herstellerangaben entnommen werden.

Nach EN 14080 [10], EN 386 [11] und EN 385 [12] ist Purbond HB S309 als Klebstoff für den tragenden Holzbau auf nationaler Ebene zugelassen. Der als Typ I klassifizierte Klebstoff wurde nach DIN prEN 301 (2011)/ DIN EN pr302 (2011), DIN 68141, EN 15425/ EN 15416, EN 14080 und Annex C geprüft. Vergleichend hierzu werden Prüfkörper mit einem Resorcin Phenol Formaldehyd Harz und einen Klebstoff auf Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Basis hergestellt. Beide Klebstoffsysteme erfüllen ebenfalls die Anforderungen für Klebstoffe im tragenden Holzbau. Das Kauramin Klebstoffsystem wurde im Verhältnis 1:1 Klebstoff: Härter eingesetzt und das PRF System in einem Mischungsverhältnis von 5:1 Masseteilen.

4.3 Prüfkörper

Alle, in dieser Forschungsarbeit, geprüften Proben wurden aus Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) so hergestellt, dass sie die Anforderungen der DIN prEN 302-1 (2011) erfüllten. Die mechanische Oberflächenbearbeitung sowie das Verpressen der Bretter wurden an der Berner Fachhochschule durchgeführt. Die entsprechenden Maschinenparameter können Teil I des Berichts entnommen werden. Die spezifische Auftragsmenge des Klebstoffs betrug bei dem PUR Klebstoff 180 g/m^2 (einseitige Beleimung), 390 g/m^2 (einseitige Beleimung) bei dem MUF System und 225 g/m^2 (beidseitige Beleimung) bei dem PRF System. Die Vorbehandlung mit dem Primern erfolgte genau wie bei den, unter 3. beschriebenen, Voruntersuchungen. Nach der Herstellung der Prüfkörper wurden diese den Lagerfolgen A1, A4 und A5 unterzogen. Diese Lagerfolgen werden ebenfalls detailliert in der Norm DIN prEN 302-1 (2011) beschrieben.

4.4 Zugscherversuche

Die Zugscherfestigkeit wurde mit einer Prüfmaschine der Firma Zwick/ Roell ermittelt. Bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit, von $0,8 \text{ mm/min}$, der Traverse wurde mit Hilfe der Kraftmessdose die maximal aufgebrachte Kraft bis zum Bruch des Prüfkörpers aufgezeichnet. Ein Kraftabfall von 30% wurde als Bruchkriterium definiert. Der Kraftverlauf wird dazu über die Kraftmessdose, welche an der oberen Spannzange montiert ist, aufgezeichnet. Zur Auswertung wurden Kraft, Traversenweg und Prüfzeit direkt in die mitgelieferte Software testXpert II eingelesen. Alle in DIN prEN 302-1 (2011) geforderten Richtlinien wurden dabei eingehalten.

Nach der Zugscherprüfung erfolgte, wie von DIN prEN 302-1 (2011) gefordert, die visuelle Schätzung des prozentualen Holzbruchs.

5 Ergebnisdarstellung

5.1 Zugscherversuche

Die Ergebnisse der Zugscherversuche (Tabelle 3 bis 5) zeigen, dass sowohl die mechanische wie auch die chemische Vorbehandlung die Verklebungsgüte beeinflussen können. Mittels einer statistischen Analysesoftware wurden die hier dargestellten Ergebnisse auf Normalverteilung geprüft und Ausreiser eliminiert. Bei dem Vergleich der Zugscherfestigkeiten weisen die gehobelten Oberflächen unter Verwendung von MUF und VKS die höchsten Festigkeiten auf. PRF erreichte bei den längs geschliffenen Oberflächen die höchsten Werte. Der reine PUR Klebstoff zeigt auf den gefrästen Oberflächen die besten Resultate und bei Verwendung von DMF auf den quer geschliffenen Oberflächen. Weiterhin ist ersichtlich dass die gehobelten Oberflächen bei der Verwendung von PUR die geringste Streuung aufweisen. PRF zeigt bei den quer geschliffenen Oberflächen die geringste Varianz und MUF auf den längsgeschliffenen Oberflächen. Negativ fällt die geringe Zugscherfestigkeit bei den quer geschliffenen Oberflächen unter Verwendung von PRF auf.

Der Vergleich der chemischen Varianten (Abbildung 1) zeigt dass die Behandlung mit DMF bei allen mechanischen Oberflächenbehandlungen die höchsten Zugscherfestigkeiten aufweist mit Ausnahme der gefrästen Oberflächen. Hier werden auch die geringeren Unterschiede der Zugscherfestigkeit nach dem Fräsen und dem Längsschleifen ersichtlich. Erheblich sind die Unterschiede in der Zugscherfestigkeit bei den quer geschliffenen Oberflächen von über 5 N/mm^2 .

Im nass geprüften Zustand erreichen DMF, VKS und MUF (Abbildung 2) die höchsten Festigkeiten auf den quer geschliffenen Oberflächen. PUR erreicht wieder auf den stirnplangefrästen Oberflächen die höchsten Festigkeitswerte und PRF auf den gehobelten Oberflächen. Wie bei den trocken geprüften Probekörpern zeigt PUR auch nach Nassprüfung die geringsten Varianzen bei den gehobelten Oberflächen. Sehr geringe Zugscherfestigkeiten zeigen sich bei MUF auf den gehobelten und den gefrästen Oberflächen. Auffällig ist, dass der reine PUR Klebstoff auf den stirnplangefrästen Oberflächen die höchsten Zugscherfestigkeiten aufweist.

In Abbildung 2 ist die deutlich geringere Zugscherfestigkeit des MUF Klebstoffs auf der gehobelten und der stirnplangefrästen Oberfläche ersichtlich. Wie nach Lagerfolge A1 erreichen DMF und VKS auf der gehobelten, der quer und der längs geschliffenen Oberfläche die höchsten Zugscherfestigkeiten.

Nach der Lagerfolge A5 (Abbildung 3) zeigen MUF und VKS die höchsten Zugscherfestigkeiten auf den quer geschliffenen Oberflächen. PRF erreicht, genau wie nach Lagerfolge A1, die höchsten Festigkeiten auf den längs geschliffenen Oberflächen. Die Klebfugen welche nur mit PUR Klebstoff hergestellt wurden erreichen, wie nach Lagerfolge A1 und A4, auf den gefrästen Oberflächen die höchsten Zugscherfestigkeiten. Die Streuung der Messwerte ist bei PUR, PRF und MUF auf den quer geschliffenen Oberflächen am geringsten. Bei der Verklebung mit DMF zeigt sich die geringste Streuung bei den gehobelten Prüfkörpern.

Tabelle 3: Ergebnisse der Zugversuche nach Vorbehandlung A1

A1	hobeln					schleifen längs					schleifen quer					stirnplanfräsen				
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Anz. der Beobachtungen	13	14	13	15	15	15	15	15	15	13	15	15	15	15	14	15	15	15	14	15
Minimum	11.20	13.70	13.60	9.56	11.00	8.48	9.07	9.46	10.40	11.70	9.06	11.20	9.85	7.52	11.20	11.20	10.20	10.70	9.57	11.10
Maximum	14.90	16.50	15.80	16.00	15.30	17.20	17.50	16.00	14.70	14.30	16.80	18.00	17.00	12.30	15.40	16.50	16.40	16.10	14.60	15.00
Median	13.20	14.90	14.30	11.50	13.50	12.20	12.80	12.30	12.20	12.80	12.40	15.40	12.40	10.30	13.50	13.30	12.80	12.30	11.65	13.60
Mittelwert	13.19	14.97	14.50	12.00	13.46	13.31	13.60	12.32	12.26	12.90	12.58	15.13	13.02	9.88	13.44	13.27	12.84	12.95	11.91	13.09
Varianz	0.94	0.59	0.52	4.71	2.07	8.49	6.95	3.56	1.94	0.51	4.43	3.98	3.36	1.75	1.13	2.67	3.31	2.54	1.64	1.47
Standardabweichung	0.97	0.77	0.72	2.17	1.44	2.91	2.64	1.89	1.39	0.72	2.11	1.99	1.83	1.32	1.06	1.63	1.82	1.59	1.28	1.21
Rohdichte [kg/m ³]	710.4	709.0	715.3	710.9	707.9	714.4	715.8	714.8	712.6	713.3	662.4	666.1	709.7	667.6	685.7	653.2	649.8	650.89	660.5	659.5
Holzfeuchte [%]	13.13	13.35	13.01	13.44	13.76	13.14	12.96	13.15	13.38	13.40	13.15	12.97	13.07	13.46	13.61	13.31	13.23	13.32	13.74	13.91

Lagerfolge A1

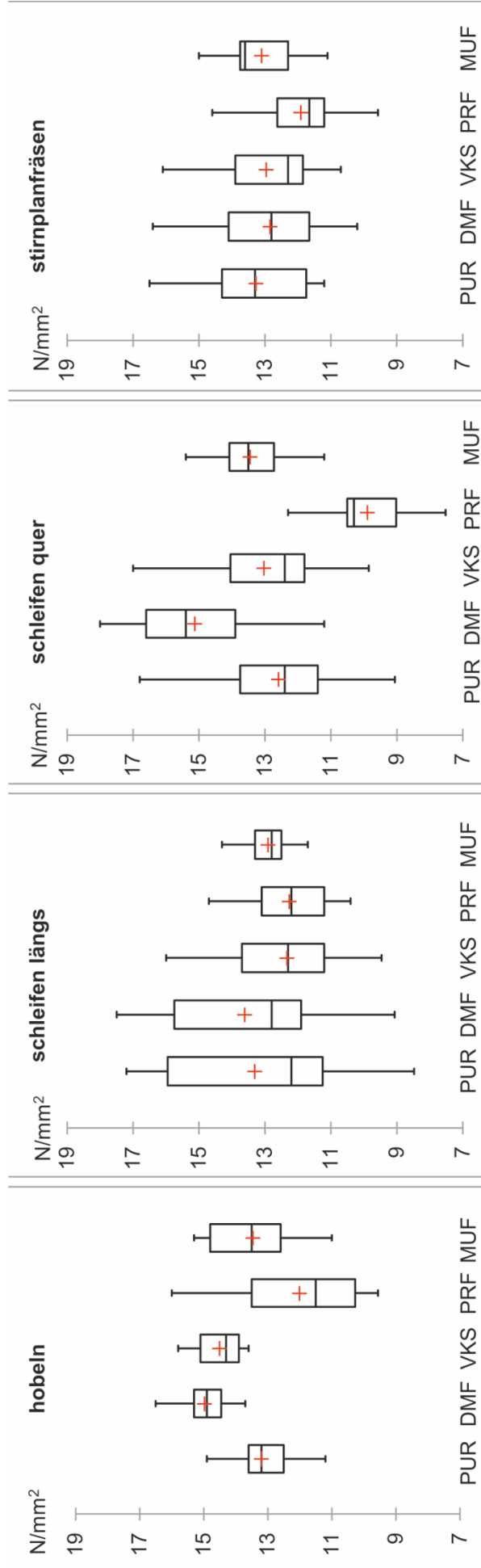


Abbildung 1: Zugshearfestigkeit nach Lagerfolge A1

Tabelle 4: Ergebnisse der Zugversuche nach Vorbehandlung A4

A4	hobeln					schleifen längs					schleifen quer					stirnplanfräsen				
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Anz. der Beobachtungen	15	13	11	15	13	15	15	14	13	15	14	15	15	15	14	15	15	15	13	15
Minimum	5.87	7.19	7.50	5.20	2.70	5.75	5.46	5.81	5.12	5.02	4.87	7.06	5.24	4.66	4.84	6.79	5.53	5.62	5.50	2.14
Maximum	7.34	8.69	8.14	8.57	4.22	7.93	8.65	9.47	7.74	6.70	8.22	9.56	10.20	6.58	7.27	10.50	8.72	9.17	7.86	6.65
Median	6.72	8.05	7.77	6.87	3.76	7.40	7.47	7.80	6.39	5.87	6.36	8.11	8.70	5.32	6.22	7.90	7.33	6.90	6.34	3.80
Mittelwert	6.63	8.02	7.83	6.78	3.51	7.18	7.19	7.76	6.18	5.91	6.36	8.15	8.01	5.50	6.05	8.04	7.21	7.11	6.42	4.28
Varianz	0.17	0.17	0.04	1.15	0.31	0.52	0.91	1.13	0.54	0.36	0.74	0.70	3.63	0.43	0.56	1.11	0.94	1.29	0.44	1.62
Standardabweichung	0.41	0.41	0.20	1.07	0.56	0.72	0.95	1.06	0.74	0.60	0.86	0.84	1.90	0.66	0.75	1.05	0.97	1.14	0.66	1.27
Rohdichte [kg/m ³]	711.7	708.5	711.1	710.9	710.6	704.2	714.9	706.2	717.4	715.7	661.0	665.2	707.6	670.3	680.7	651.7	649.8	650.9	661.4	660.7
Holzfeuchte [%]	120.5	119.1	119.1	118.7	120.6	121.1	119.6	118.9	121.5	120.3	119.6	117.2	116.9	119.7	113.5	121.3	115.9	118.7	117.7	122.1

Lagerfolge A4

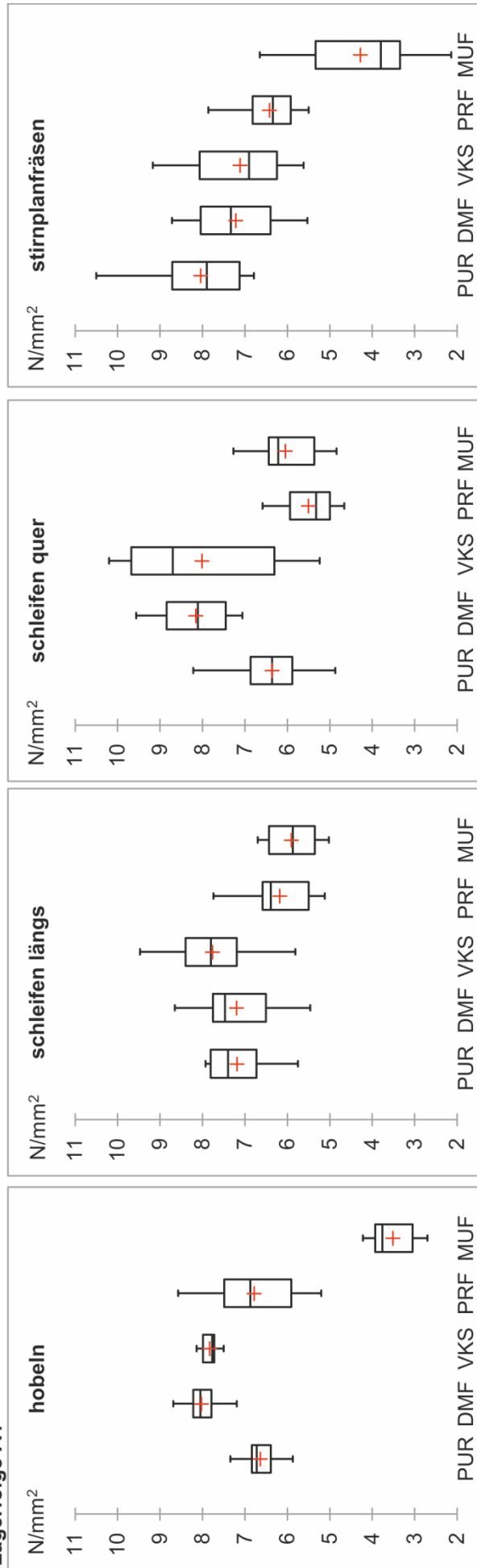


Abbildung 2: Zugsheerfestigkeit nach Lagerfolge A4

Tabelle 5: Ergebnisse der Zugscherversuche nach Vorbehandlung A5

A5	hobeln					schleifen längs					schleifen quer					stirnplanfräsen				
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Anz. der Beobachtungen	15	15	15	14	15	15	15	15	15	15	14	15	15	11	14	15	15	13	14	15
Minimum	8.49	12.30	10.90	8.64	7.35	9.64	9.83	9.26	8.58	9.78	7.74	10.50	10.90	9.63	11.10	9.35	9.05	8.87	8.38	9.38
Maximum	13.70	16.80	15.70	11.50	12.60	15.80	17.60	13.60	14.80	14.00	13.00	17.20	17.60	11.00	15.30	15.00	13.70	14.00	14.20	15.10
Median	11.60	14.70	13.80	9.65	9.34	11.40	13.70	11.00	11.40	12.30	10.45	14.50	13.80	10.10	13.60	11.90	11.60	12.70	10.35	11.10
Mittelwert	11.07	14.62	13.51	9.80	9.61	11.98	13.44	11.12	11.35	12.17	10.27	14.11	14.53	10.22	13.40	12.19	11.57	12.04	10.68	11.52
Varianz	2.39	1.87	1.93	0.95	2.67	4.29	6.24	1.52	3.41	2.01	2.03	3.91	5.78	0.19	1.54	2.58	1.91	2.30	2.70	3.05
Standardabweichung	1.54	1.37	1.39	0.97	1.64	2.07	2.50	1.23	1.85	1.42	1.42	1.98	2.40	0.43	1.24	1.60	1.38	1.52	1.64	1.75
Rohdichte	711.7	709.1	713.2	711.1	708.6	715.3	715.3	712.6	712.6	717.1	657.1	665.7	708.5	673.0	682.7	654.2	649.8	649.6	658.9	657.4
Holzfeuchte	14.25	14.36	13.93	14.14	14.43	14.54	14.57	14.52	14.34	14.51	14.48	14.47	14.42	13.93	14.51	14.06	14.38	14.33	14.22	14.34

Lagerfolge A5

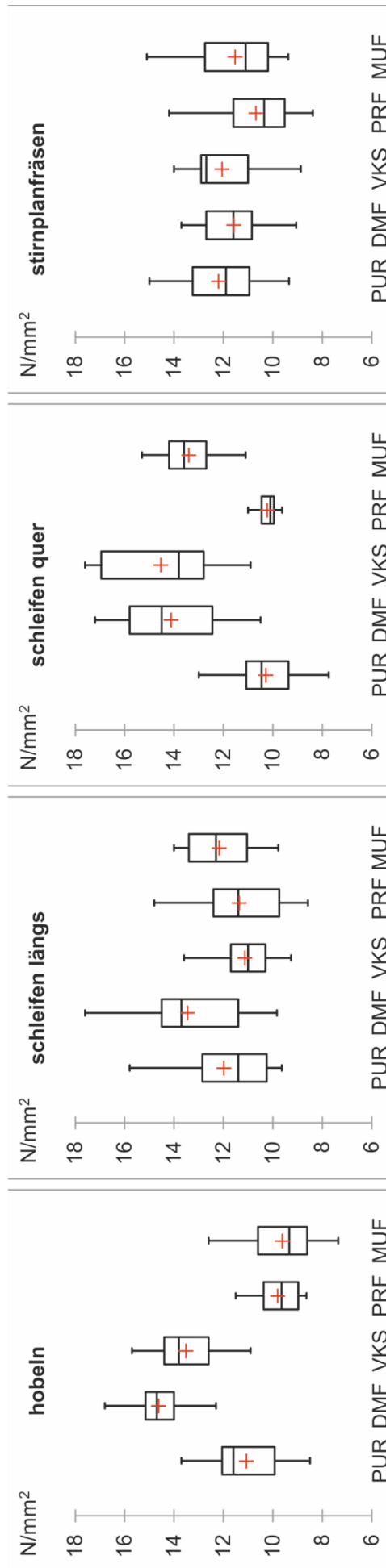


Abbildung 3: Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5

5.2 Holzbruch

Nach DIN prEN 302-1 (2011) ist der zweite Wert, zur Beurteilung der Verklebungsgüte, der Holzbruchanteil nach der Zugscherprüfung. Dieser wird visuell bestimmt und auf 10 % gerundet. Da der Holzbruchanteil nicht Normalverteilt ist wird in Tabelle 9 der Median angegeben.

Tabelle 9: Holzbruch

Holzbruch (Median)					
A1					
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Hobeln	50%	85%	40%	90%	90%
Schleifen quer	90%	90%	100%	100%	100%
Schleifen längs	100%	100%	100%	100%	100%
Stirnplanfräsen	100%	100%	100%	100%	90%
A4					
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Hobeln	0%	10%	10%	80%	0%
Schleifen quer	90%	70%	100%	90%	10%
Schleifen längs	10%	20%	100%	40%	90%
Stirnplanfräsen	90%	100%	100%	100%	0%
A5					
	PUR	DMF	VKS	PRF	MUF
Hobeln	100%	70%	40%	100%	30%
Schleifen quer	100%	90%	90%	100%	100%
Schleifen längs	100%	100%	100%	100%	100%
Stirnplanfräsen	100%	100%	100%	100%	90%

Erwartungsgemäss zeigen sich bei PRF und bei MUF nach Lagerfolge A1 hohe Holzbruchanteile von 90 % bis 100%. Bis auf die gehobelten Oberflächen weisen jedoch auch alle drei PUR Varianten Holzbruchanteile von 90% bis 100% auf. Nach dem Zugscherversuch im nassen Zustand verringern sich bei allen verwendeten Klebstoffsystemen die Holzbruchanteile. Vor allem bei den gehobelten Oberflächen verringert sich der Holzbruchanteil, mit Ausnahme bei PRF. Der aus den chemischen Voruntersuchungen zu erwartende positive Einfluss der Primer DMF und VKS konnte auf der gehobelten Oberfläche nicht bestätigt werden. Jedoch erreichen die Primer auf den quer geschliffenen und den gefrästen Oberflächen Holzbruchanteile von 90% bis 100%. Nach Lagerfolge A5 steigen bei allen Varianten die Holzbruchanteile wieder an und erreichen teilweise höhere Werte als nach Lagerfolge A1.

Die unter 5.1 beschriebene geringe Zugscherfestigkeit des MUF Klebstoffs auf der gehobelten bzw. gefrästen Oberfläche wird von dem geringen Holzbruchanteil (vgl.: Tabelle 9: Holzbruch) begleitet. Nur der PRF Klebstoff erreicht auf der gehobelten Oberfläche einen Holzbruchanteil von 80%. Alle anderen Varianten erreichen einen Holzbruchanteil von 0% bis 10%. Durch die chemische Behandlung mit VKS erreichen die geschliffenen und gefrästen Oberflächen einen Holzbruchanteil von 100%.

6 Diskussion

6.1 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1

Um signifikante Einflüsse auf die Zugscherfestigkeit zu ermitteln wurden die Stichproben mit Hilfe einer statistischen Analysesoftware ausgewertet. Um einen ausreichend genauen Vertrauensbereich zu erreichen wurde dazu ein zweiseitiger t Test mit einem Konfidenzintervall von 95% durchgeführt.

Die Auswertung ergab bei der Verklebung mit PUR keinen signifikanten Einfluss der mechanischen Oberflächenbearbeitung (Abbildung 4).

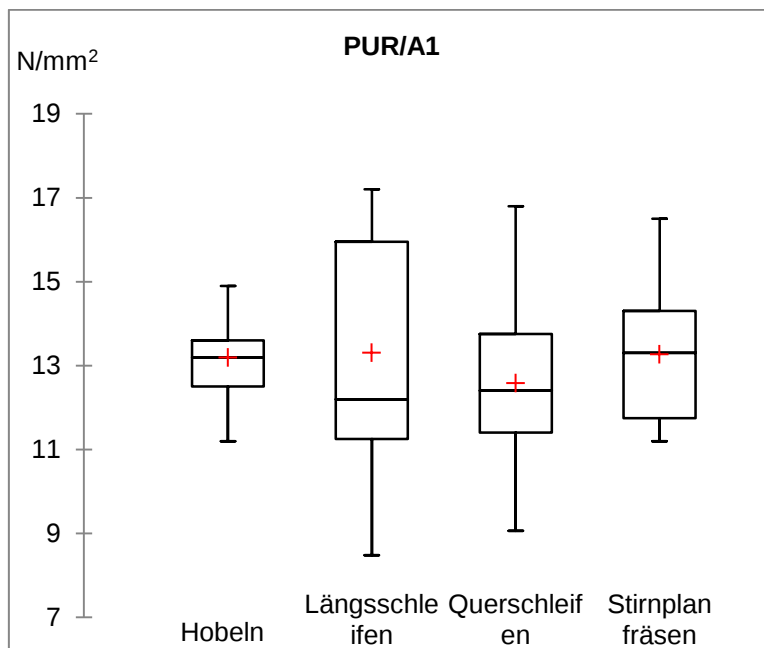


Abbildung 4: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A1

Bei der Klebung mit DMF zeigen sich einige wesentliche Unterschiede zwischen den mechanischen Oberflächenbearbeitungen (Abbildung 5). Die Zugscherfestigkeiten von den stirnplangefrästen Oberflächen unterscheiden sich signifikant von den gehobelten sowie den quer geschliffenen Oberflächen. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 7,3% bzw. 8,5% muss ein signifikanter Unterschied zwischen den längsgeschliffenen Oberflächen und den gehobelten bzw. quer geschliffenen Oberflächen abgelehnt werden. Dieses Ergebnis ist auf die grosse Streuung der Zugscherfestigkeiten der längsgeschliffenen Oberflächen (Abbildung 5) zurück zu führen. Zwischen den gehobelten und den quer geschliffenen sowie zwischen den gefrästen und den längs geschliffenen Oberflächen kann kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

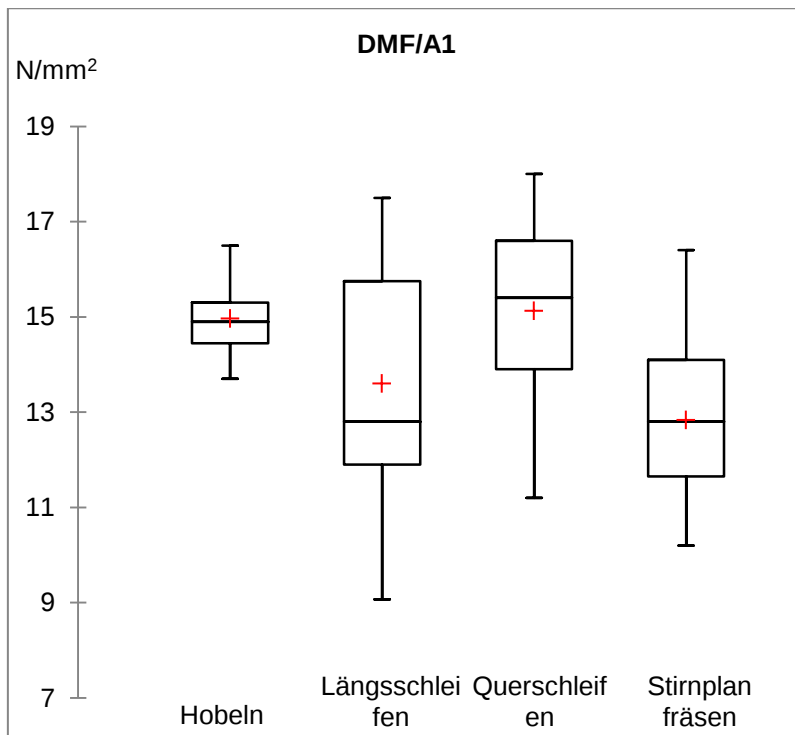


Abbildung 5: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A1

In Abbildung 6 wird ersichtlich, dass sich die Zugscherfestigkeit der gehobelten Oberfläche signifikant von allen anderen mechanischen Bearbeitungsverfahren unterscheidet die mit VKS verklebt wurden. zwischen allen andern Oberflächenbearbeitungen kann kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

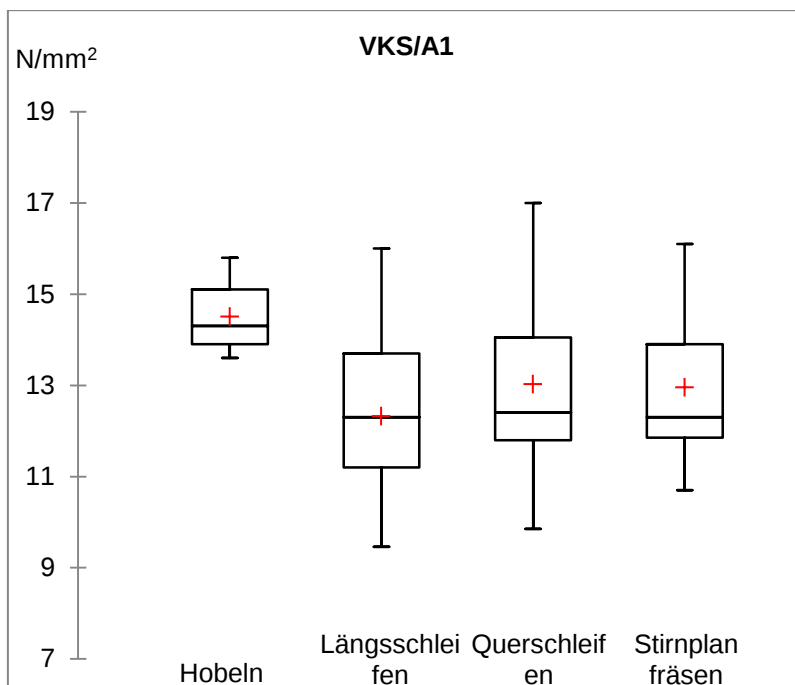


Abbildung 6: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A1

Bei den durch Hobeln hergestellten Fügeflächen unterscheiden sich alle geprimerten Pur Varianten signifikant von den restlichen Klebstoffen. Wodurch der begründete Verdacht besteht das durch die Vorbehandlung mit VKS bzw. DMF die

Zugscherfestigkeit von Klebungen mit gehobelten Fügeflächen verbessert werden kann. Bei den quer geschliffenen Fügeflächen ist ein relevanter Unterschied zwischen den DMF behandelten Fügeflächen und allen anderen Klebstoffvarianten feststellbar. Hier scheint durch die Kombination von DMF mit PUR, auf quer geschliffenen Fügeflächen, eine Erhöhung der Zugscherfestigkeit um 10% bis 50% im Vergleich zu allen anderen Varianten möglich zu sein. Bei den längs geschliffenen und den gefrästen Oberflächen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Klebstoffvarianten erkennbar.

Die Kombination von PRF und quer geschliffener Fügefläche zeigt signifikante Unterschiede zu allen anderen mechanischen Oberflächenbearbeitungen (Abbildung 7). PRF scheint in Verbindung mit quer geschliffenen Fügeflächen die Zugscherfestigkeit zu mindern. Die anderen mechanischen Bearbeitungsverfahren unterscheiden sich nicht wesentlich in ihrer Zugscherfestigkeit.

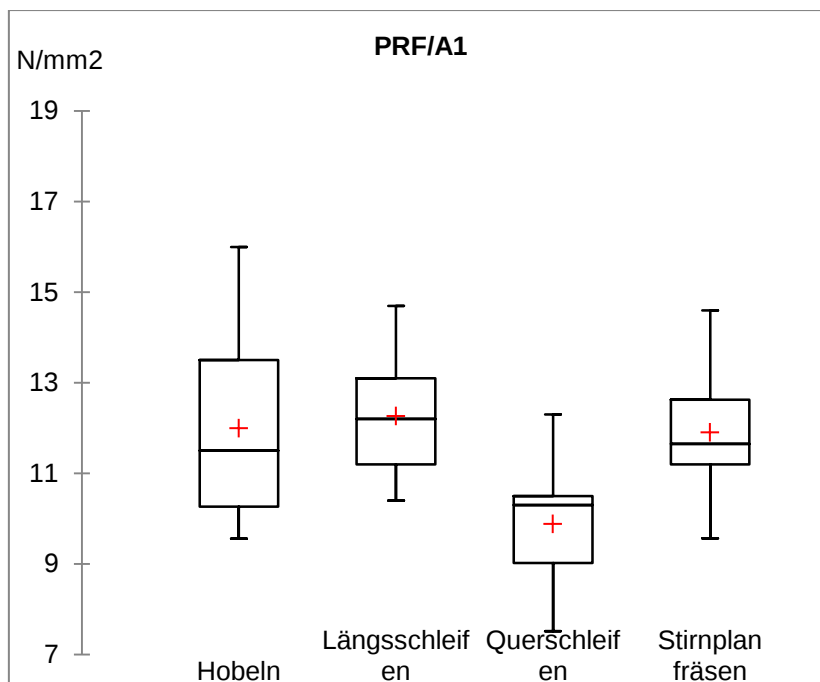


Abbildung 7: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A1

Die Zugscherfestigkeiten, der Klebungen mit MUF weisen keine prägnanten Unterschiede auf (Abbildung 8). Es ist keine massgebliche Beeinflussung der Verklebung mit MUF durch eine gezielte Oberflächenbearbeitung ersichtlich. Die höchsten Zugscherfestigkeiten nach Lagerfolge A1 erreichen, mit 15,13 N/mm², die Prüfkörper deren Fügefläche quer geschliffen und mit DMF vorbehandelt wurde. Dieselbe mechanische Bearbeitung erzeugt, in Verbindung mit PRF als Klebstoff, die geringste Zugscherfestigkeit aller nach A1 geprüften Lagerfolgen.

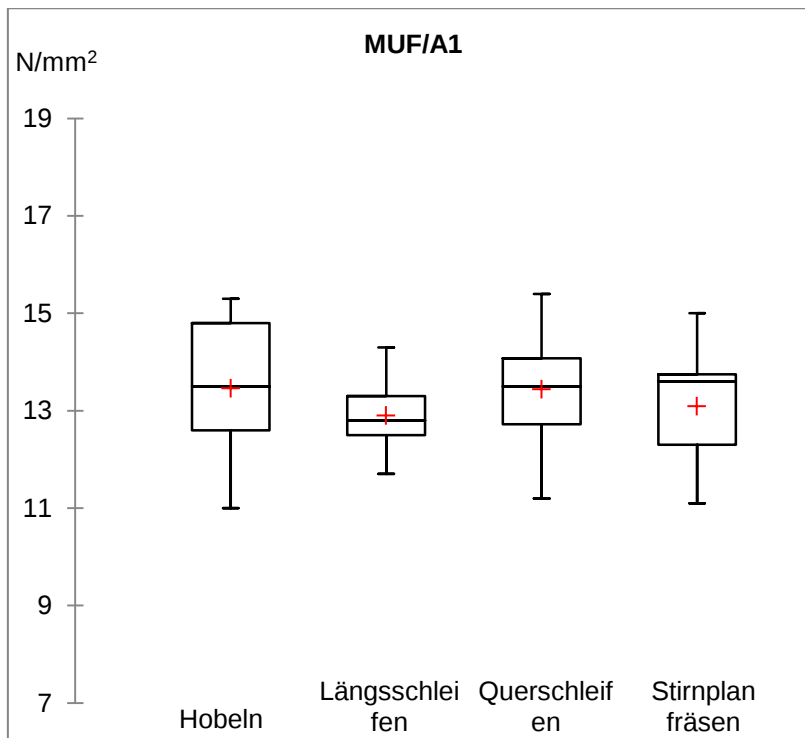


Abbildung 8: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A1

6.2 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4

Nach der Lagerfolge A4 ist bei allen Probekörpern die mit PUR verklebt wurden ein charakteristischer Unterschied zwischen den einzelnen Oberflächenbearbeitungen ersichtlich. Nur zwischen den quer geschliffenen und den gehobelten Prüfkörpern ist kein signifikanter Unterschied nachweisbar (Abbildung 9).

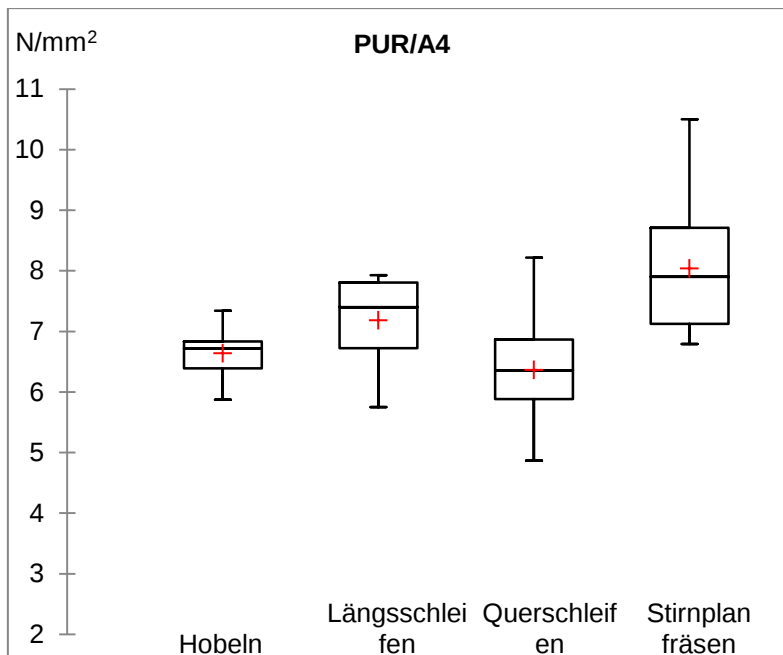


Abbildung 9: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A4

Die höchste Zugscherfestigkeit erreichen die Prüfkörper deren Fügefläche mit dem Stirnplanfräser bearbeitet wurde. Diese Prüfkörper weisen, im Vergleich zu allen

anderen mechanischen Oberflächenbearbeitungen, eine 10% bis 20% höhere Zugscherfestigkeit auf.

Die Auswertung der Zugscherversuche zeigt, dass bei den gehobelten Prüfkörpern durch den Einsatz von DMF und VKS die Zugscherfestigkeit wesentlich verbessert wird. Die Zugscherfestigkeit der mit DMF vorbehandelten Prüfkörper liegt 17% über der Zugscherfestigkeit der nur mit PUR verklebten Prüfkörper. Durch die Vorbehandlung mit VKS wird die Zugscherfestigkeit um 15% gesteigert.

Die Zugscherfestigkeiten der mit DMF vorbehandelten Prüfkörper sind in Abbildung 10 dargestellt. Wesentlich unterscheiden sich die Bearbeitungsverfahren Hobeln und Querschleifen von den beiden Bearbeitungen Längsschleifen und Stirnplanfräsen. Hier liegt die Zugscherfestigkeit der gehobelten bzw. quer geschliffenen Prüfkörper um 10% bis 12% über der Zugscherfestigkeit der anderen beiden mechanischen Bearbeitungsverfahren.

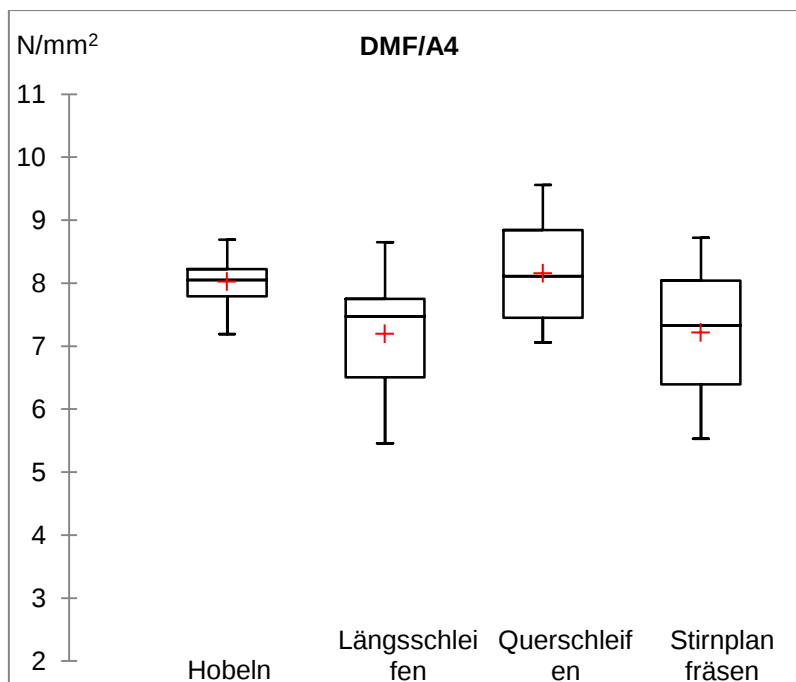


Abbildung 10: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A4

Ein signifikanter Einfluss der verschiedenen Klebstoffe bei den längs geschliffenen Proben ist nur zwischen den drei verschiedenen Klebstoffen erkennbar. Alle PUR – Varianten (mit und ohne Primer) zeigen deutlich höhere Zugscherfestigkeiten als die Klebungen mit MUF und PRF. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 9,5% bzw. 14,1% muss ein signifikanter Unterschied zwischen PUR und VKS bzw. DMF und VKS knapp abgelehnt werden.

Nach der Kochwasserlagerung (Lagerfolge A4) ist bei den Prüfkörpern die mit VKS vorbehandelt wurden nur ein prägnanter Unterschied zwischen den mechanischen

Bearbeitungsverfahren Stirnplanfräsen und Querschleifen feststellbar. Dieser signifikante Unterschied sollte jedoch kritisch betrachtet werden da bei den quer geschliffenen Prüfkörpern eine sehr grosse Streuung vorliegt (vgl. Abbildung 11).

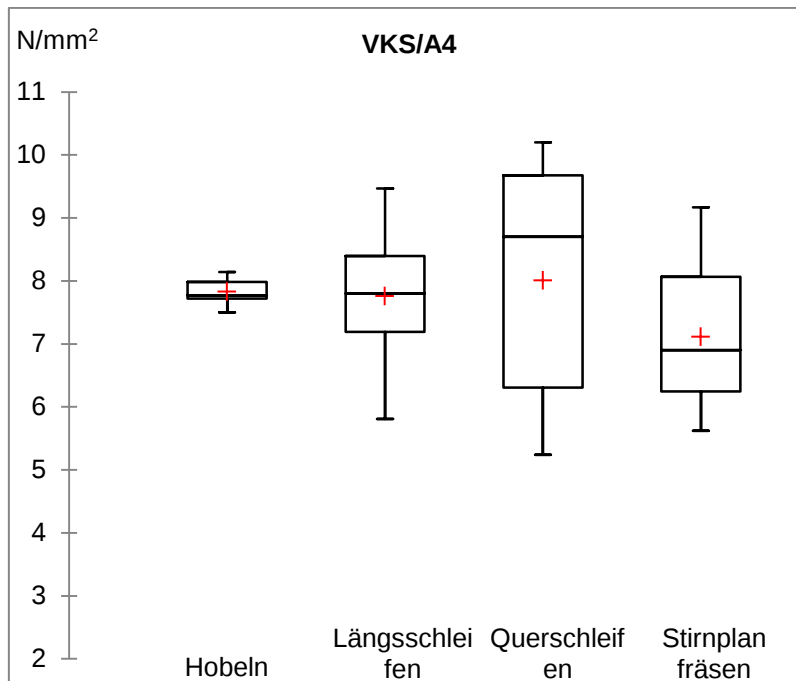


Abbildung 11: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A4

Die Prüfkörper deren Fügefläche quer geschliffen wurde zeigen eindeutige Unterschiede zwischen den verschiedenen Verklebungsvarianten. Hierbei erweisen sich die Vorbehandlung mit DMF und VKS als günstige Behandlung um die Zugscherfestigkeit zu erhöhen. Im Vergleich zur reinen PUR Verklebung wird die Zugscherfestigkeit um mehr als 30% erhöht. Des Weiteren erreichen die Varianten VKS, DMF und MUF durch das Querschleifen ihre höchsten Zugscherfestigkeiten. Eine negative Auswirkung durch das Querschleifen der Fügefläche zeigt sich bei der Zugscherfestigkeit der mit PRF verklebten Prüfkörper. Mit einer mittleren Zugscherfestigkeit von 5,5 N/mm² können diese Proben nicht die geforderte Zugscherfestigkeit der Norm DIN EN 301 (2011), von 6 N/mm² erfüllen. Diese negative Auswirkung zeigt sich auch in dem signifikanten Unterschied der Zugscherfestigkeiten bei den mechanischen Oberflächenbearbeitungen aller mit PRF verklebten Prüfkörper (Abbildung 12). Hierbei ist die mittlere Zugscherfestigkeit der quer geschliffenen Probekörper wesentlich geringer als die Zugscherfestigkeit aller anderen Bearbeitungsvarianten.

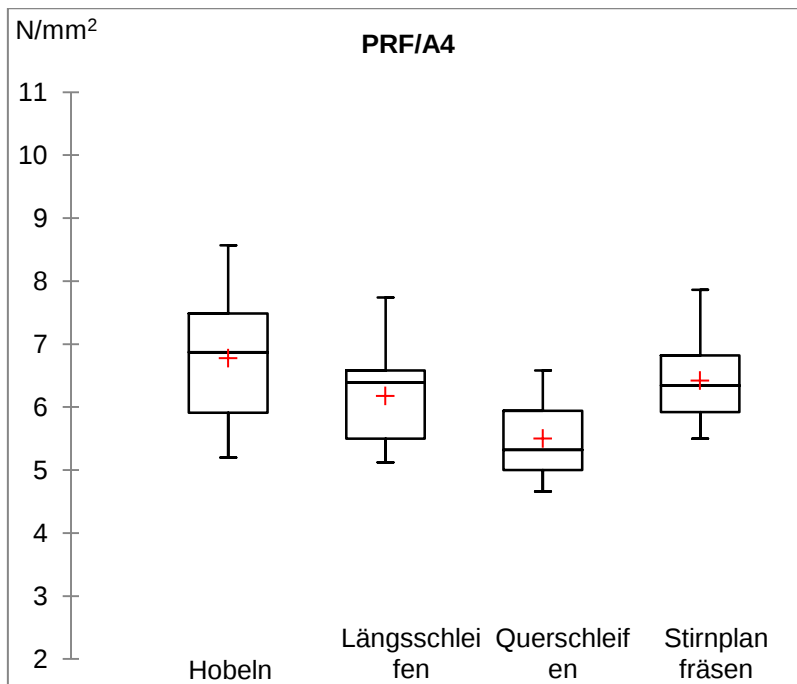


Abbildung 12: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A4

Bei der Auswertung der Zugscherfestigkeit der mit MUF verklebten Proben zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Prüfkörpern deren Fügefläche geschliffen wurde und denen deren Fügefläche gehobelt bzw. gefräst wurde (Abbildung 13). Jedoch erreichen nur die quer geschliffenen Proben die geforderte Zugscherfestigkeit von 6 N/mm² (vgl.: DIN EN 302-1 (2011)).

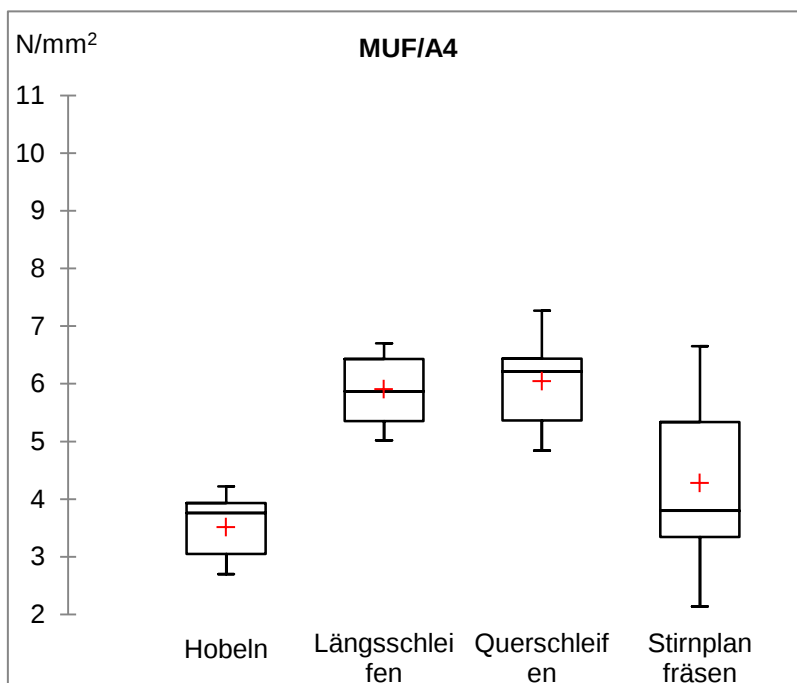


Abbildung 13: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A4

Bei den stirnplangefrästen Fügeflächen unterscheidet sich die Zugscherfestigkeit der PUR Verklebung signifikant von allen anderen Klebvarianten. Mit einer Zugscherfestigkeit von 8,04 N/mm² liegt die Festigkeit der reinen PUR Klebung 10%

über der Festigkeit der DMF Variante. Mit einer mittleren Zugscherfestigkeit von $4,28 \text{ N/mm}^2$ weist die MUF Klebung die geringste Zugscherfestigkeit auf und erfüllt ebenfalls nicht die Forderung der Norm.

6.3 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5

Bei den mit PUR verklebten Prüfkörpern weist die quer geschliffene Variante die geringste mittlere Zugscherfestigkeit auf (Abbildung 14). Diese Zugscherfestigkeit unterscheidet sich signifikant von den längs geschliffenen und den stirnplangefrästen Varianten. Mit einer mittleren Zugscherfestigkeit von $12,19 \text{ N/mm}^2$ erreichen die stirnplangefrästen Proben die höchste Festigkeit.

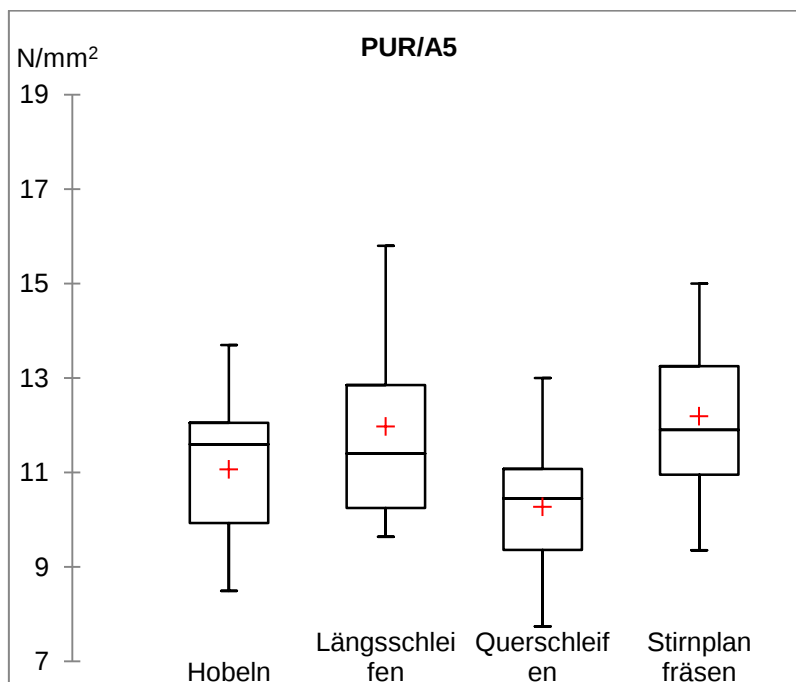


Abbildung 14: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A5

Nach Lagerfolge A5 können bei fast allen Klebvarianten signifikante Unterschiede, auf den gehobelten Fügeflächen, dokumentiert werden. Lediglich die mittlere Zugscherfestigkeit der PRF und der MUF Klebungen unterscheidet sich nicht prägnant voneinander. Mit $14,62 \text{ N/mm}^2$ erreicht die DMF Klebung die höchste mittlere Zugscherfestigkeit. Deren mittlere Zugscherfestigkeit liegt nur $0,3 \text{ N/mm}^2$ unter der mittleren Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1.

Die höchste mittlere Zugscherfestigkeit erreicht die DMF Klebung in Verbindung mit den gehobelten Fügeflächen (vgl: Abbildung 15). Gleichzeitig weist diese Kombination mit einer Standardabweichung von rund $1,4 \text{ N/mm}^2$ die geringste Streuung auf. Erheblich höhere Streuungen wurden bei den beiden geschliffenen Varianten registriert. Mit rund $11,6 \text{ N/mm}^2$ unterscheidet sich die mittlere

Zugscherfestigkeit der stirnplangefrästen Variante massgeblich von den anderen mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren.

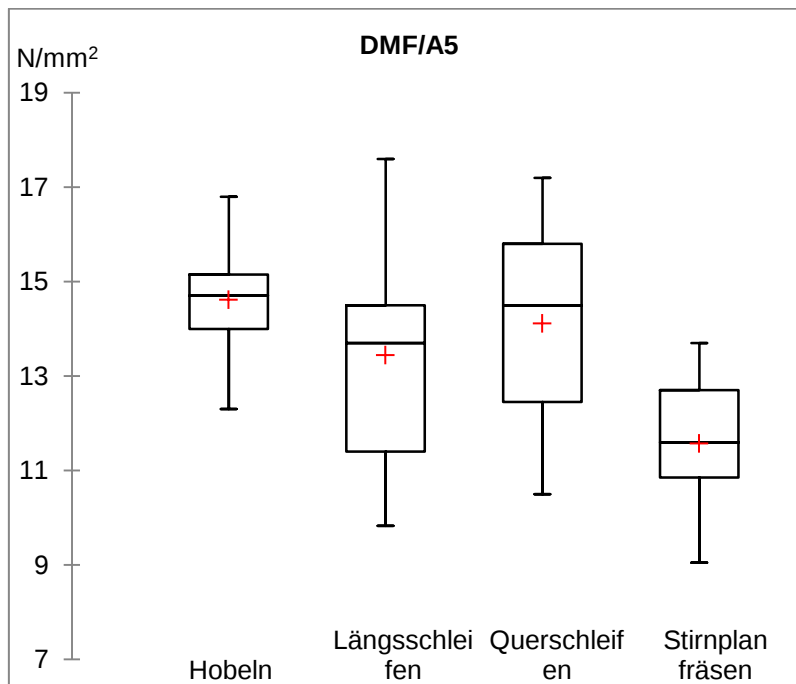


Abbildung 15: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A5

Bei den längs geschliffenen Fügeflächen können nur geringe Einflüsse der Klebvarianten dokumentiert werden. Die mittlere Zugscherfestigkeit von PUR, VKS, PRF und MUF liegt zwischen 11,12 N/mm² und 12,17 N/mm². Mit 13,44 N/mm² hebt sich nur die DMF Variante von den anderen Klebungen ab.

Deutliche Unterschiede zeigen die Klebungen welche mit VKS vorbehandelt wurden. Die Kombination aus VKS und quer geschliffener Fügefläche erreicht hier die höchste mittlere Zugscherfestigkeit (Abbildung 16). Mit einer Standardabweichung von 2,4 N/mm² hat diese Variante jedoch auch die grösste Streuung. Ebenfalls gute Resultate erreicht VKS auf der gehobelten Fügefläche. Daraus resultieren signifikante Unterschiede, in der mittleren Zugscherfestigkeit, zwischen den gehobelten Fügeflächen und den längs geschliffenen bzw. stirnplangefrästen Fügeflächen. Die mittlere Zugscherfestigkeit der quer geschliffenen Variante unterscheidet sich ebenfalls signifikant von der längs geschliffenen und der stirnplangefrästen Variante.

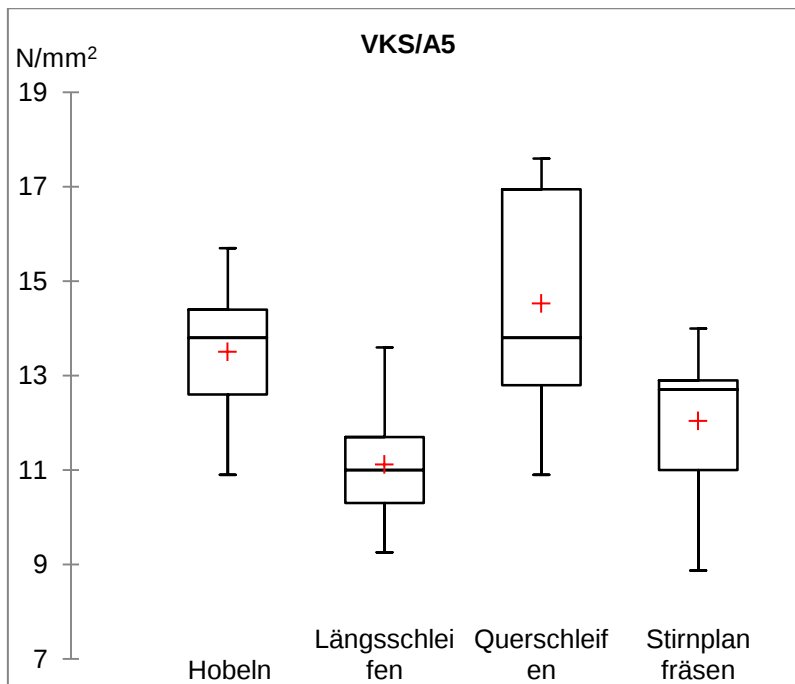


Abbildung 16: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A5

Bei den quer geschliffenen Fügeflächen ist eine wesentliche Steigerung der mittleren Zugscherfestigkeit durch den Einsatz von DMF und VKS nachweisbar. Mit über 14 N/mm^2 liegt deren mittlere Zugscherfestigkeit rund 4 N/mm^2 über der Zugscherfestigkeit von den Varianten PUR und MUF. Dies entspricht einer Erhöhung der Zugscherfestigkeit von fast 40%. Weiterhin ist auffällig, dass auch die Zugscherfestigkeit der MUF Variante, auf quer geschliffenen Fügeflächen, ca. 3 N/mm^2 über der Festigkeit der PUR und der PRF Variante liegt. PRF erreicht mit $11,35 \text{ N/mm}^2$ auf den längs geschliffenen Fügeflächen die höchste Zugscherfestigkeit. Jedoch kann bei den PRF Varianten lediglich ein signifikanter Unterschied zwischen den Bearbeitungsverfahren Hobeln und Längsschleifen aufgezeigt werden. Die Varianten Hobeln, Querschleifen und Stirnplanfräsen differieren in der mittleren Zugscherfestigkeit nur um 1 N/mm^2 (vgl. Abbildung 17). Aussergewöhnlich ist die geringe Standardabweichung von PRF in Kombination mit quer geschliffenen Fügeflächen. Mit $0,43 \text{ N/mm}^2$ ist deren Streuung nur halb so gross bzw. sogar nur ein Viertel so gross wie die der anderen PRF Varianten.

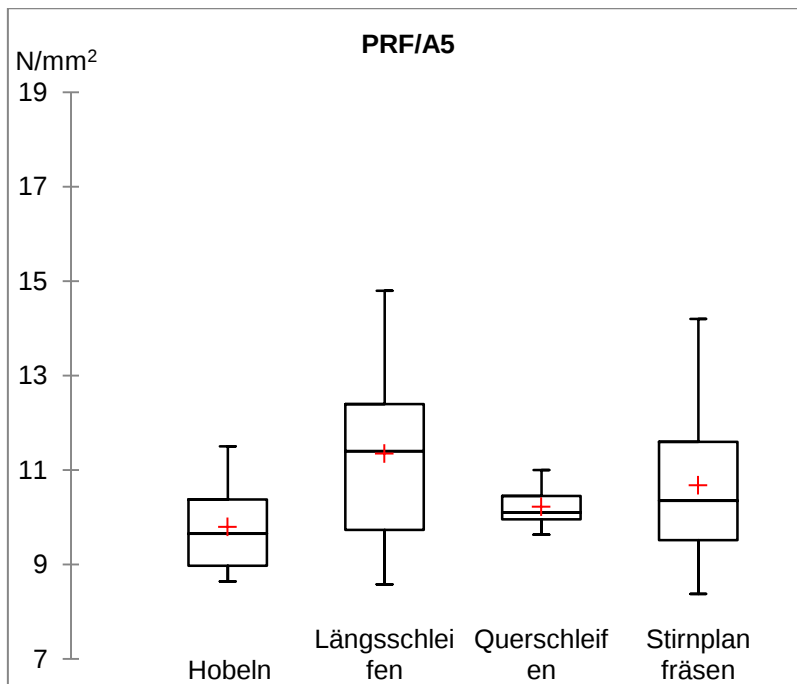


Abbildung 17: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A5

Bei der Klebung mit MUF kann nur zwischen den Fügeflächenbearbeitungen Stirnplanfräsen und Längsschleifen ein signifikanter Unterschied ausgeschlossen werden. Alle anderen mechanischen Bearbeitungen unterscheiden sich deutlich in ihrer mittleren Zugscherfestigkeit (Abbildung 18). Die Kombination von MUF und quer geschliffener Fügefläche erreicht hier mit 13,4 N/mm² die höchste mittlere Zugscherfestigkeit und erzeugt somit vergleichbare Festigkeiten wie die Klebung nach Lagerfolge A1.

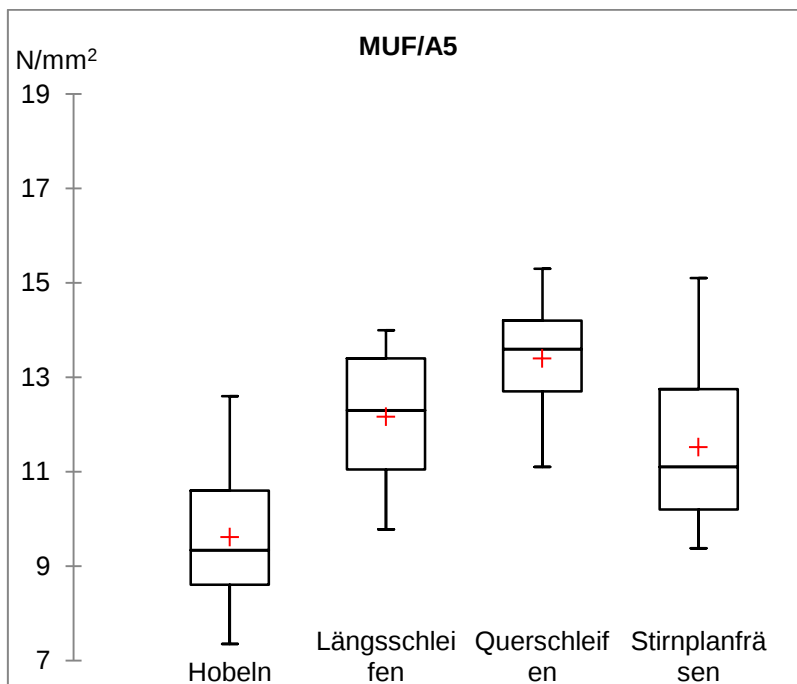


Abbildung 18: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A5

Die Variation der Klebstoffe scheint auf stirnplangefrästen Fügeflächen eher von geringer Bedeutung zu sein. Mit 10,68 N/mm² erreicht die PRF Variante die geringste mittlere Zugscherfestigkeit und weist als Einzige einen signifikanten Unterschied zu den Varianten PUR und VKS auf. Bei allen anderen stirnplangefrästen Varianten kann kein prägnanter Unterschied zwischen den klebstoffvarianten ermittelt werden.

6.4 Holzbruch

Die Grosse Streuung des Holzbruches bei allen Lagerfolgen, chemischen und mechanischen Behandlungen erschwert die statistische Auswertung der Ergebnisse enorm. Da bei den meisten Varianten Holzbruchanteile von 0% bis 100% beobachtet wurden sind nur schwer Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Herstellungsvarianten und den Holzaustriss erkennbar.

Bei diesen nicht normalverteilten Ergebnissen lassen sich jedoch einige Tendenzen ableiten. Die mechanischen Oberflächenbearbeitungen Querschleifen und Stirnplanfräsen begünstigen hohe Holzbruchanteile bei allen Lagerfolgen. Als Ausnahme muss hier die Kombination dieser Fügeflächenbearbeitungen mit MUF nach Lagerfolge A4 genannt werden. Diese beiden Oberflächenbearbeitungen beeinflussen die Adhäsion von Klebstoff und Holz negativ. Starken Schwankungen unterliegen die Holzbruchanteile der gehobelten Varianten. Hier lässt sich nur in Kombination mit PRF ein konstant hoher Holzbruchanteil erzielen. Ähnlich unstetig ist das Ergebnis bei den längs geschliffenen Proben. Nach Lagerfolge A1 und A5 erreichen diese Varianten auch Holzbruchanteile von 100%, jedoch unterliegen die mittleren Holzbruchanteile der längs geschliffenen Varianten nach Lagerfolge A4 sehr grossen Schwankungen.

Der Vergleich der verschiedenen Klebstoffvarianten zeigt eindeutig das PRF auf allen Fügeflächen und nach allen Lagerfolgen konstant hohe Holzbruchanteile erzeugt.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ansatz für weitere

Untersuchungen

Diese Forschungsarbeit belegt, dass durch gezielte mechanische und chemische Vorbehandlung der Fügefläche die Verklebungsgüte positiv beeinflusst werden kann. Die mechanische Oberflächenbearbeitung hat einen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit, wenn man die verschiedenen Klebstoffsysteme einzeln betrachtet. Vergleicht man nur die mechanische Oberflächenbearbeitung und berücksichtigt nicht die verschiedenen Klebstoffe muss ein Einfluss der Oberflächenbearbeitung, nach Auswertung der Varianzanalyse, ausgeschlossen werden. Somit ergibt sich eine Interaktion zwischen Oberfläche und chemischer Vorbehandlung. Des Weiteren hat die mechanische Oberflächenbearbeitung einen Einfluss auf den Holzbruchanteil. Im Folgenden sind die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit stichpunktartig aufgelistet:

- Durch die Oberflächenbearbeitungen Querschleifen und Stirnplanfräsen wird der Holzbruchanteil bei allen Klebstoffsystemen erhöht. Ausnahme: MUF in Kombination mit Stirnplanfräsen nach Lagerfolge A4
- PUR erzielt auf stirnplangefrästen Fügeflächen die höchste Zugscherfestigkeit
- Die PUR Klebung erreicht bei allen mechanischen Bearbeitungsvarianten und allen Lagerfolgen vergleichbare bzw. bessere Zugscherfestigkeiten und Holzbruchanteile wie MUF und PRF. Ausnahme: Der Vergleich des Holzbruchanteils von PUR und PRF auf gehobelten Fügeflächen nach Lagerfolge A4
- DMF zeigt, beim Vergleich der mechanischen Fügeflächenbearbeitungen, die höchste Zugscherfestigkeit auf gehobelten, und geschliffenen Fügeflächen
- VKS verursacht in Kombination mit geschliffenen Fügeflächen die höchsten Holzbruchanteile im Vergleich der mechanischen Fügeflächenbearbeitungsverfahren
- PRF erzeugt bei allen Oberflächenbearbeitungen und nach allen Lagerfolgen Holzbruchanteile zwischen 80% und 100%. Ausnahme: Lagerfolge A4 in Kombination mit längs geschliffenen Fügeflächen
- Die Varianten VKS und DMF erreichen immer höhere Zugscherfestigkeiten als MUF und PRF
- Folgende Kombinationen erfüllen die Mindestwerte der Norm DIN EN 301 (2011) nicht:

- PRF+ Querschleifen nach Lagerfolge A1
- PRF+ Querschleifen nach Lagerfolge A4
- MUF+ Hobeln nach Lagerfolge A4
- MUF+ Längsschleifen nach Lagerfolge A4
- MUF+ Stirnplanfräsen nach Lagerfolge A4

Ein Ursache für die geringe mittlere Zugscherfestigkeit der PRF Klebung auf den quer geschliffenen Fügeflächen kann die mechanische Oberflächenbearbeitung an sich sein. Durch das Querschleifen der Fügefläche wird die Oberfläche so verändert das die Adhäsion von PRF und Holz gehemmt wird. Für die Klebung mit MUF kommt dies jedoch nicht in Frage. Vielmehr muss hier die Ursache der geringen Zugscherfestigkeit im Klebstoff selbst gesucht werden. Aus dem Datenblatt des Klebstoffherstellers geht hervor das im Verlauf dieser Untersuchung der Grenzwert für die Lagerstabilität der Komponenten überschritten worden ist. Um diese Vermutung zu belegen sollte unter Umständen die Versuchsanordnung für die zweifelhaften Ergebnisse wiederholt werden.

Um konkrete Aussagen über die Korrelation des Holzbruchanteils mit spezifischen Eigenschaften des Holzes bzw. bestimmten Lager- und Prüfbedingungen treffen zu können wurden bislang noch nicht genügend grundlegende Zusammenhänge geklärt. Um konkrete Aussagen darüber treffen zu können sollte in einer gesonderten Forschungsarbeit fundiertes Wissen gesammelt werden um eine Basis für Interpretationen der Abhängigkeiten in spezifischen Fällen, wie diesen, treffen zu können.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1	47
Abbildung 2: Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4	48
Abbildung 3: Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5	49
Abbildung 4: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A1	52
Abbildung 5: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A1	53
Abbildung 6: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A1	53
Abbildung 7: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A1	54
Abbildung 8: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A1	55
Abbildung 9: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A4	55
Abbildung 10: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A4	56
Abbildung 11: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A4	57
Abbildung 12: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A4	58
Abbildung 13: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A4	58
Abbildung 14: Zugscherfestigkeit von PUR nach Lagerfolge A5	59
Abbildung 15: Zugscherfestigkeit von DMF nach Lagerfolge A5	60
Abbildung 16: Zugscherfestigkeit von VKS nach Lagerfolge A5	61
Abbildung 17: Zugscherfestigkeit von PRF nach Lagerfolge A5	62
Abbildung 18: Zugscherfestigkeit von MUF nach Lagerfolge A5	63

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufgabenaufteilung	42
Tabelle 2: Kombinationen von mechanischen und chemischen Bearbeitungsverfahren	43
Tabelle 3: Ergebnisse der Zugscherversuche nach Vorbehandlung A1	57
Tabelle 4: Ergebnisse der Zugscherversuche nach Vorbehandlung A4	58
Tabelle 5: Ergebnisse der Zugscherversuche nach Vorbehandlung A5	59
Tabelle 6: Holzbruch	60

10 Quellen

- [1] TEISCHINGER, A. (2007): Laubholz zunehmend im Interesse der Holzforschung. Holz-Zentralblatt (2007), Nr. 37, S. 994
- [2] KIVIMAA, E. (1950): Cutting force in wood-working. Dissertation Helsinki : Valtioneuvoston kirjapaino, (1950)
- [3] MAGOSS, E./ CSANADY, E. (2011): Mechanics of Wood Machining. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag (2011)
- [4] RIEGEL, A. (1997): Holz- und Lackzwischen Schliff - Beitrag zur Prozessmodellierung, Dissertation TU Dresden, (1997)
- [5] ASHTON, H. E. (1973): The swelling of wood in polar organic solvents. In: Wood Science 6 (1973) Nr.2, Seite 159-166
- [6] NIEMZ, P./ ALLENSBACH, K. (2009): Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf das Versagensverhalten von aus gewählten Klebstoffen bei Zugscherbeanspruchung. In: Bauphysik 31 (2009), Nr. 5. Seite 297- 304
- [7] HASS, P. u.a. (2012): Adhesive penetration in beech wood: experiments. In: Wood Science and Technology (2012), Nr. 43, Seite 243-256
- [8] MANTANIS, G. I./ YOUNG, R. A./ ROWELL, R. M. (1994): Swelling of Wood. Part 1. Swelling in water. In: Wood Science and Technology (1994), Nr. 28, Seite 119-134
- [9] LUCAS, M. u.a. (2010): Ionic Liquid Pretreatment of Poplar Wood at Room Temperature: Swelling and Incorporation of Nanoparticles. In: Applied Materials & Interfaces 2 (2010), Nr. 8, Seite 2198-2205
- [10] DIN EN 14080: 2006, Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen; Deutsche Fassung prEN 14080:2011, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [11] DIN EN 386: 2002, Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung; Deutsche Fassung EN 386:2001, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [12] DIN EN 385: 2007, Keilzinkenverbindung im Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung; Deutsche Fassung EN 385:2001, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [13] DIN prEN 301: 2011, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung

prEN 301:2011, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH

- [14] DIN prEN 302-1: 2011, Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung prEN 302-1:2011, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [15] DIN 68141: 2008, Holzklebstoffe - Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen für tragende Holzbauteile, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [16] DIN EN 15425: 2008, Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 15425:2008, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH
- [17] DIN EN 15416: 2006, Klebstoffe für tragende Holzbauteile ausgenommen Phenolharzklebstoffe und Aminoplaste – Prüfverfahren, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH